



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ « Abbès LAGHROUR » DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Construction Mécanique**

**Thème**

*Etude de l'effet de la fraction volumique des  
particules de verre sur le comportement mécanique  
d'un composite à matrice polyamide*

*Réalisé par : - Habiba MADJEHED*

*Dirigé par : Mr. MANSOURI khelifa M,C.B*

**Membres de jury :**

Mr. CHITOUR Mourad

M.A.A

Université de Khenchela

Président

Mr. BERKIA Abdelhak

M.A.A

Université de Khenchela

Examineur

*Présenté le 19/06/2022*

# Remerciement

*Je commence par remercier الله qui m'a donné la volonté, la santé, le courage et surtout la patience pour pouvoir produire ce modeste travail et faire face à toutes les contraintes qui se sont posées au cours de son élaboration.*

*Je remercie chaleureusement mon Encadreur*

*Dr. MANSOURI KHELIFA*

*pour ses valeureux conseils, pour son précieux temps qui a été consacré pour moi, par son encouragement durant l'élaboration de ce mémoire.*

*Je remercie également les membres du jury :*

*Mr. CHFOUR MOURAD pour sa patience et qui m'a fait l'honneur de présider ce jury,*

*Mr. BERKJA ABDELHAK qui a pris la peine de lire avec soin ce mémoire pour juger son contenu.*

*L'adresse aussi un grand merci à tous le personnel du département de Génie Mécanique*

*Je remercie également tous les Enseignants de l'université Khenchela qui ont Participé au cursus de ma formation*

*Enfin je remercie tous ceux qui en contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Habiba*

# *Dédicace*

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail en particulièrement*

*A mon père Pour son présence et son soutien.*

*A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi chère*

*Maman toutes mes joies, mon amour et ma reconnaissance*

*À Mes chers frères : YAKME et BABA*

*À Mes chères sœurs : MAN et DOUA*

*À toutes Ma familles :*

*À mon encadreur KHADHERAOU FAHEL*

*À tous mes professeurs*

*A mes chers amis*

*A toutes la promotion de construction mécanique avancée 2018|2019*

*Habiba*

# Liste des figures

## Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

<b>Figure I.1</b> Matériaux composites .....	4
<b>Figure I.2</b> Constituants d'un matériau composite .....	5
<b>Figure I.3</b> Différentes familles du renfort.....	6
<b>Figure I.4</b> Exemple des renforts de verre .....	7
<b>Figure 1.5</b> Différentes familles de matrice.....	8
<b>Figure 1.6</b> Classification matériaux composites suivant la forme.....	9
<b>Figure 1.7</b> Classification des matériaux composites suivant les constituants .....	10
<b>Figure 1.8</b> Composite monocouche .....	12
<b>Figure 1.9</b> Plaque stratifiée.....	12
<b>Figure 1.10</b> Composite sandwich.....	13
<b>Figure I.11</b> Exemples de tissus tridimensionnels .....	13
<b>Figure 1.12</b> Principe du moulage au contact .....	14
<b>Figure I.13</b> Principe de moulage par projection simultanée.....	14
<b>Figure I.14</b> Principe de moulage par infusion .....	15
<b>Figure I.15</b> Principe de moulage par injection de résine .....	16
<b>Figure I.16</b> Principe de moulage par centrifugation .....	16
<b>Figure I.17</b> Pièces composites sur des structures d'aéronefs- Boeing 787(Source Boeing)...	17
<b>Figure I.18</b> <i>Les Pièces composites en carbone/époxyde sur des structures d'aéronefs-Mirage 2000.....</i>	17
<b>Figure I.19</b> Matériaux composite dans l'aviation.....	18
<b>Figure I.20</b> Les ailettes de guidage de missiles.....	18
<b>Figure I.21</b> Exemple d'un satellite.....	19

## Chapitre II Etude expérimentale

<b>Figure II.1</b> Distance entre particules, (a) hexagonale et (b) carré .....	24
<b>Figure II.2</b> Géométrie des éprouvettes de traction de type I et II, selon ISO 527-4et 5.....	30
<b>Figure II.3</b> Géométrie des éprouvettes de traction de type III, selon ISO 527-4et 5.....	31
<b>Figure II.4</b> Essai de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.....	33
<b>Figure II.5</b> Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.....	35
<b>Figure II.6</b> Matière constituée d'une matrice polyamide renforcé par particules de verre ..	36
<b>Figure II.7</b> Machine d'injection.....	37
<b>Figure II.8</b> Géométrie des éprouvettes de traction conforme à la norme NF EN ISO 527-2...	37
<b>Figure II.9</b> Moule utilisé pour réaliser les éprouvettes de traction.....	37
<b>Figure II.10</b> Bain du traitement thermique .....	38
<b>Figure II.11</b> Eprouvettes utilisées.....	38
<b>Figure II.12</b> Evolution de la force maximum appliquée en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique.....	39
<b>Figure II.13</b> Evolution de la déformation en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique.....	39
<b>Figure II.14</b> Evolution des contraintes en fonction de la déformation pour des fractions volumiques 0, 25, 33 et 50 dans une éprouvette sans traitement thermique....	40
<b>Figure II.15</b> Evolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique.....	41
<b>Figure II.16</b> Evolution de la force maximum appliquée en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique.....	42
<b>Figure II.17</b> Evolution de la déformation en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique.....	42
<b>Figure II.18</b> Evolution des contraintes en fonction de la déformation pour des fractions volumiques 0, 25, 33 et 50 dans une éprouvette avec traitement thermique....	43
<b>Figure II.19</b> Evolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique.....	43

### Chapitre III Simulation numérique

<b>Figure III.1</b> Modèle par éléments finis pour un composite renforcé par des particules .....	47
<b>Figure III.2</b> Distance entre particule (arrangement Carré).....	50
<b>Figure III.3</b> Distance entre particule (arrangement Aléatoire).....	50
<b>Figure III.4</b> Distance entre particule (arrangement Hexagonale).....	51
<b>Figure III.5</b> Maillage de la matrice.....	51
<b>Figure III.6</b> Maillage des renforts .....	52
<b>Figure III.7</b> Maillage du composite .....	52
<b>Figure III.8</b> Distribution des contraintes Von Mises <i>Mises</i> pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) Pour $V_f=20\%$ (arrangement carré).....	53
<b>Figure III.9</b> Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour $V_f=20\%$ (Arrangement carré).....	53
<b>Figure III.10</b> Distribution des contraintes Von Mises pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour $V_f=20\%$ (Arrangement aléatoire).....	54
<b>Figure III.11</b> Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour $V_f=20\%$ (Arrangement aléatoire).....	54
<b>Figure III.12</b> Distribution des contraintes Von Mises pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour $V_f=20\%$ (Arrangement hexagonale).....	55
<b>Figure III.13</b> Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour $V_f=20\%$ (Arrangement hexagonale).....	55
<b>Figure III.14</b> Evolution des contraintes Von Mises en fonction de $V_f$ .....	56
<b>Figure III.15</b> Evolution des contraintes longitudinales en fonction de $V_f$ .....	56

# liste des tableaux

## Chapitre II Etude expérimentale

<b>Tableau II.1</b> Éprouvettes de traction, selon ISO 527-4 et -5.....	29
<b>Tableau I.2</b> Des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.....	34
<b>Tableau II.3</b> Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.....	35
<b>Tableau II.4</b> Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.....	36

## Chapitre III Simulation numérique

<b>Tableau III.1</b> Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D mesurées sur filament vierge .....	46
<b>Tableau III.2</b> Propriétés du PA66.....	47
<b>Tableau III.3</b> Diamètre des particules en fonction de $V_f$ .....	49

# Nomenclature

$l_m$  : longueur de la matrice  
 $d_p$  : Diamètre de la particule  
 $R_f$  : rayon de la particule  
 $s$  : Distance entre particule  
 $v_p$  : Volume des particules  
 $v_m$  : Volume de la matrice  
 $v_v$  : Volume du vide  
 $v_c$  : Volume du composite  
 $m_p$  : Masse des particules  
 $m_m$  : Masse de la matrice  
 $m_c$  : Masse du composite  
 $V_f$  : fraction volumique des particules  
 $V_m$  : fraction volumique de la matrice  
 $V_c$  : fraction volumique du composite  
 $\rho_p$  : Densité des particules  
 $\rho_m$  : Densité de la matrice  
 $\rho_c$  : Densité du composite  
 $E_p$  : Module de Young de la particule  
 $E_m$  : Module de Young de la matrice  
 $E_c$  : Module de Young du composite  
 $N_p$  : Nombre de particules dans le composite

# Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Nomenclature.....	v
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralités sur les matériaux composites</b>	
I.1 Introduction .....	4
I.2 Définition d'un matériau composite .....	4
I.3 Histoire .....	5
I.4 Constituants des composites.....	5
I.4.1 Renforts .....	5
I.4.2 Matrices .....	7
I.5 Avantages et inconvénients des matériaux composites .....	8
I.5.1 Avantages .....	8
I.5.2 Inconvénient.....	8
I.6 Classification des matériaux composites .....	9
I.6.1 Classification matériaux composites suivant la forme des constituants.....	9
I.6.2 Classification matériaux composites suivant la nature des constituants .....	10
I.7 Architecture des matériaux composites .....	11
I.7.1 Les monocouches.....	11
I.7.2 Les Stratifiés .....	12
I.7.3 Sandwichs .....	12
I.7.4 Composites tissés.....	13
I.8 Mise en œuvre des matériaux composites .....	13
I.8.1 Moulage au contact .....	13

I.8.2 Moulage par projection simultanée .....	14
I.8.3 Moulage sous vide .....	15
I.8.4 Moulage par projection de résine .....	15
I.8.5 Moulage par centrifugation .....	16
I.9 Exemples d'application des matériaux composites .....	16
I.9.1 Produits aéronautiques .....	16
I.9.2 Produits militaires .....	18
I.9.3 Produits spatiaux (satellites).....	19

## **Chapitre II Etude analytique**

II.1 Introduction.....	21
II.2 Caractéristique du mélange renfort-matrice .....	21
II.2.1 Composition du composite (renfort, matrice).....	21
II. 3 Arrangement des particules .....	24
II.3.1 Arrangement hexagonale.....	24
II.3.2 Arrangement carré.....	25
II.4 Essais mécaniques sur les composites .....	26
II.4.1 Essais statiques .....	26
II.4.2 Essais dynamiques .....	26
II.4.3 Essais mécaniques sur l'interface fibre-matrice .....	27
II.4.4 Essais sur les constituants .....	27
II.5 Analyse de la structure du composite .....	27
II.5.1 Taux de renforts et de matrice .....	27
II.5.2 Taux de porosité .....	27
II.6 Essais mécaniques sur éprouvettes .....	28
II.6.1 Fabrication des éprouvettes.....	28
II.6.2 Différentes techniques utilisées .....	29
II.7 Résultats expérimentaux.....	36
II.7.1 Eprouvettes de traction .....	36
II.7.2 Matériels et produits utilisés .....	38

II.7.3 Essai de traction .....	38
II.7.4 Résultats de l'essai de traction.....	38

### **Chapitre III Simulation numérique**

III.1 Introduction.....	45
III.2 Matériau du composite.....	45
III.2.1 Les renforts de verre.....	45
III.2.2 La matrice polyamide.....	46
III.3 Modélisation par élément finis .....	47
III.3.1 Propriété du composite.....	48
III.3.2 Condition aux limites.....	48
III.4 Résultats et discussion.....	48
III.4.1 Calcul des diamètres de particules.....	48
III.4.2 Distance 'a' entre les particules.....	49
III.4.3 Simulation numérique.....	51
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>59</b>
<b>Référence bibliographique.....</b>	<b>61</b>

# Introduction générale

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Le renfort se présente sous forme de fibres continues et discontinues (fibres courtes ou particules), le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres ; leurs orientations permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.

Les composites renforcés par des particules ont été développés en grande partie pour combler l'écart de propriétés entre les stratifiés (des fibres continues) utilisés comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses. À certains égards, les particules couplent les avantages de chacun de ces matériaux. Ainsi, les particules ont trouvé leur place dans les structures légèrement chargées, dans lequel la rigidité domine la conception, mais dans lequel il doit être également une augmentation notable de la force sur le matériau non renforcé [1].

Mathématiquement, on peut montrer que le composite renforcé par des particules contient beaucoup plus de surface de contact que le composite classique, sans changement de fraction volumique. L'augmentation de la surface de contact peut aider à compenser la liaison imparfaite entre l'interphase particule-matrice. Par conséquent, les matériaux composites constitués de nanoparticules devraient offrir une résistance supérieure à celle d'un composite classique préparé avec la même fraction volumique [2].

L'objectif principal de ce travail est d'examiner les effets de la fraction volumique des particules de verre sur le comportement mécanique d'un matériau composite constitué d'une matrice polyamide, l'analyse est réalisée par une étude expérimentale sur des éprouvettes sous traction pour des éprouvettes avant et après traitement thermique au niveau de l'Entreprise de Construction Mécanique Khenchela (ECMK), puis une étude numérique par la simulation en utilisant le Logiciel Castem.

Pour cela, on a commencé notre travail par un premier chapitre consacré aux différents types de composites et les techniques de mise en œuvre en basant sur les

## **Introduction générale**

---

composites renforcés par des particules. Ensuite, un deuxième chapitre consacré à une étude analytique sur le volume élémentaire représentatif (VER), suivi des résultats expérimentaux. Dans le troisième et dernier chapitre, on réalise une simulation numérique. Enfin, en termine notre étude par une conclusion générale.

# Chapitre I

## Généralités sur les matériaux composites

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

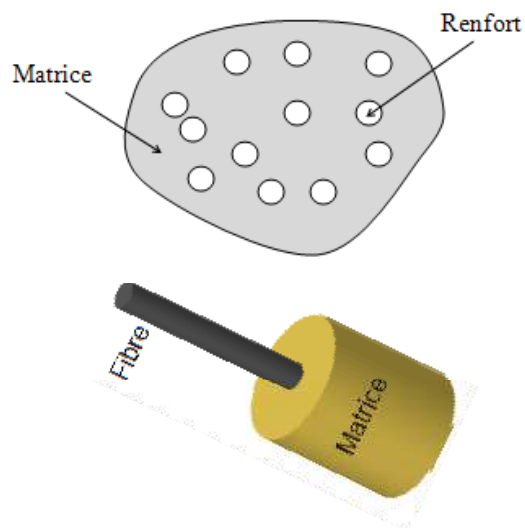
---

## I.1 Introduction

Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, les autres souples mais résistants comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur structure composite. Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont été utilisés par l'homme depuis très longtemps, citons par exemple le bois et le béton [3]. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des différents constituants des matériaux composites et le procédé de fabrication de ce type de matériaux, ainsi que leurs structures.

## I.2 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs (Figure I.1). On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements des renforts qui sont noyés dans une matrice, entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface. Ces matériaux composites sont la plupart du temps hétérogènes et anisotropes. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs [4].



*Figure I.1 Matériaux composites.*

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

## I.3 Histoire

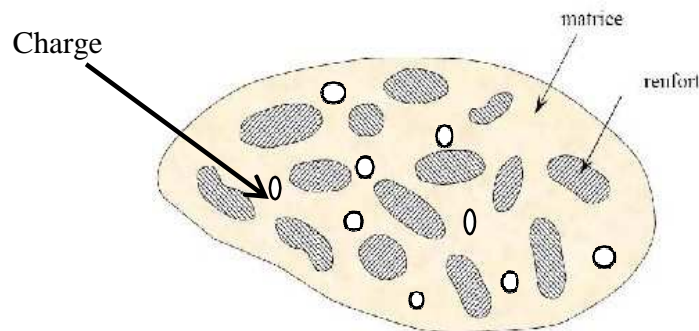
Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve aussi les arcs Mongols (2000 ans av. J.C.). Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne.

- 1823 : Charles Macintosh crée l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus comme le coton.
- 1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé (le composite utilisé en construction) avec le béton qui forme la matrice et l'acier qui forme le renfort [5].

## I.4 Constituants des composites

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.



*Figure I.2 Constituants d'un matériau composite [3].*

### I.4.1 Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites (résistance à la rupture, dureté...) et ils se présentent sous forme de fibres (longues ou courtes) ou des particules.

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

## a) Différents types de renfort

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées :

- Constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.
- Les renforts fibreux se présentent sous diverses formes commerciales.
- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.
- Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à  $800 \text{ g/m}^2$ .
- Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine [5].

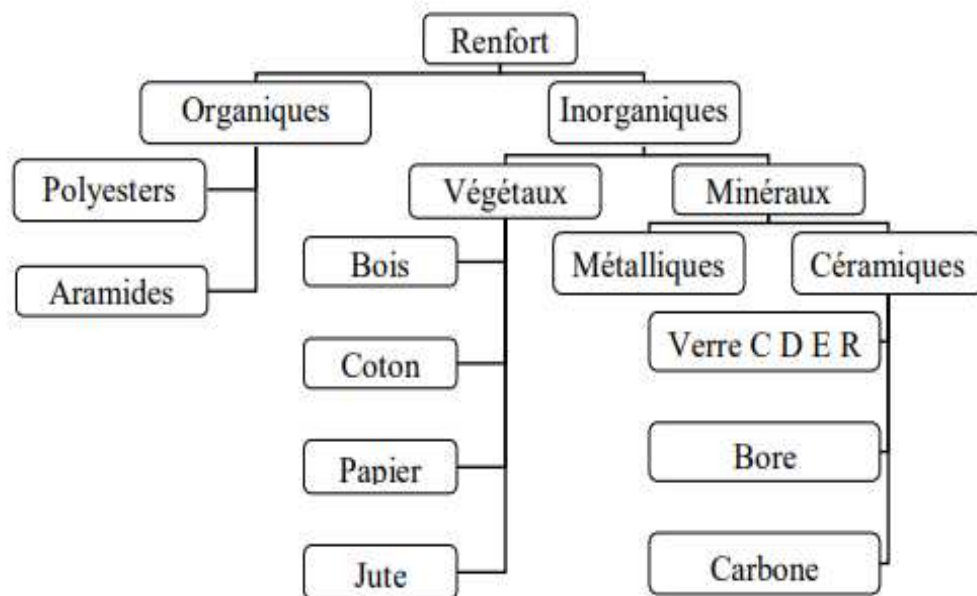


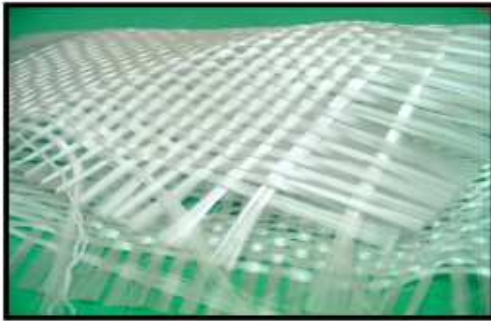
Figure. I.3 Différentes familles du renfort

## Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

---



a – Roving de verre



b – Tissu de verre



c – Mat de verre

*Figure I.4 Exemple des renforts de verre*

### I.4.2 Matrices

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 [6].

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- les composites à matrice organique (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique) ;
- les composites à matrice métallique (CMM) pour quelques applications spécialisées.

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

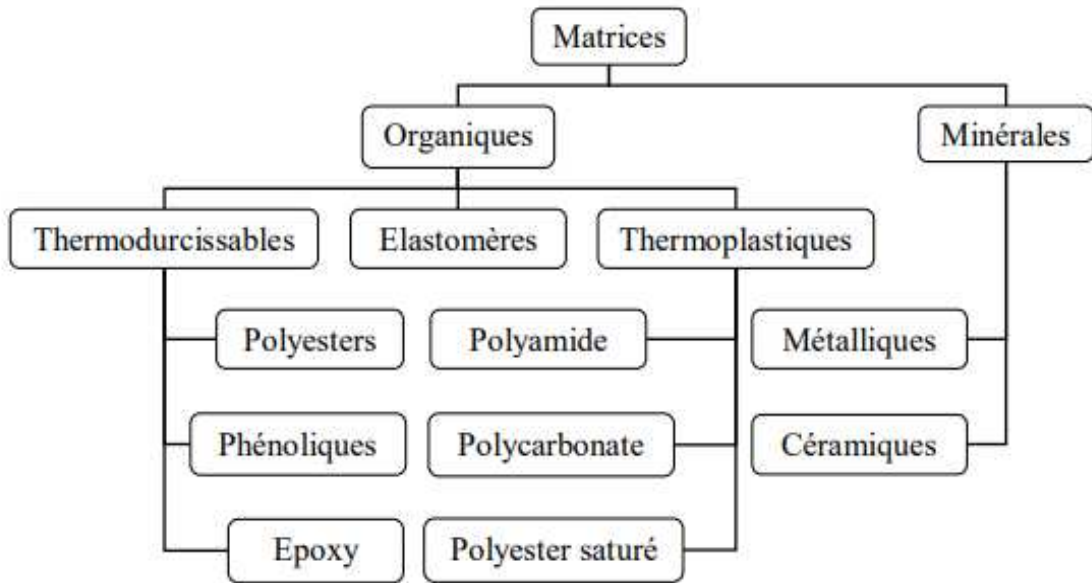


Figure I.5 Différentes familles de matrice.

## I.5 Avantages et inconvénients des matériaux composites

### I.5.1 Avantages

1. Gain de masse,
2. Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques),
3. Grande résistance à la fatigue,
4. Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone),
5. Insensibles aux produits chimiques "mécaniques" comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole [7].

### I.5.2 Inconvénient

1. Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température,
2. Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métaux,

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

3. Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices,
4. Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries,
5. Pas de recyclabilité satisfaisante [8].

## I.6 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés suivant la forme ou suivant la nature des composants :

### I.6.1 Classification matériaux composites suivant la forme des constituants

- Composites à particules (inclusions) lorsque le renfort se trouve sous forme de particules.
- Composites à fibres (courtes ou longues) lorsque le renfort se trouve sous forme de fibres (continues ou discontinues) dont leur orientation dépend de la sollicitation mécanique qu'elles doivent supporter un matériau composite .

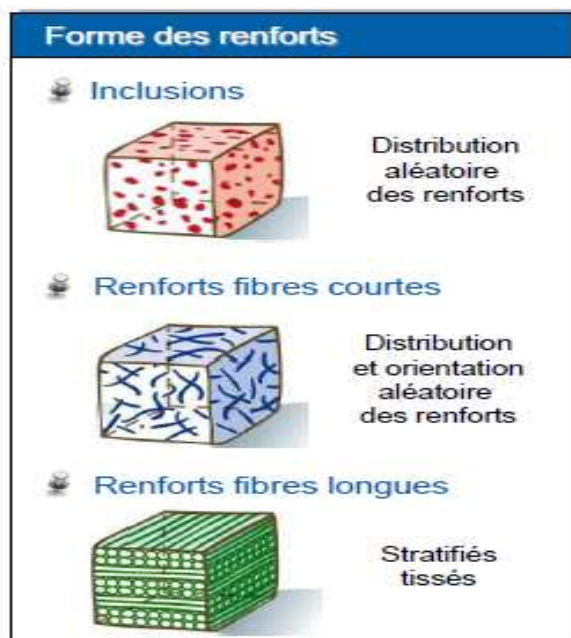
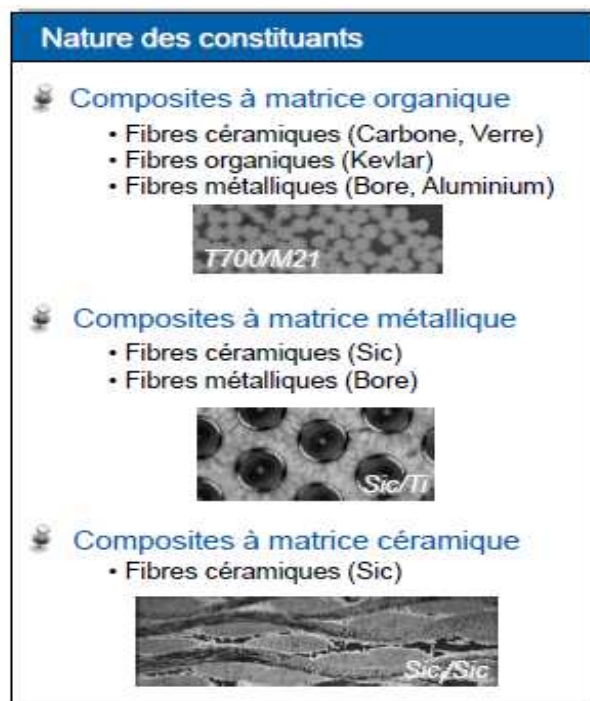


Figure I.6 Classification matériaux composites suivant la forme

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

## I.6.2 Classification matériaux composites suivant la nature des constituants

- Composites à matrice organique (CMP).
- Composites à matrice métallique (CMM).
- Composites à matrice céramique (CMC).



*Figure I.7 Classification des matériaux composites suivant les constituants*

La nature du matériau constituant la matrice permet de répertorier trois grandes classes de composites, considérées ici par ordre croissant de tenue en température : les composites (CMP), les composites (CMM) et les composites (CMC). Il est alors possible d'associer à ces trois types de matrice soit des renforts discontinus, dont toutes les dimensions sont très inférieures aux dimensions de la pièce, soit des renforts continus, dont au moins une dimension est du même ordre de grandeur qu'une dimension de la pièce.

La fabrication des composites (CMP) emploie deux types de matrices : les résines thermodurcissables qui représentent 75% des (CMP) actuels (époxyde, polyester, vinylester).

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

---

polyuréthane...), et les résines thermoplastiques (polypropylène, polyamide...) qui sont moins utilisées. L'utilisation des (CMP) reste limitée au domaine de températures inférieures à **200°C**.

Pour des applications plus haute température, on fait appel aux composite (CMM) jusqu'à **600°C**. Les métaux ou alliages métallique utilisés dans la fabrication des (CMM) sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé. Ainsi, l'aluminium le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utilisés.

Enfin, lorsque les températures d'utilisation sont supérieures à **1000°C**, on a recours aux composites à matrice céramique. Dans ce type de comporte, le renfort est généralement constitué de fibres longues en carbone, en silice ou en carbure de silicium assemblées par tissage multidimensionnel. Ce renfort poreux est infiltré par la matrice (carbone, silice, carbure de silicium) qui se trouve soit en phase liquide soit en phase gazeuse.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent 90% des matériaux composites. Ils sont constitués d'une matrice therm durcissable ou thermoplastique et d'une structure de renforts qui peut être en fibre de carbone, de verre, d'aramide ou encore naturelle.

## I.7 Architecture des matériaux composites

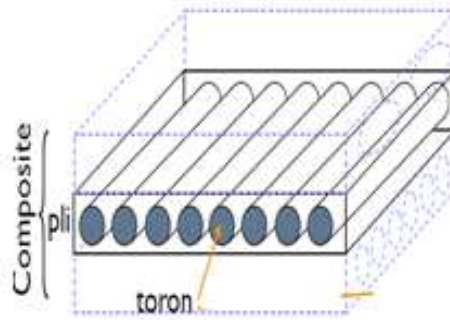
L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- Par surface : plaques, coques ;
- Par stratification de couches successives (stratifiés) ;
- Composites sandwiches ;
- Matériaux composites volumiques.

### I.7.1 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 [9].

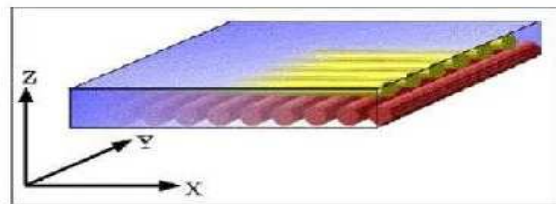
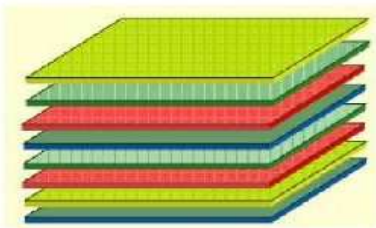
# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites



*Figure I.8 Composite monocouche.*

## I.7.2 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.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 [10].



*Figure I.9 Plaque stratifiée.*

## I.7.3 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 [11].

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

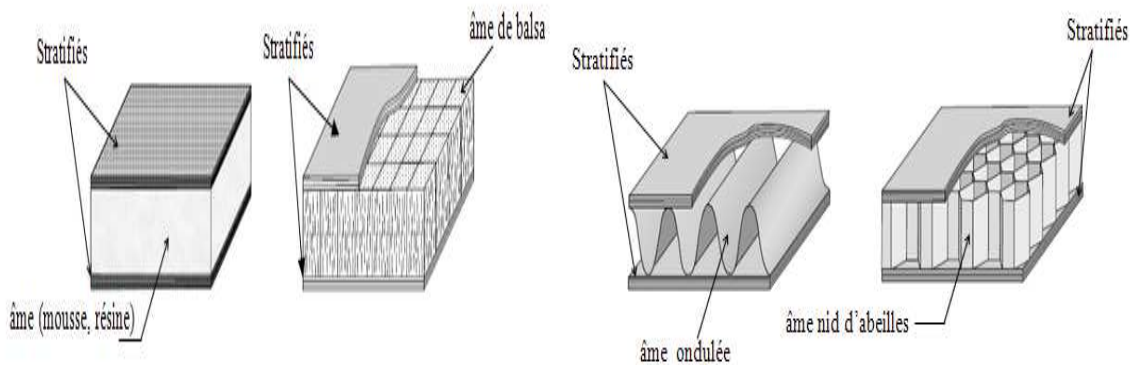


Figure I.10 Composite sandwich.

## I.7.4 Composites tissés

Il existe d'autres tissus en forme tridimensionnels qui possèdent des fils dans plusieurs directions. Ce type de tissage permet de réaliser des pièces avec des épaisseurs variables qui résistent mieux à l'arrachement, Mais ce type de fabrication est plus complexe.

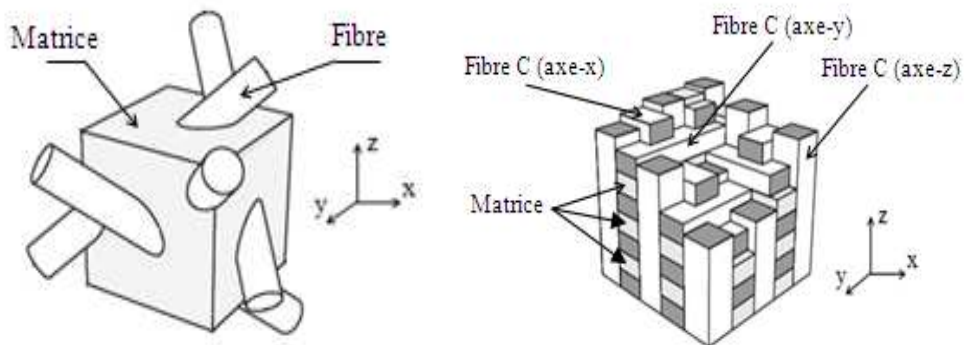


Figure I.11 Exemples de tissus tridimensionnels

## I.8 Mise en œuvre des matériaux composites

### I.8.1 Moulage au contact

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

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

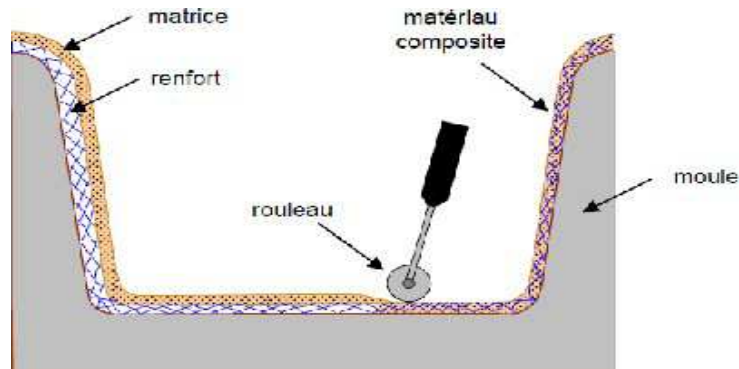


Figure I.12 Principe du moulage au contact

## I.8.2 Moulage par projection simultanée

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

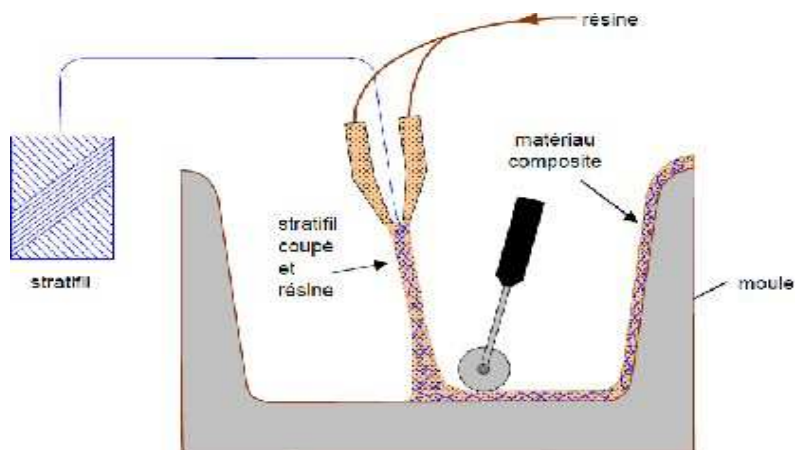


Figure I.13 Principe du moulage par projection simultanée.

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

## I.8.3 Moulage sous vide

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.

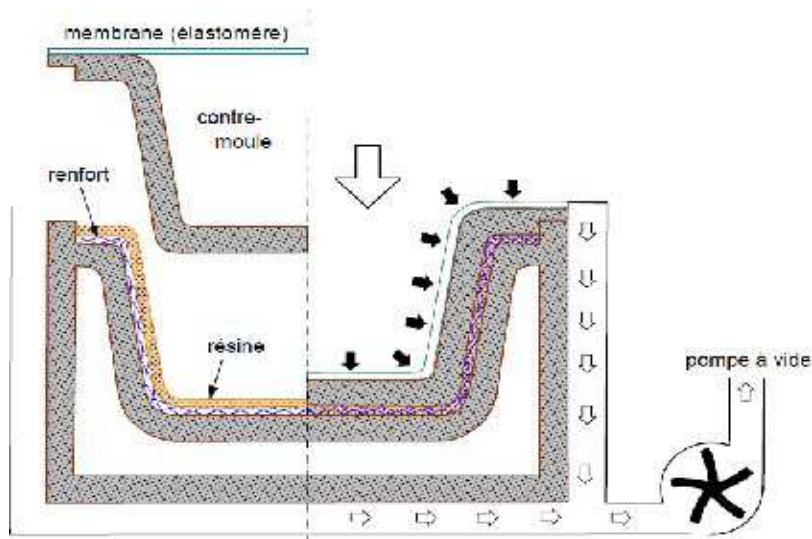


Figure I.14 Principe de moulage par infusion [3].

### Avantages et inconvénients

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

## I.8.4 Moulage par projection 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

## Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

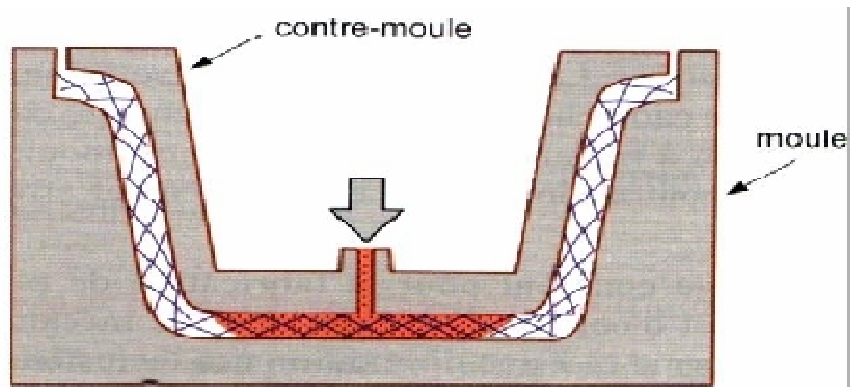


Figure I.15 Principe de moulage par injection de résine [3].

### I.8.5 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.

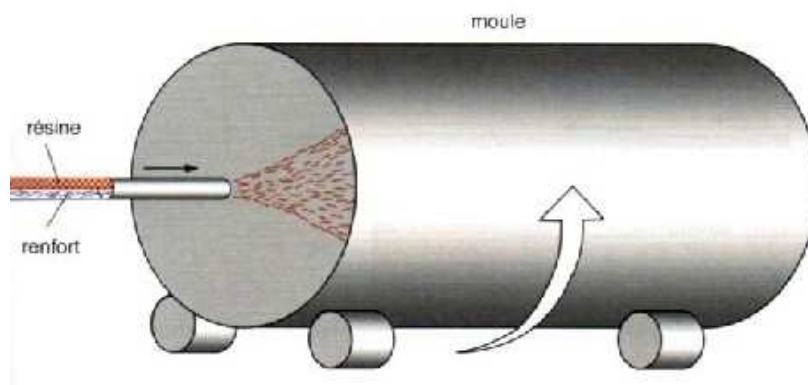


Figure I.16 Principe de moulage par centrifugation [3].

### I.9 Exemples d'application des matériaux composites

#### I.9.1 Produits aéronautiques

La principale motivation dans l'utilisation des matériaux composites pour la réalisation des structures aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques (Figure I.17). Les matériaux composites présentent

## Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

aussi un quasi insensibilité à la fatigue, en comparaison aux matériaux métalliques qui nécessitent une maintenance et un suivi régulier de la propagation des fissures. Ils ne sont pas aussi sujets à la corrosion, mais ils nécessitent une bonne isolation électrique lors des assemblages avec des pièces en alliages légers entre le composite et le métal pour éviter la corrosion galvanique de l'aluminium (si la fibre de renfort est en carbone par exemple). Les techniques de fabrication utilisées permettent l'obtention de formes complexes directement par moulage avec possibilité de réaliser en une seule pièce un ensemble (Figure I.18), qui réalisé en métallique, nécessite plusieurs sous éléments. Ceci permet de réduire les coûts d'assemblage de façon importante.

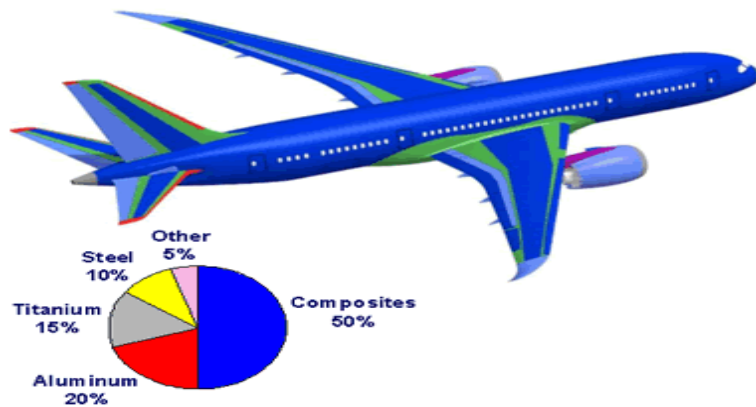


Figure I.17 Pièces composites sur des structures d'aéronefs- Boeing 787(Source Boeing).

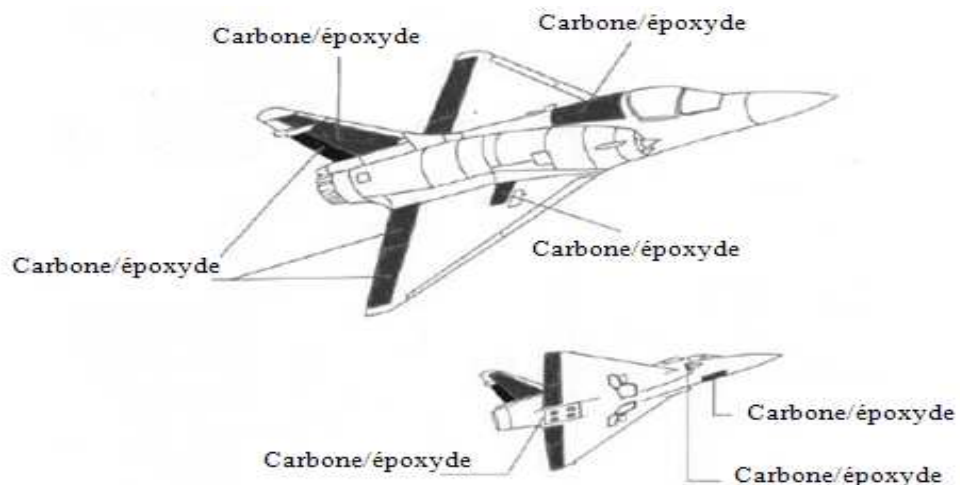


Figure I.18 Les Pièces composites en carbone/époxyde sur des structures d'aéronefs-Mirage 2000.

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

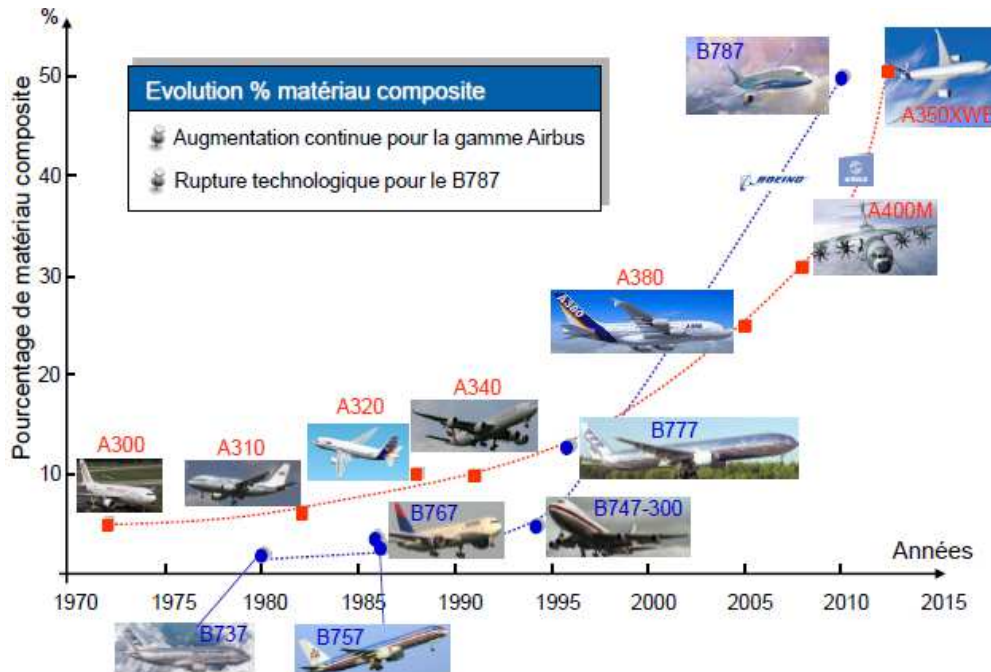


Figure I.19 Matériaux composite dans l'aviation.

## I.9.2 Produits militaires

Pour les produits militaires (missiles), le premier avantage, c'est la performance des matériaux composites, ensuite l'utilisation des composites sur les ailettes de guidage de missiles permet de garder une bonne maîtrise de la trajectoire jusqu'à la cible finale à cause de l'échauffement cinétique provoqué par le frottement de sur la structure des ailettes de missile (Figure I.20) [7].

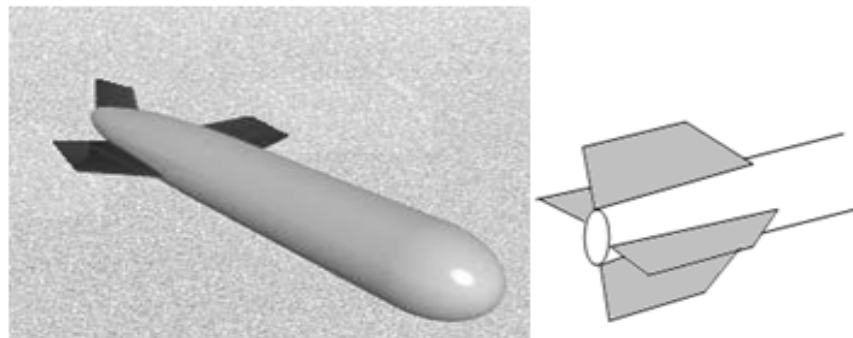


Figure I.20 Les ailettes de guidage de missiles.

# Chapitre I Généralité sur les matériaux composites

---

## I.9.3 Produits spatiaux (satellites)

Les déformations de la structure peuvent avoir une origine thermique avec des expositions en température pouvant varier entre  $-180^{\circ}\text{C}$  lorsque le satellite est dans l'ombre et  $+160^{\circ}\text{C}$  lorsque le satellite est exposé au soleil (Figure I.21). De plus, sur la même structure, entre la face éclairée et la face à l'ombre, le gradient de température peut être important. Les structures en matériaux composites à matrice organique, de part la valeur négative du coefficient de dilatation thermique des fibres de carbone et la valeur positive du coefficient de dilatation thermique de la matrice, peuvent, avec une orientation optimisée des différentes couches constituant la structure, présenter globalement un coefficient de dilatation thermique proche de zéro pour l'ensemble de la structure. L'utilisation des fibres de carbone à très haut module sur les composites permet de répondre à cette préoccupation [7].



*Figure I.21* Exemple d'un satellite.

# Chapitre II

## Etude Expérimentale

# Chapitre II Etude Expérimentale

---

## II.1 Introduction

Les polymères renforcés par des particules se sont retrouvés dans des structures secondaires légèrement chargées, dans lesquelles la rigidité domine la conception, mais dans laquelle il doit y avoir également une augmentation notable de la résistance sur le polymère non renforcé [12] car ils offrent non seulement des propriétés mécaniques supérieures, mais ils peuvent également être facilement produits [13].

## II.2 Caractéristique du mélange renfort-matrice

### II.2.1 Composition du composite (renfort, matrice)

La teneur en volume des particules est définie comme [14]:

$$V_f = \frac{V_p}{V_c} = \frac{\text{volume des particules}}{\text{volume total du composite}} \quad (\text{II.1})$$

De la même façon, la teneur en volume de la matrice est :

$$V_m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{\text{volume de la matrice}}{\text{volume total du composite}} \quad (\text{II.2})$$

Et la teneur en volume des vides (porosité) est :

$$V_v = \frac{V_v}{V_c} = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total du composite}} \quad (\text{II.3})$$

Le volume du composite s'écrit :

$$V_c = V_p + V_m + V_v \quad (\text{II.4})$$

Ou

$$\frac{V_c}{V_c} = \frac{V_p}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} + \frac{V_v}{V_c} \quad (\text{II.5})$$

D'où

$$V_p + V_m + V_v = 1 \quad (\text{II.6})$$

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

Dans la pratique, il est plus facile de déterminer le pourcentage en poids des renforts par la pyrolyse ou par la dissolution par acide et c'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'établir les relations entre les teneurs en volume et les proportions en poids.

Par le même raisonnement que dans le cas précédent, on obtient pour le poids :

$$m_p + m_m = 1 \quad (\text{II.7})$$

Où la teneur en poids des particules est :

$$m_p = \frac{M_p}{M_c} = \frac{\text{poids des particules}}{\text{poids total du composite}} \quad (\text{II.8})$$

Et la teneur en poids de la matrice est :

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{\text{poids de la matrice}}{\text{poids total du composite}} \quad (\text{II.9})$$

Le poids des vides est négligeable.

La masse volumique du composite qui se définit comme :

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} \quad (\text{II.10})$$

Peut être calculée en tenant compte ou non de la présence des vides :

- En négligeant le volume des vides :

$$V_c = V_p + V_m \quad (\text{II.12})$$

Le poids du composite s'écrit :

$$M_c = M_p + M_m \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{M_c}{V_c} = \frac{M_p + M_m}{V_c} = \frac{M_p}{V_c} + \frac{M_m}{V_c} \quad (\text{II.14})$$

Ou

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

$$\frac{M_c}{V_c} = \frac{M_p}{V_p} \frac{V_p}{V_c} + \frac{M_m}{V_m} \frac{V_m}{V_c} \quad (\text{II.15})$$

D'où la relation :

$$\rho_c = \rho_p v_p + \rho_m v_m \quad (\text{II.16})$$

La masse volumique du composite peut s'écrire également en fonction de la teneur en poids des constituants :

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} = \frac{1}{\frac{V_c}{M_c}} = \frac{1}{\frac{V_p}{M_c} + \frac{V_m}{M_c}} = \frac{1}{\frac{V_p}{M_c} + \frac{V_m}{M_c}} \quad (\text{II.17})$$

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m}} \quad (\text{II.18})$$

- En tenant compte du volume des vides :

En pratique les composites contiennent une quantité de vide non négligeable, il est nécessaire de considérer la teneur en volume des vides.

La masse volumique du composite s'écrit :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{V_c}{M_c}} = \frac{1}{\frac{V_p}{M_c} + \frac{V_m}{M_c} + \frac{V_v}{M_c}} \quad (\text{II.19})$$

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_v}{\rho_c}} \quad (\text{II.20})$$

Ou

$$\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_v}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_c} \quad (\text{II.21})$$

Alors

## Chapitre II Etude Expérimentale

$$\frac{v_v}{\rho_p} = -\frac{m_p}{\rho_p} - \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{1}{\rho_c} \quad (\text{II.22})$$

La teneur en volume des vides est :

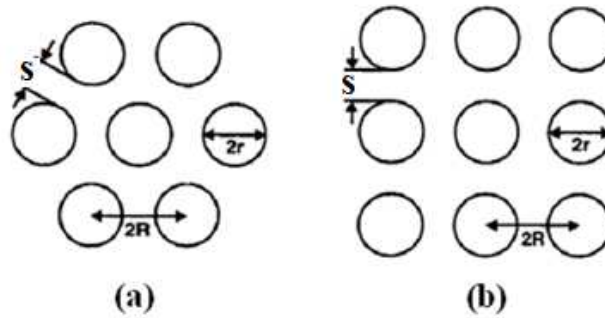
$$v_v = 1 - \rho_c \left( \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_m}{\rho_m} \right) \quad (\text{II.23})$$

Ou encore

$$v_v = 1 - \rho_c \left( \frac{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_c - m_p}{\rho_m}}{\frac{m_c}{\rho_c}} \right) \quad (\text{II.24})$$

### II.3 Arrangement des particules

Dans l'analyse théorique, les particules sont supposées avoir des arrangements uniformes, chaque particule a une forme circulaire et le même diamètre. Comme pour les composites renforcés par des fibres courtes, les arrangements utilisés sont carré et hexagonal (illustré dans la Figure II.1).



*Figure II.1 Distance entre particules, (a) hexagonale et (b) carré*

#### II.3.1 Arrangement hexagonale

L'arrangement des particules de ce type est représenté schématiquement sur la Figure II.1, supposons qu'il y a des  $N$  particules dans le composite. Considérant l'élément hexagonal (Figure II.1 (a)) et selon la définition de la fraction volumique de particules d'un composite, dans ce cas la fraction volumique maximale de particules est calculé comme suit :

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{r}{R_{\min}} \right)^2 \quad (\text{II.25})$$

## Chapitre II Etude Expérimentale

### II.3.2 Arrangement carré

L'arrangement des particules dans ce cas est montré dans la figure II.1 (b), et nous avons en conséquence :

$$V_f = \frac{\pi}{4} \left( \frac{r}{R_{\min}} \right)^2 \quad (\text{II.26})$$

Réarrangé les équations Eq II.25 et Eq II.26 on aura la distance  $s$  entre les particules dans les deux arrangements idéales :

$$s = 2 \left[ \left( \frac{\pi}{2\sqrt{3}V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] r \quad (\text{Hexagonale}) \quad (\text{II.27})$$

$$s = 2 \left[ \left( \frac{\pi}{4V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] r \quad (\text{Carré}) \quad (\text{II.28})$$

Ces arrangements idéals sont généralement utilisés pour développer des modèles micromécaniques en raison de leur simplicité. Cependant, ils ne sont pas observés dans les composites réels sauf dans quelques régions localisées. Le mélange des arrangements dans une section transversale varie en fonction de la fraction volumique des particules et de l'espacement entre les particules adjacentes et peut être lié à la fraction volumique des particules empiriquement [14]:

$$s = 2 \left[ (1.8 - 0.75V_f) V_f \right]^{-1/2} \quad (\text{II.29})$$

L'une des principales conséquences de la non-uniformité de l'arrangement est la difficulté d'obtenir des fractions volumiques supérieures à 0,7, ce qui est considéré comme la limite pratique pour les matériaux commerciaux.

Le développement d'équations micromécaniques pour les composites particuliers suit les mêmes lignes que celles pour les composites renforcés de fibres continues. Dans le cas de composites renforcés de particules, les particules de différentes formes et tailles sont dispersées uniformément dans le matériau liant et elles sont supposées être disposées selon un motif de réseau régulier comme un carré ou un hexagone [15].

Les hypothèses suivantes ont été faites dans la micromécanique actuelle des composites particuliers:

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

1. Le composite est composé de deux phases - particules et liant (matrice).
2. Chaque phase du composite peut être décrite par la mécanique continue. Par conséquent, les paramètres d'entrée sont les modules, les coefficients de Poisson, les coefficients de dilatation thermique et les conductivités thermiques des phases individuelles.
3. La micromécanique est caractérisée par des valeurs moyennes de propriétés du composites et des contraintes moyennes des constituants sur une certaine région.
4. L'interface entre la particule et le liant a été supposée être une liaison parfaite.
5. Les propriétés des phases individuelles sont supposées isotropes [16].

Les propriétés mécaniques d'une matrice thermoplastique renforcée de particules dépendent de facteurs tels que la fraction volumique, la forme des particules et la distribution spatiale au sein de la matrice [17], les propriétés de la matrice influe aussi sur le comportement du composite [18]. Bien qu'il s'agisse d'un problème très complexe, différentes méthodes ont été proposées pour estimer les modules élastiques efficaces du composite.

### II.4 Essais mécaniques sur les composites

Les propriétés des composites doivent satisfaire le cahier des charges (calculs de résistance et durabilité). Le contrôle du taux de renfort et de la température de transition permet de situer la qualité du produit. Les essais non destructifs permettent la mise en évidence des défauts de structure qui initient l'endommagement ainsi que l'évolution du processus de rupture.

#### II.4.1 Essais statiques

- Essai de traction et de compression (traction longitudinale, transversale, hors axes, compression longitudinale...);
- Essai de flexion (trois points, quatre points, par flambement, ...);
- Essai de dureté.

#### II.4.2 Essais dynamiques

- Essai de compression dynamique ;
- Essai au choc ;
- Essai de fatigue [12].

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

### II.4.3 Essais mécaniques sur l'interface fibre-matrice

- Essai sur éprouvettes modèles (Essai Pull-out, essai de fragmentation ...)
- Essai sur produit fini (essai de micro-indentation, essais de cisaillement inter laminaire, par flexion ou par traction...) [13]

De plus d'autres essais ou analyses permettront une meilleure connaissance du composite : Vieillessement (absorption d'eau, tenue en température), dilatation thermique...

### II.4.4 Essais sur les constituants

Les renforts et la matrice.

### II.5 Analyse de la structure du composite

La caractérisation de la structure physique du matériau composite fabriqué, sur la base d'une détermination des taux de renfort, de charges et de porosité permet de suivre la constance d'une fabrication et, en outre, de mesurer les paramètres nécessaires au calcul des matériaux multicouches.

#### II.5.1 Taux de renforts et de matrice

la connaissance des masses volumiques de la matrice ( $\rho_m$ ) et du renfort ( $\rho_f$ ) permet de calculer le taux de renfort volumique ( $\varphi_v$ ) qui intervient dans les calculs des caractéristiques des composites :

$$\frac{1}{\varphi_v} = \frac{\rho_r}{\rho_m} \left( \frac{1}{\varphi_p} - 1 \right) + 1 \quad (\text{II.30})$$

Ainsi que la masse volumique théorique ( $\rho_t$ ) :

$$\rho_t = \varphi_v \rho_r + (1 - \varphi_v) \rho_m \quad (\text{II.31})$$

#### II.5.2 Taux de porosité

Le taux de porosité (ou taux de vide) et sa distribution dans le composite dépendent de nombreux facteurs tels que :

- 1) Le type de résine (nature, accélérateur, catalyseur, caractéristiques rhéologiques, composants volatils) ;

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

- 2) L'orientation, le taux et la structure du renfort (armure, ensimage, séquence d'empilement) ;
- 3) Les paramètres technologiques liés aux procédés de fabrication (températures, temps, pressions et dépressions, degré hygrométrique).

En pratique, le taux de porosité des pièces industrielles se situe entre 1 et 10 %, selon le procédé de mise en œuvre choisi. Un taux de porosité élevé se traduit essentiellement par des chutes de propriétés mécaniques importantes (jusqu'à 50 % pour un taux volumique de vide de 5 %), surtout à la rupture en cisaillement et dans la direction perpendiculaire aux fibres [14].

L'influence sur le comportement mécanique à long terme, notamment en milieu humide, est en revanche encore mal connue. Les méthodes de mesure du taux de porosité, disponibles actuellement, se divisent en méthodes non destructives non normalisées (ultrasonores, radiographique, micro-ondes...) et méthodes destructives normalisées (mesures de densités, désintégration mécanique, comptage statistique).

### II.6 Essais mécaniques sur éprouvettes

#### II.6.1 Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes sont soit moulées directement, soit découpées à partir des plaques échantillons ou soit découpées à partir des structures. Le découpage est effectué, suivant les cas, par fraisage ou sciage. Les plaques échantillons sont réalisées, suivant les normes :

- 1) T 57-151 (plaques à renfort unidirectionnel pour éprouvettes avec talons moulés) ;
- 2) NF ISO 9291 (plaques planes bobinées à renfort unidirectionnel) ;
- 3) NF T 57-153 (plaques à renforts de tissus et/ou de mats) ;
- 4) T 57-300 (plaques à renfort carbone tissu et nappes préimprégnées, moulées à la presse, au sac, ou à l'autoclave) ;
- 5) NF ISO 9353 (T 57-154) (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par moulage au sac) ;
- 6) ISO 9291 (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par enroulement).

## Chapitre II Etude Expérimentale

### II.6.2 Différentes techniques utilisées

#### II.6.2.1 Essais de traction

Essais de base comme pour les plastiques homogènes, ils permettent de déterminer la loi de comportement contrainte-déformation dans une direction donnée ([15], [16]). Les caractéristiques habituelles que l'on en déduit sont le module d'Young, le coefficient de Poisson, ainsi que la contrainte et l'allongement relatifs aux points singuliers de la loi de comportement (limite de linéarité, coude, charge maximale, rupture, etc.).

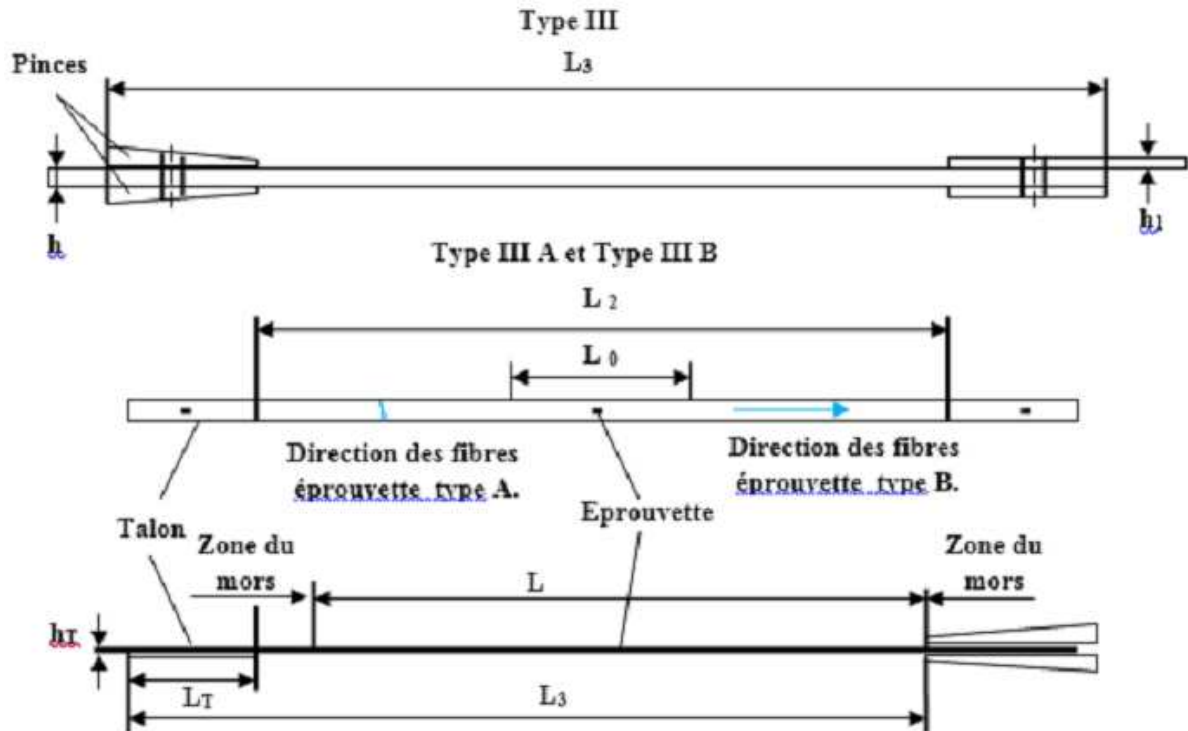
Les différents documents normatifs relatifs aux essais de traction spécifiques aux composites préconisent différentes géométries d'éprouvettes selon le type de composite testé (Tableau. II.1) qui présente les dimensions des différents types d'éprouvettes à la traction :

*Tableau. II.1 Éprouvettes de traction, selon ISO 527-4 et -5*

Dimensions en (mm)	TYPE IB	TYPE II	TYPE III	TYPE IIIA	TYPE IIIB
<b>L<sub>3</sub> : longueur minimale</b>	150	250	250	250	250
<b>L<sub>a</sub> : distance initiale entre mors</b>	115 ± 1	150 ± 1	136	136	136
<b>L<sub>0</sub> : longueur de référence (extensomètre)</b>	50 ± 0,5	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1
<b>L<sub>1</sub> : longueur de partie calibrée</b>	60 ± 0,5	/	/	/	/
<b>L<sub>2</sub> : distance entre talons</b>	/	/	150 ± 1	150 ± 1	150 ± 1
<b>b<sub>2</sub> : largeur aux extrémités</b>	20 ± 0,2	/	/	/	/
<b>b<sub>1</sub> : largeur de la partie calibrée</b>	10 ± 0,2	25 ou 50 ± 0,5	25 ou 50 ± 0,5	15 ± 0,5	25 ± 0,5
<b>h : épaisseur</b>	2 à 10	2 à 10	2 à 10	1 ± 0,2	2 ± 0,2
<b>L<sub>T</sub> : longueur minimale des talons</b>	/	/	50	50	50
<b>h<sub>T</sub> : épaisseur des talons</b>	/	/	1 à 3	0,5 à 2	0,5 à 2
<b>D : diamètre des trous de centrage</b>	/	3 ± 0,25	3 ± 0,25	/	/
<b>R : rayon minimal</b>	60	/	/	/	/



## Chapitre II Etude Expérimentale



*Figure II.3 Géométrie des éprouvettes de traction de type III, selon ISO 527-4 et 5*

Enfin dans le cas particulier des talons biseautés intégrés, les surépaisseurs dans les têtes sont brutes de moulage et obtenues en intercalant des couches de tissus entre deux nappes unidirectionnelles successives (Norme de fabrication NF T 57-151). Cette technique permet d'obtenir une continuité des fibres, même dans les épaulements des éprouvettes, ce qui évite les ruptures par cisaillement dans les têtes.

En conséquence, il est possible de retenir des éprouvettes :

- 1) De type I, en forme d'haltère, pour les matières thermoplastiques renforcées de fibres coupées et certains composites à base de mats ou de tissus très peu résistants ;
- 2) De type II, rectangulaire pour les matières thermodurcies armées avec des mats ou des tissus à faible résistance ;
- 3) De type III, rectangulaire, avec talons rectangulaires pour les matières thermodurcies armées avec des tissus résistants, ou avec des fibres unidirectionnelles continues ;
- 4) De type IV, rectangulaire, avec talons biseautés pour les renforcements à fibres continues unidirectionnelles.

## Chapitre II Etude Expérimentale

---

Les vitesses de déplacement sont faibles, de 1 à 10 mm/min suivant les cas. On utilise le plus souvent des extensomètres à couteau du type inductif, ou des jauges de déformation à 90° pour les mesures de déformation. Les mors utilisés pour le serrage des éprouvettes sont, soit de type hydraulique, soit de type mécanique (autoserrant).

Les mors auto-serrant mécaniques ont l'avantage d'appliquer des efforts de serrage directement proportionnels à l'amplitude de la force de traction : leur fonctionnement est indépendant de l'opérateur. La force de serrage dépend de l'angle des coins de serrage (10° environ).

Il convient enfin de signaler certains essais de traction spécifiques réalisés sur éprouvettes dotées d'un trou. Leur raison d'être est que certaines structures en composites sont assemblées par boulonnage ou rivetage, ce qui engendre des modes de ruine particuliers.

Ainsi la norme ASTM D 5766 et le projet Pr EN 6035 précisent-ils les modalités de détermination de la résistance en traction « trouée ».

### II.6.2.2. Essais de flexion

Les essais de flexion sur composites font l'objet des normes T 57- 105, T 57-302, ASTM D790, JIS K 7074 ou future norme EN ISO 14125. Ces essais sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contrainte simple (ou pur) au sein des matériaux testés : les contraintes de traction sont maximales dans la partie convexe, les contraintes de compression sont maximales dans la partie concave et les contraintes de cisaillement sont maximales sur l'axe neutre de l'éprouvette. De ce fait, en fonction de l'élancement de l'éprouvette (rapport de l'épaisseur sur la distance entre appuis), qui gouverne le rapport contraintes normales (traction/compression) / contraintes de cisaillement, et en fonction des résistances en traction, compression et cisaillement du matériau, l'un ou l'autre des trois modes de rupture peut être obtenu. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois pannes et la flexion quatre pannes.

1) Les essais de flexion trois pannes sont menés dans des conditions précisées figure II.4 et sur des barreaux rectangulaires dont les dimensions préconisées sont données dans le tableau II.2.

## Chapitre II Etude Expérimentale

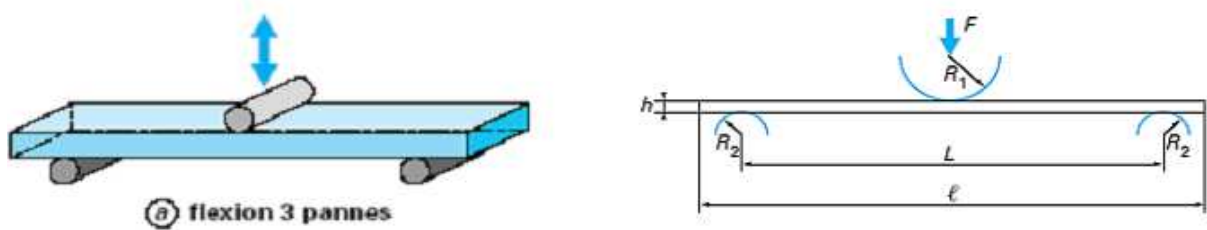


Figure II.4 Essai de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.

Ou :  $h$  : épaisseur de l'éprouvette.

$$R1 = 5 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$R2 = 2 \pm 0,2 \text{ mm, pour } h \leq 3 \text{ mm}$$

$$R2 = 5 \pm 0,2 \text{ mm, pour } h > 3 \text{ mm}$$

Dans ces conditions, la théorie des poutres permet d'exprimer :

- La contrainte normale en flexion ;
- La contrainte de cisaillement interlaminaire maximale ;
- Le module de flexion ;
- La déformation en surface.

Avec :

- $F$  : charge (en newtons) ;
- $L$  : distance entre appuis ;
- $h$  : épaisseur ;
- $b$  : largeur ;
- $W$  : flèche de l'axe neutre.

Le tableau suivant présente les dimensions des éprouvettes à la flexion :

## Chapitre II Etude Expérimentale

*Tableau II.2 Des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125*

Matériau	Longueur(l) (mm)	Distance entre appuis (L) (mm)	Largeur(b) (mm)	Epaisseur(h) (mm)
<b>I.</b> Thermoplastiques renforcés de fibres coupés	80 ± 1	64 ± 1	10 ± 0.5	4 ± 0.2
<b>II.</b> Composites à base de DMC, BMC, SMC, et TRE renforcé de mats, tissus et mixtes.	80 ± 1	64 ± 1	15 ± 0.5	4 ± 0.2
<b>III.</b> Composites UD (90°), Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $5 < E_f/G_{13} \leq 15$	60 ± 1	40 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2
<b>IV.</b> Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $15 < E_f/G_{13} \leq 50$	100 ± 1	80 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2
$E_f$ : module de flexion dans le sens des fibres. $G_{13}$ : module de cisaillement interlaminaire.				

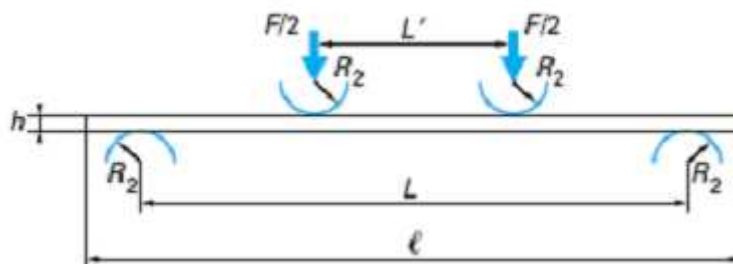
2) Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superposent aux contraintes normales de flexion, on utilise quelquefois la méthode de flexion quatre pannes pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales.

La figure ci-après présente le montage d'essai utilisé, sachant que les diamètres des appuis sont les mêmes que ceux retenus en flexion trois pannes et que la géométrie préconisée par les éprouvettes est précisée sur le tableau. II.3.

3) Comme précédemment pour la flexion trois pannes, la contrainte, le module et la déformation s'expriment par :

$$\sigma_F = \frac{FL}{bh^2} \quad ; \quad E_F = \frac{0,21L^3}{bh^3} \frac{F}{W} \quad ; \quad \varepsilon = 4,7 \frac{Wh}{L^2}$$

## Chapitre II Etude Expérimentale



*Figure II.5 Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.*

Avec les mêmes notations que précédemment. Bien que cet essai semble séduisant a priori, d'autant plus que la charge est répartie en deux points au lieu d'un seul, ce qui réduit les risques de poinçonnage, il présente certains inconvénients :

- Il nécessite d'utiliser un capteur de déplacement pour mesurer la flèche (la mesure du déplacement du plateau mobile de la machine ne convient pas) ;
- Les flèches à la rupture sont très importantes (1 à 2 cm), ce qui nécessite une correction pour le calcul des contraintes ;
- La rupture intervient apparemment dans la zone centrale par délaminage, ce qui semble contradictoire puisqu'il n'y a pas d'effort tranchant ; en fait, ce type de rupture, qui apparaît surtout pour les renforts unidirectionnels, est dû à un flambement des fibres dans la partie comprimée.

Que ce soit en flexion trois pannes ou quatre pannes, lorsqu'il n'est pas possible de prélever des éprouvettes aux dimensions préconisées tableau. II.3, on cherchera à respecter pour le moins les contraintes précisées dans le tableau II.4.

*Tableau II.3 Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.*

Classe du matériau	Flexion trois pannes		Flexion quatre pannes	
	L / h	ℓ / h	L / h	ℓ / h
<b>I</b>	16	20	16,5	20
<b>II</b>	16	20	16,5	20
<b>III</b>	20	30	22,5	30
<b>IV</b>	40	50	40,5	50

## Chapitre II Etude Expérimentale

Tableau II.4 Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.

Épaisseur nominale	Classe I	Classe II à IV
$1 < h \leq 3$	25	15
$3 < h \leq 5$	10	15
$5 < h \leq 10$	15	15
$10 < h \leq 20$	20	30
$20 < h \leq 35$	35	50
$35 < h \leq 50$	50	80

### II.7 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, on s'intéresse principalement à l'étude purement expérimentale. Cette étude s'articule sur deux grands axes, premièrement nous allons élaborer les différentes éprouvette du matériau composite à base de résine polyamide et de particule de verre, La deuxième étape consiste a caractérisé le matériau composite par des essais mécaniques en traction et cela dans le cas des éprouvettes avant et après traitement thermique.

#### II.7.1 Eprouvettes de traction

Les particules de verre sont rajoutées à la matrice polyamide (PA66) aux concentrations de 0% (matériau non renforcé) à 50%. Le mélangeage s'est fait à froid dans un mélangeur électrique. Ces mélanges constituent les matières premières dont on va étudier les propriétés mécaniques au travers des éprouvettes qui seront élaborées par injection.



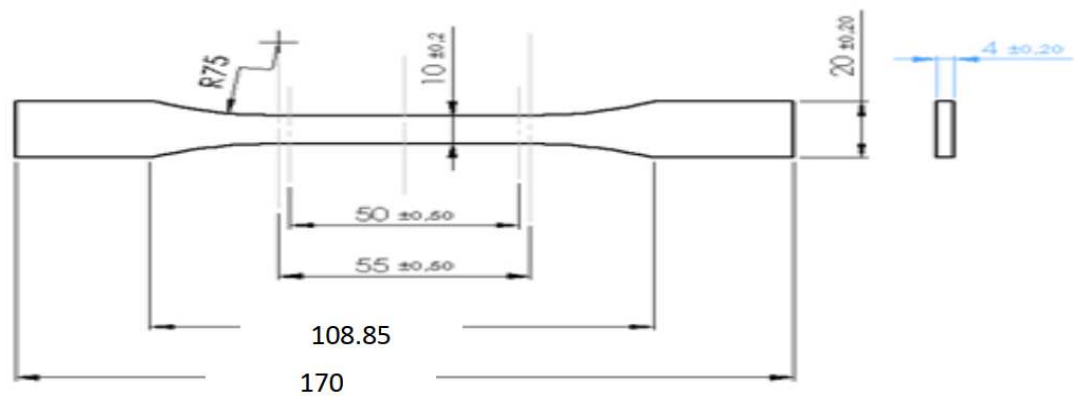
Figure II.6 Matière constituée d'une matrice polyamide renforcé par particules de verre

## Chapitre II Etude Expérimentale

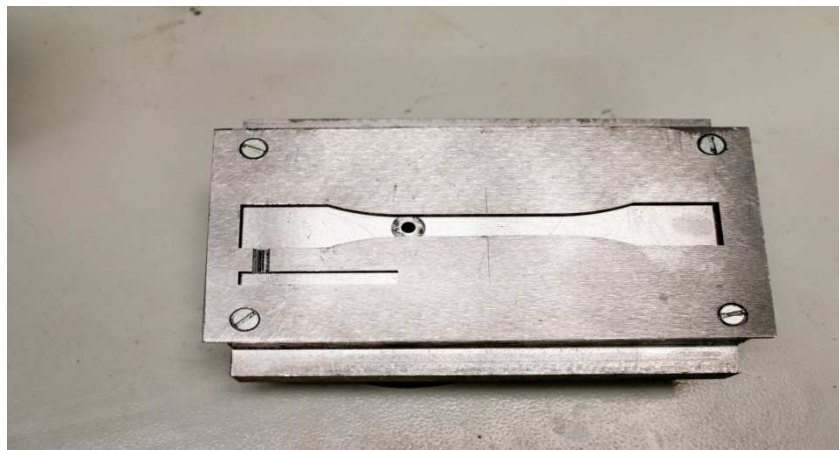


*Figure II.7* Machine d'injection

La géométrie et les dimensions des éprouvettes de traction (Figure II.8) réalisées sont conformes à la norme NF EN ISO 527-2. La vitesse de traction est fixée à 10mm/mn.



*Figure II.8* Géométrie des éprouvettes de traction conforme à la norme NF EN ISO 527-2



*Figure II.9* Moule utilisé pour réaliser les éprouvettes de traction

## Chapitre II Etude Expérimentale

Après l'injection et le démoulage des éprouvettes, un traitement thermique est effectué dans un bain d'eau chaude à une température de 80°C pendant deux heures dans le but d'éliminer les défauts probables présents dans les pièces injectées.



*Figure II.10* Bain du traitement thermique

### II.7.2 Matériels et produits utilisés

Les essais mécaniques de traction sur les différentes éprouvettes et pour les différentes fractions volumiques sont effectuées sur des machines de traction pilotée par ordinateur.

### II.7.3 Essai de traction

Nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que la force maximum à la rupture, la déformation maximale à la rupture ( $\epsilon_{\max}$ ), la contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ ) et le module de Young (E) pour les différentes fractions volumiques.

### II.7.4 Résultats de l'essai de traction

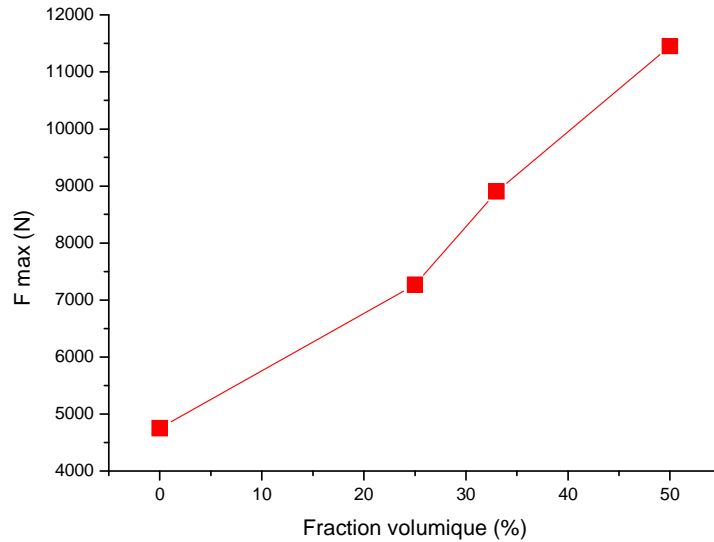
La Figure II.11 représente les éprouvettes utilisées dans cette étude.



*Figure II.11* Eprouvettes utilisées

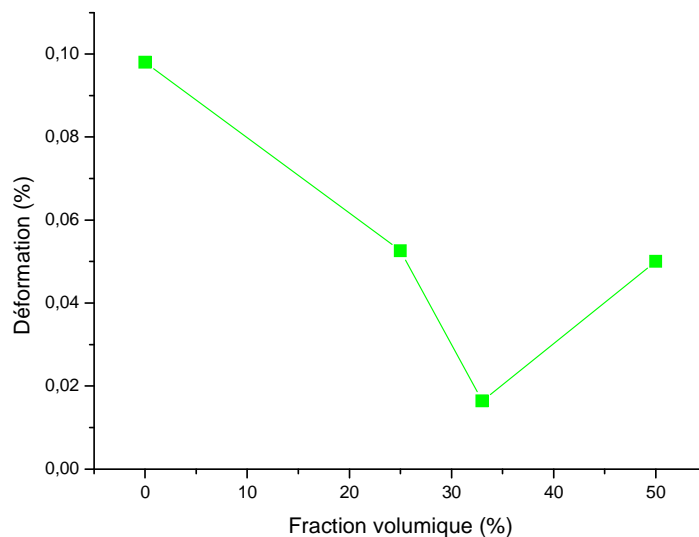
## Chapitre II Etude Expérimentale

### - Dans le cas sans traitement thermique



**Figure II.12** Evolution de la force maximum appliquée en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique

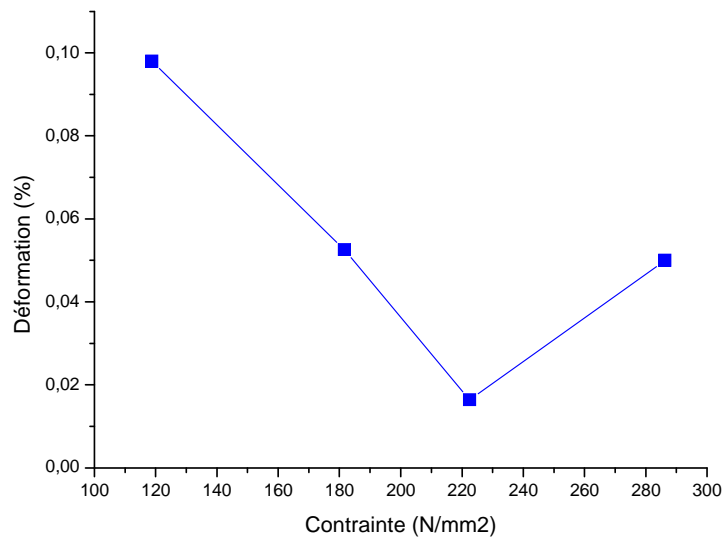
La Figure II.12 représente l'évolution de la force maximum à la rupture en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente ces forces augmentent aussi, d'une valeur  $F = 4750$  N pour  $V_f = 0\%$  jusqu'à une valeur  $F = 11450$  N pour  $V_f = 50\%$ .



**Figure II.13** Evolution de la déformation en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique

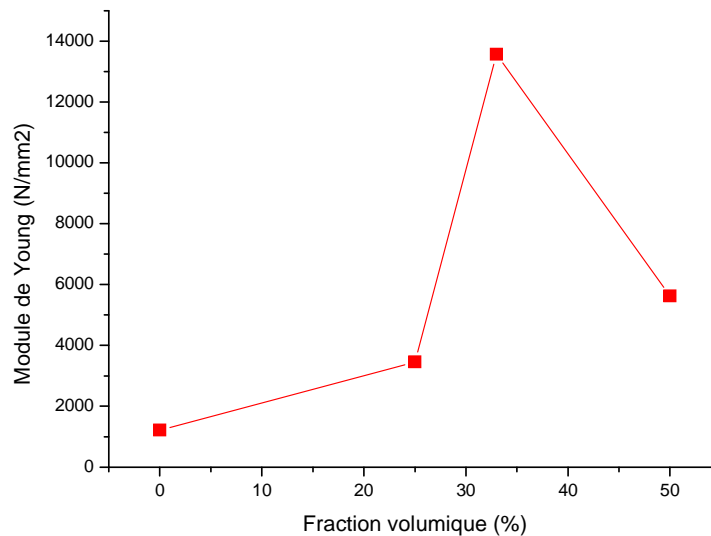
## Chapitre II Etude Expérimentale

La Figure II.13 représente l'évolution de la déformation maximum à la rupture en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente ces déformations diminuent pour  $V_f = 0\%$  jusqu'à une valeur de  $V_f = 33\%$ , puis les valeurs de cette déformation augmentent.



**Figure II.14** Evolution des contraintes en fonction de la déformation pour des fractions volumiques 0, 25, 33 et 50 dans une éprouvette sans traitement thermique

La Figure II.14 représente l'évolution des contraintes maximum à la rupture en fonction de la déformation à la rupture dans une éprouvette sans traitement thermique et pour les différentes fractions volumiques, on remarque que lorsque les contraintes augmentent les déformations diminuent et ce pour les fractions volumiques 0%, 25% et 33%, puis ces contraintes augmentent pour une pour  $V_f = 50\%$ .



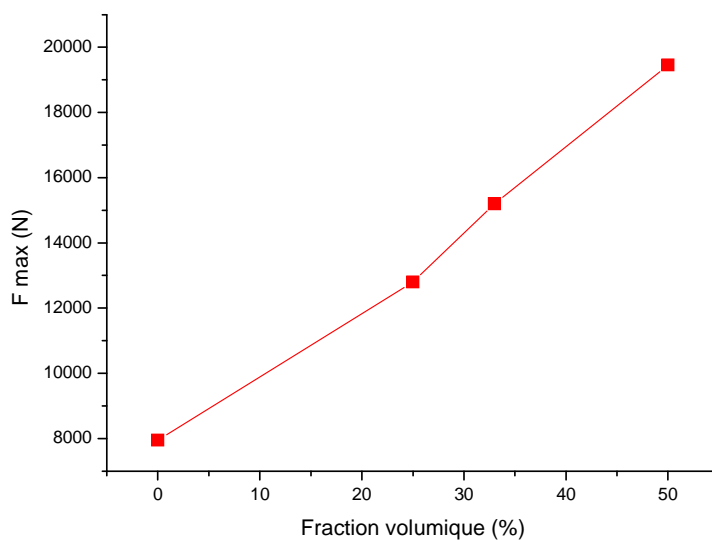
*Figure II.15 Evolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique*

La Figure II.15 représente l'évolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette sans traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente, le module de Young augmente pour  $V_f = 0\%$  jusqu'à une valeur de  $V_f = 33\%$ , puis la valeur de ce module diminue.

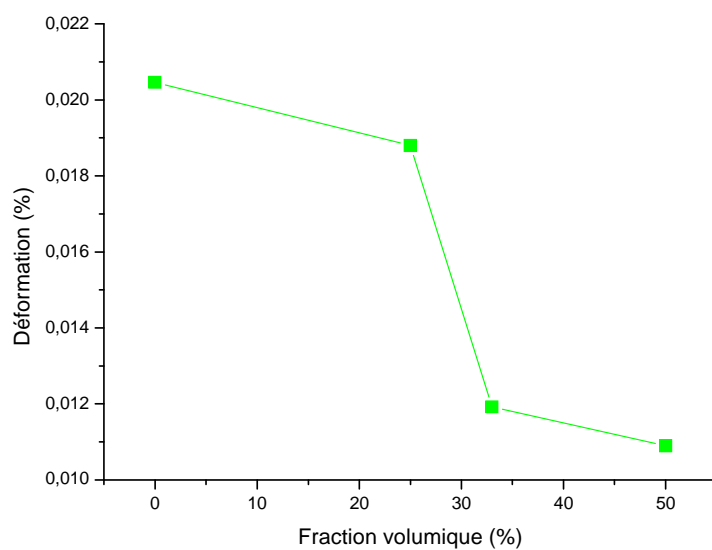
### **- Dans le cas avec traitement thermique**

Le traitement thermique des éprouvettes est réalisé dans un bain d'eau chaude à  $80^\circ\text{C}$ , le principe consiste à émergé les pièces à traitées dans ce bain pour une durée de deux heures maximum dans le but d'éliminé tout défauts présent possibles dans les pièces après injection.

La Figure II.16 représente l'évolution de la force maximum à la rupture en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente ces forces augmentent aussi, d'une valeur  $F = 7950\text{ N}$  pour  $V_f = 0\%$  jusqu'à une valeur  $F = 19450\text{ N}$  pour  $V_f = 50\%$ .

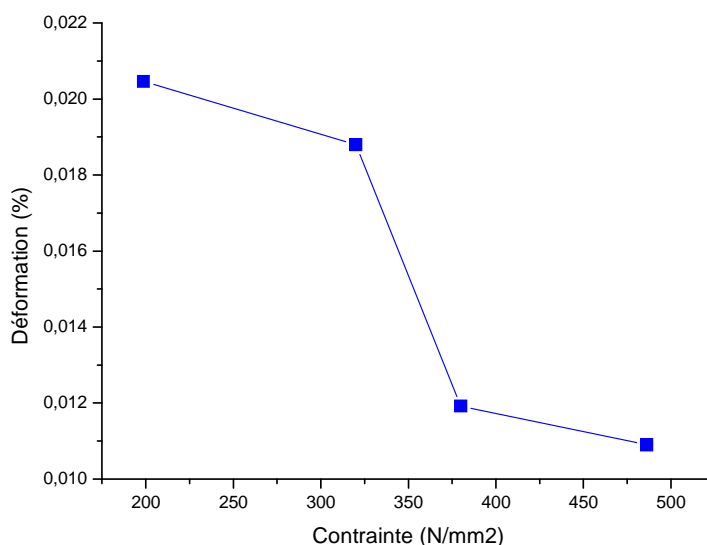


**Figure II.16** Evolution de la force appliquée en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette après traitement thermique



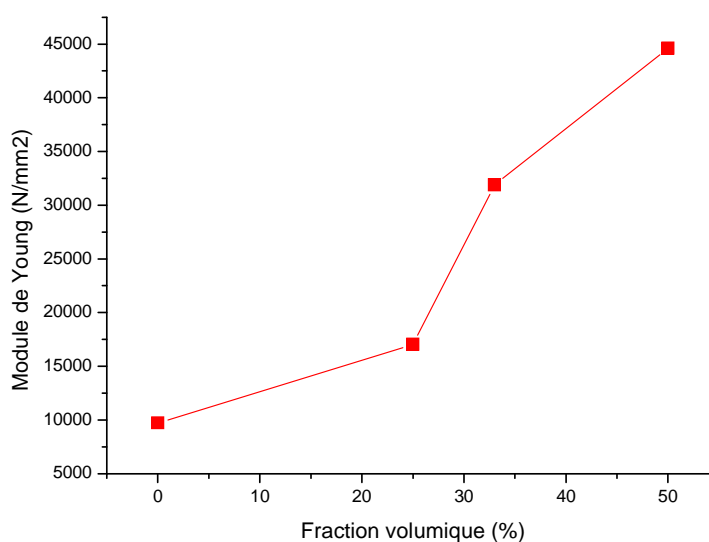
**Figure II.17** Evolution de la déformation en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette après traitement thermique

La Figure II.17 représente l'évolution de la déformation maximum à la rupture en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente ces déformations diminuent.



**Figure II.18** Evolution des contraintes en fonction de la déformation pour des fractions volumiques 0, 25, 33 et 50 dans une éprouvette sans traitement thermique

La Figure II.18 représente l'évolution des contraintes maximum à la rupture en fonction de la déformation à la rupture dans une éprouvette avec traitement thermique et pour les différentes fractions volumiques, on remarque que lorsque les contraintes augmentent les déformations.



**Figure II.19** Evolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette après traitement thermique

La Figure II.19 représente l'évolution du module de Young en fonction de la fraction volumique dans une éprouvette avec traitement thermique, on remarque que lorsque la fraction volumique augmente, le module de Young augmente.

# Chapitre III

## Simulation Numérique

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous travaillons sur un composite à matrice polyamide Les composites à matrice thermoplastique, qui ne peuvent être utilisés que dans les cas où les températures ne dépassant pas 200 à 300°C, le model de composite multi renforts (particules) a été analysée sous une charge de traction.

### III.2 Matériau étudié

Le matériau étudié est un composite constitué de polyamide 66 (PA66) chargé de renforts de verre de type E. Les polyamides sont souvent connus sous le nom de «Nylon» et les chiffres indiquent le nombre d'atomes de carbone dans l'unité de base de la molécule. Le PA66 est le plus répandu, à la fois sous forme de fibres ou sous forme massive. Le PA66 est souvent renforcé par les particules de verre.

#### III.2.1 Les renforts de verre

L'excellent rapport qualité/prix des renforts de verre fait qu'ils sont les plus utilisés actuellement dans les composites à matrice polymère. Le verre est un matériau très fragile du fait de sa forte sensibilité aux microfissures, ce qui lui confère de bonnes performances. D'une manière générale, elles présentent une résistance élevée à la rupture, une masse volumique faible (voisine de 2,5 g/m<sup>3</sup>) et une rigidité relativement plus faible que celles des autres renforts.

Il existe différents types de verres : le verre E, C, D, R ou S, de différentes propriétés dues à la différence de la composition du mélange de préparation [25]. Actuellement, les renforts de verre sont commercialisés avec des diamètres variant entre 4-25 µm [26].

Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux).

- verre E : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- verre D : il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison des ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- verre C : il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.

## Chapitre III Simulation Numérique

- verre R ou S : il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre [27].

Le verre de type E est employé pour les fibres de verre constituant le renfort du matériau composite faisant l'objet de ce travail.

### \* Les propriétés mécaniques

Il est de coutume de donner comme caractéristiques mécaniques de référence les caractéristiques mesurées sur des monofilaments prélevés à la sortie de la filière. Les mesures de la rupture des matériaux composites unidirectionnels donnent accès aux valeurs des contraintes et à celles de l'allongement des fibres à la rupture. Le Tableau III.1 donne les valeurs usuelles de ces grandeurs.

*Tableau III.1 Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D mesurées sur filament vierge [28]*

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre R ou S	Verre D
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2540	2460	2550	2160
Module d'Young (MPa)	72000	71000	86000	55000
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	3100	4500	2500
Allongement à la rupture (%)	4.4	-	5.2	-

Aussi il est intéressant de noter que les renforts de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, avoisinant les 200°C pour les verres R, ce qui explique leur bonne adaptation au renforcement des résines à tenue thermique élevée [25].

### III.2.2 La matrice polyamide

Les polyamides présentent de bonnes propriétés mécaniques. Ils ont également un bon comportement thermique jusqu'à leur température de fusion (respectivement 215 °C et 175°C pour le PA 66 et le PA 12) et une bonne résistance aux hydrocarbures et aux solvants. En revanche, ce sont des composés très sensibles à l'humidité (respectivement 9,5% et 1,4 % de reprise hydrique à 23°C et 50% d'humidité relative pour le PA 66 et le PA 12). L'eau absorbée peut alors provoquer un gonflement [27].

## Chapitre III Simulation Numérique

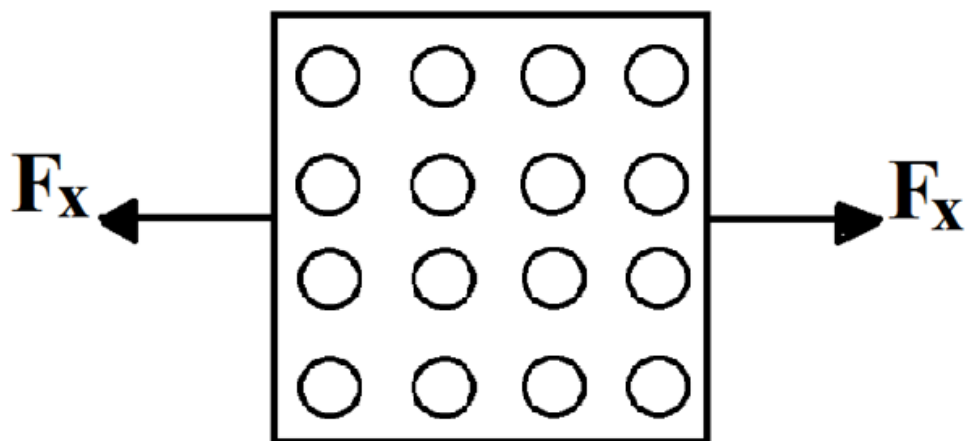
Quelques caractéristiques du PA 66 sont données dans le Tableau III.2 :

**Tableau III.2** Propriétés du PA66 [27].

Propriétés du PA66	
Densité	1.13 – 1.15 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	218 - 220°C
Module élastique	3200 Mpa
Limite d'élasticité	90 Mpa
Déformation à la rupture	23%
Coefficient de dilatation	90x10 <sup>-6</sup> °C
Température de mise en forme	260-325°C

### III.3 Modélisation par élément finis

Le logiciel CASTEM [29] est utilisé dans la simulation par éléments finis. Afin d'étudier le comportement élastique d'un matériau composite sous une charge de traction simple, un modèle constitué de seize particules de forme circulaire et d'une matrice environnante a été considéré comme il est représenté sur la Figure III.1. Le composite est soumis à une contrainte de traction uniforme  $\sigma$ .



**Figure III.1** Modèle par éléments finis pour un composite renforcé par des particules

### III.3.1 Propriété du composite

Chaque élément aura une propriété. Le modèle est petit donc un maillage fin d'éléments a été utilisé [30]. Pour simplifier, on suppose que toutes les particules ont le même rayon  $R_f$  [31].

L'échantillon peut être considéré comme un corps élastique 2D. Les paramètres suivants sont utilisés dans tous les calculs [32]:

1. Particules de verre : module de Young  $E_f = 64 \text{ GPa}$ . Coefficient de Poisson  $\nu_f = 0,2$  et densité  $\rho_f = 2,54 \text{ g / cc}$ .
2. La matrice est en polyamide 66 avec un module de Young  $E_m = 3 \text{ GPa}$ . Coefficient de Poisson  $\nu_m = 0,35$  et densité de  $\rho_m = 1,14 \text{ g / cc}$ .

### III.3.2 Condition aux limites

Les conditions aux limites représentant l'application d'une charge de traction à un composite renforcé par des particules sont : à  $X = 0$  et  $X = l_m$ ,  $U_y = 0$ , la matrice et la particule ont un mouvement nul dans la direction Y (Figure III.1). Ici l'axe X est dans la direction de l'application de la force. Nous avons appliqué une contrainte  $\mathbf{F}_x = 5.65\text{e-}8\text{N}/\mu\text{m}^2$  aux faces d'extrémités de la matrice, soit  $X = 0$  et  $X = l_m$  [33].

### III.4 Résultats et discussion

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de la fraction volumique des particules de verre sur le comportement mécanique d'un composite de matrice polyamide, on a considéré les trois types d'arrangements carré, hexagonale et aléatoire. La matrice est supposée avoir une forme carrée d'une longueur  $l_m = 160 \mu\text{m}$  (Figure III.1).

#### III.4.1 Calcul des diamètres de particules

Pour calculer les diamètres des particules en fonction de la fraction volumique on utilise l'équation (III.1).

$$V_f = \frac{V_{particule}}{V_{total}} = \frac{N_p \left( \frac{\pi d_p^2}{4} \right)}{l_m^2} \quad (\text{III.1})$$

## Chapitre III Simulation Numérique

Où:

$V_p$ : fraction volumique des particules ;

$V_{particle}$ : Volume de particule ;

$V_{total}$ : Volume du composite ;

$N_p$ : Nombre de Particules ;

$d_p$ : Diamètre de particule ;

$l_m$ : Longueur de la matrice.

$$d_p = \sqrt{\frac{4V_f l_m^2}{N_p \pi}} \quad (\text{III.2})$$

En utilisant l'équation (III.2), en calcule le diamètre de particule, les résultats sont résumés dans le tableau III.3.

**Tableau III.3** Diamètre des particules en fonction de  $V_f$

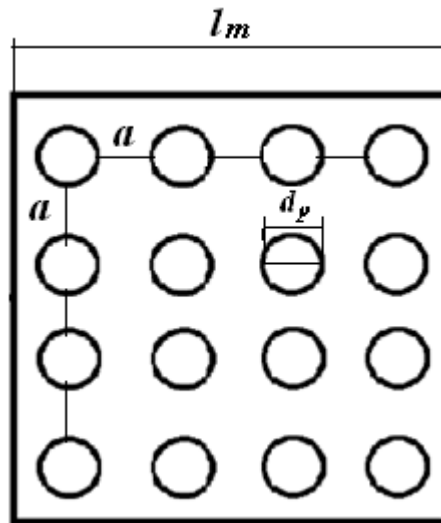
$V_f$ (%)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	10.10	14.27	17.48	20.19	22.57	25.47
$r_p$ ( $\mu\text{m}$ )	5.05	7.14	8.74	10.10	11.28	12.73

### III.4.2 Distance 'a' entre les particules

#### III.4.2.1 Arrangement carré

Dans le cas d'arrangement carré (Figure III.2), la distribution des particules est uniforme, ce qui nous a conduits à calculer la distance 'a' entre les particules par l'équation III.3 :

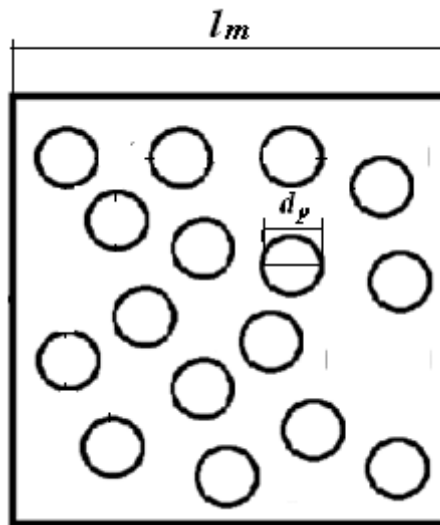
$$a = \frac{l_m - (4d_p)}{4} \quad (\text{III.3})$$



*Figure III.2* Distance entre particule (arrangement Carré)

### III.4.2.2 Arrangement aléatoire

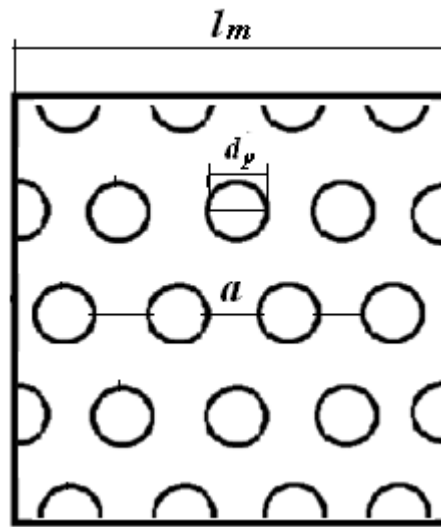
Dans ce type d'arrangement (Figure III.3), la distance entre les particules est prise au hasard (sans calcul).



*Figure III.3* Distance entre particule (arrangement Aléatoire)

### III.4.2.3 Arrangement hexagonale

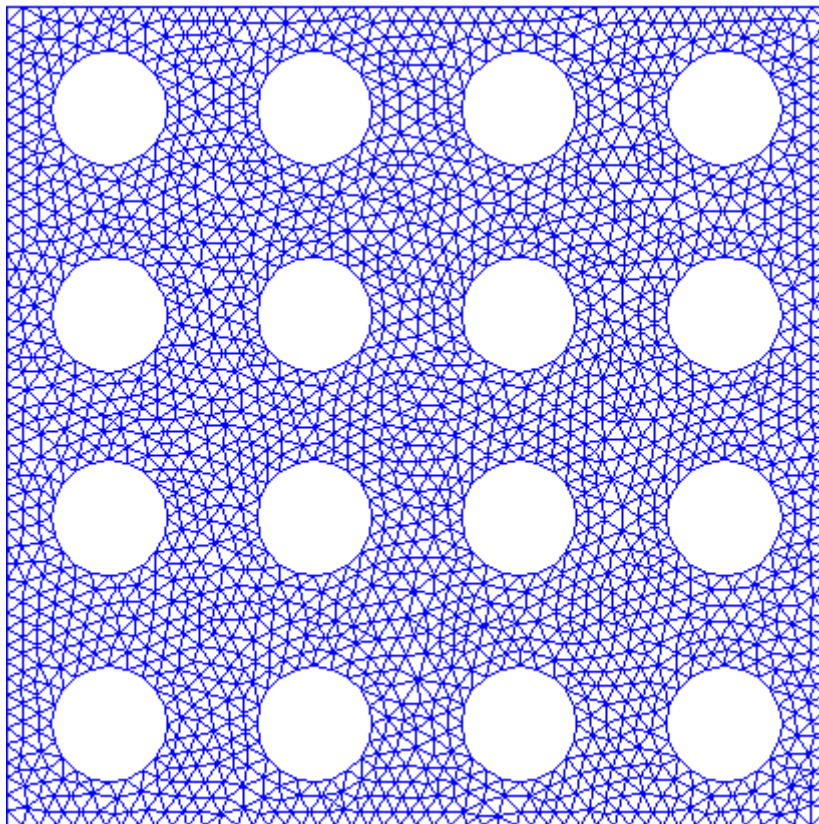
Dans le troisième est dernier cas d'arrangement (hexagonal) (Figure III.4), la distribution des particules est uniforme, ce qui nous conduit à utiliser la même équation III.3 utilisée précédemment dans le cas d'arrangement carré.



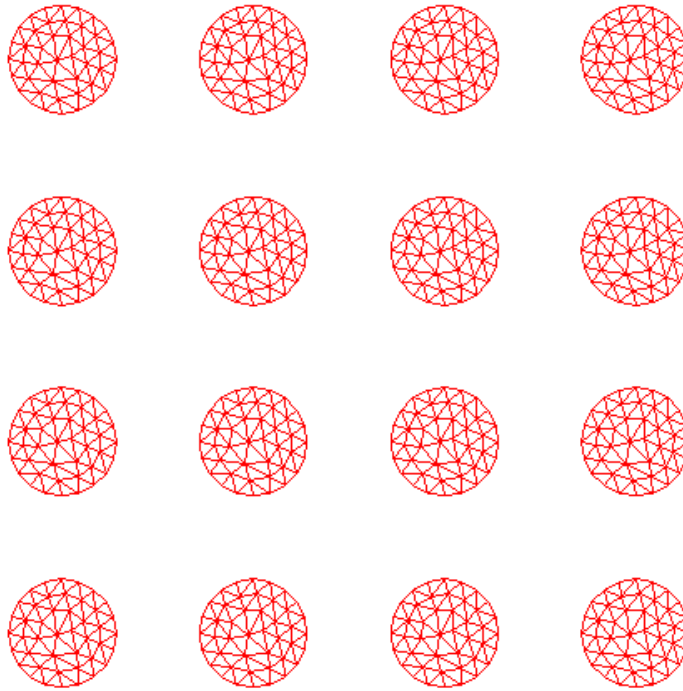
*Figure III.4* Distance entre particule (arrangement Hexagonale)

### III.4.3 Simulation numérique

#### III.4.3.1 Arrangement carré

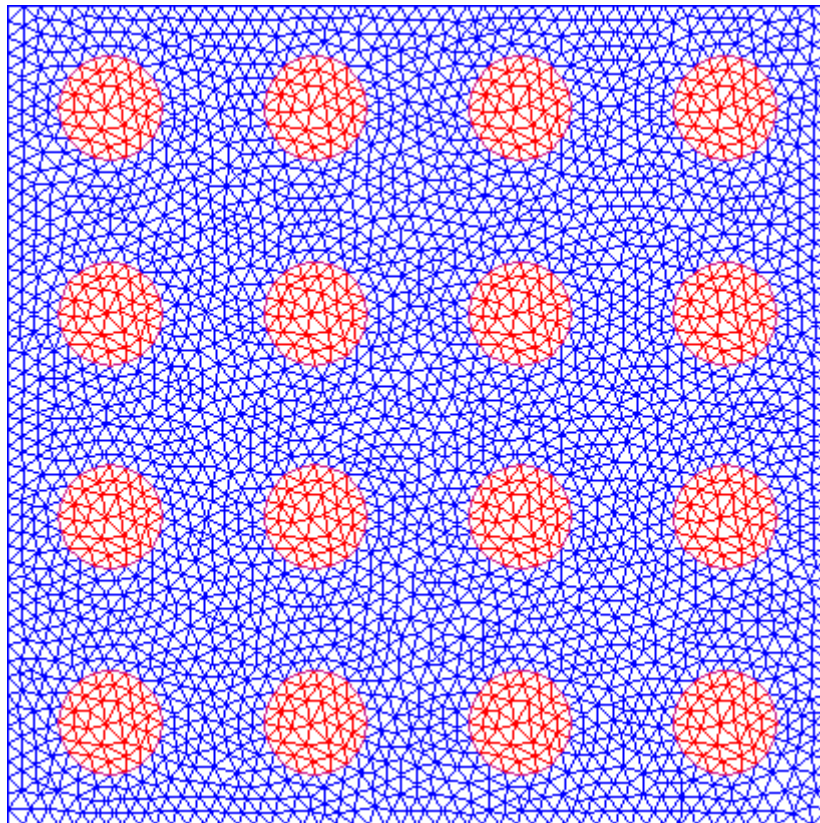


*Figure III.5* Maillage de la matrice

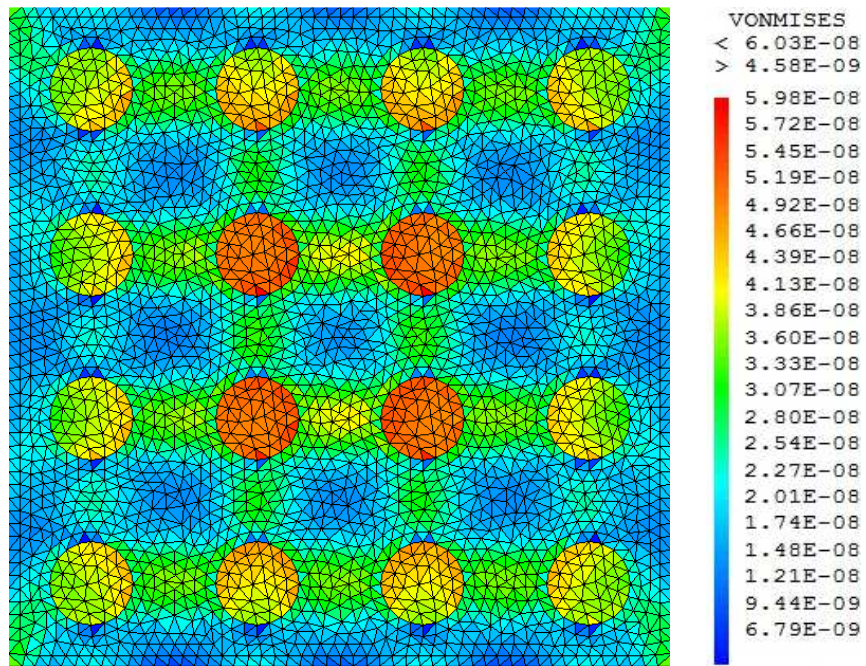


*Figure III.6* Maillage des renforts

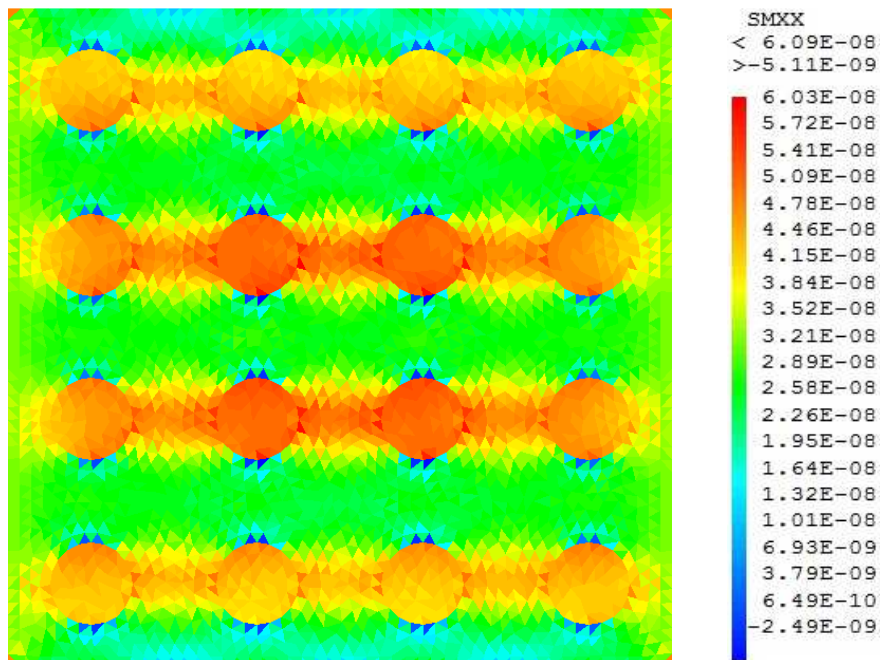
La Figure III.7 présente le maillage triangulaire du composite dans l'arrangement carré.



*Figure III.7* Maillage du composite



**Figure III.8** Distribution des contraintes Von Mises pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour  $V_f=20\%$  (Arrangement carré).



**Figure III.9** Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour  $V_f=20\%$  (Arrangement carré).

## III.4.3.2 Arrangement aléatoire

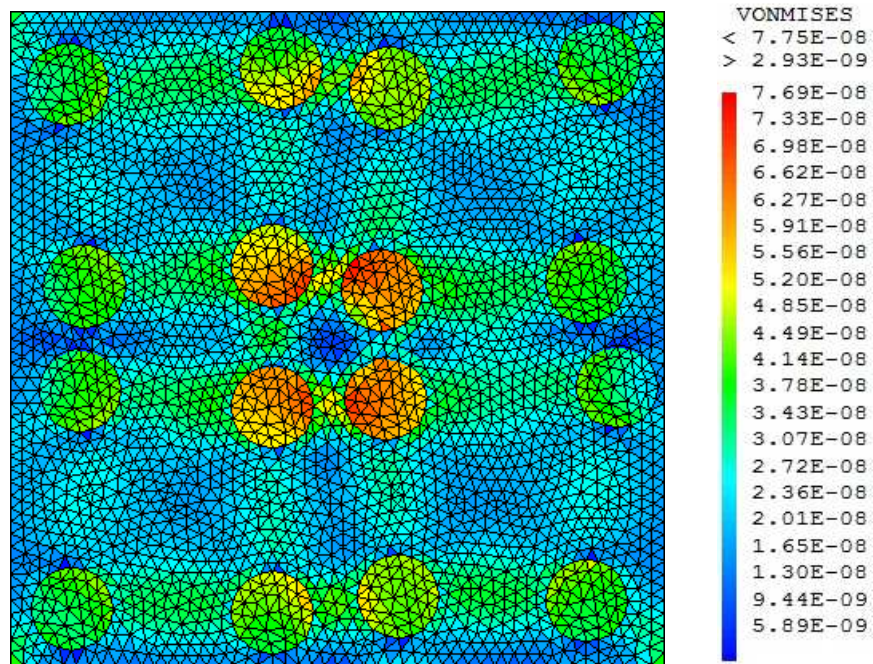


Figure III.10 Distribution des contraintes Von Mises pour seize particules ( $N/\mu m^2$ )

pour  $V_f=20\%$  (Arrangement aléatoire).

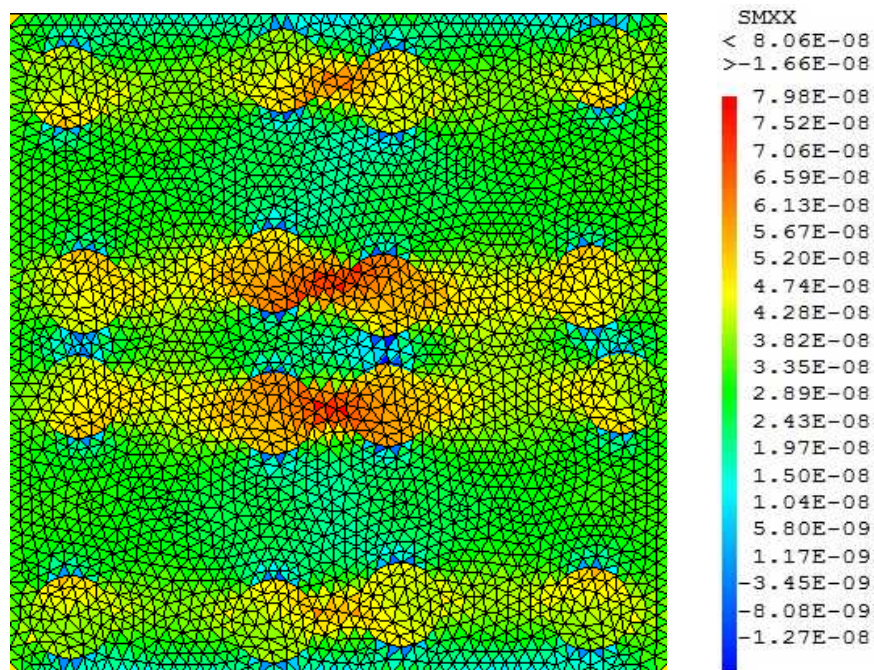
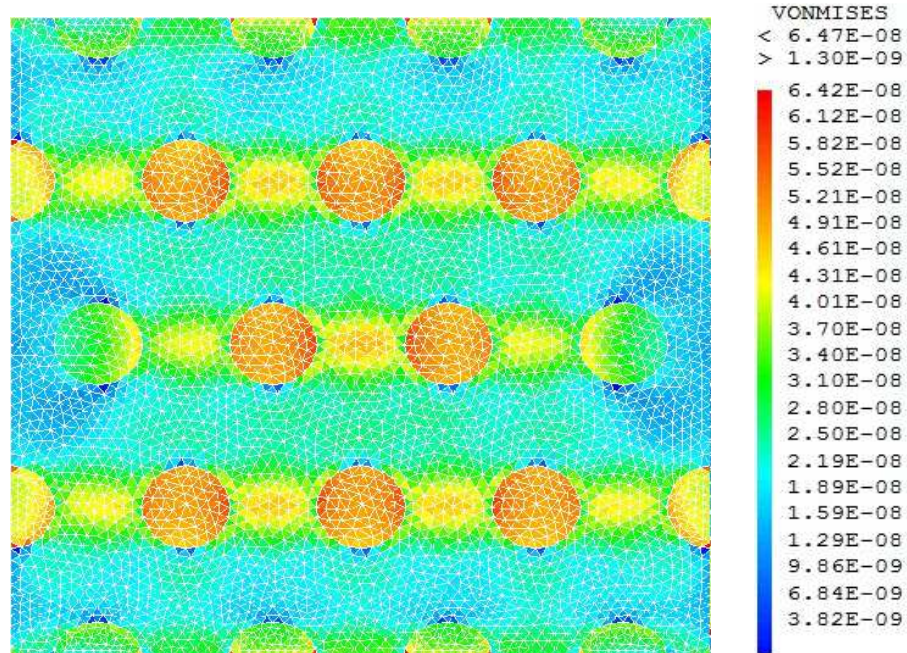


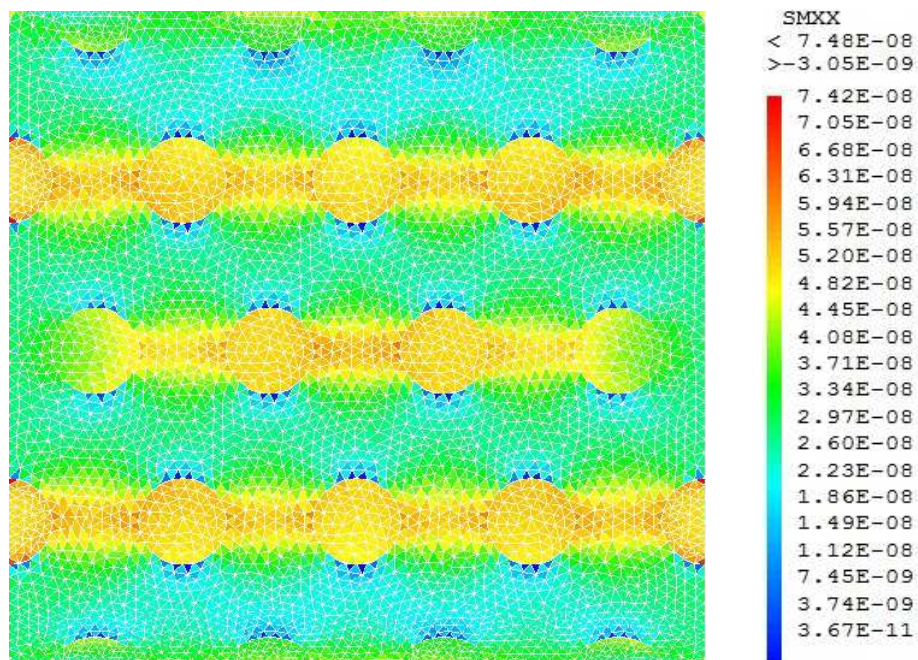
Figure III.11 Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ )

pour  $V_f=20\%$  (Arrangement aléatoire).

## III.4.3.3 Arrangement hexagonale



**Figure III.12** Distribution des contraintes Von Mises pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour  $V_f=20\%$  (Arrangement hexagonale).



**Figure III.13** Distribution des contraintes longitudinales pour seize particules ( $N/\mu m^2$ ) pour  $V_f=20\%$  (Arrangement hexagonale).

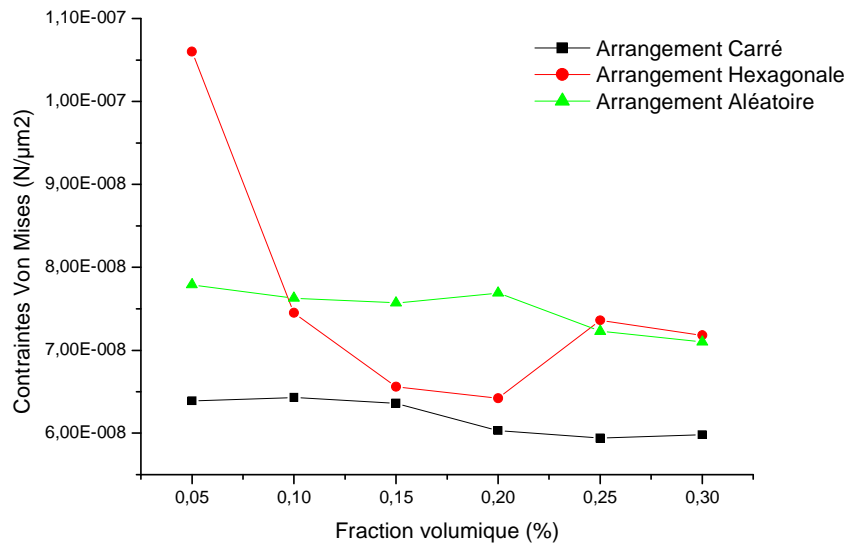


Figure III.14 Evolution des contraintes Von Mises en fonction de la fraction volumique.

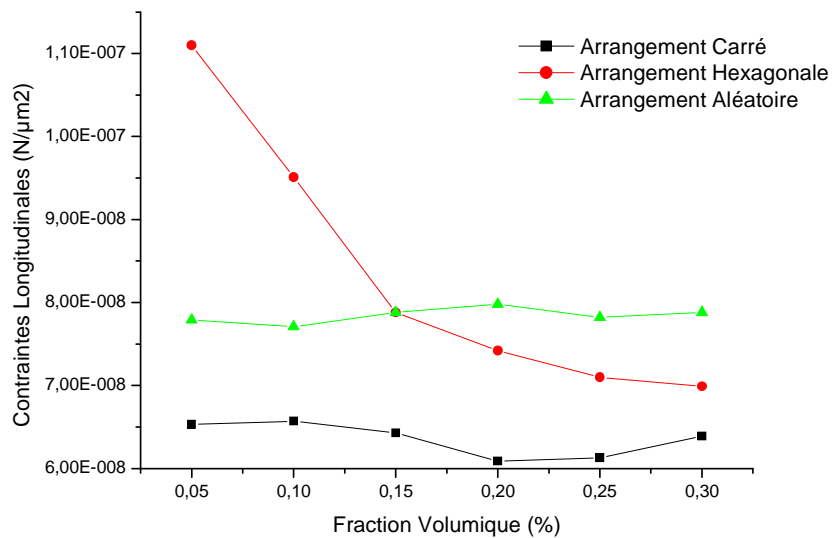


Figure III.15 Evolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique.

## Remarque

Les figures Figure III.6, Figure II.8 et Figure III.10 représentent la distribution des contraintes de Von Mises dans un composite renforcé par seize particule et pour une fraction volumique  $V_f = 20\%$  pour les arrangements carré, aléatoire et hexagonale respectivement, on remarque que les contraintes maximales sont concentrées dans les particules de verre avec une valeur supérieure dans celles qui se

## Chapitre III Simulation Numérique

---

situent au milieu du composite. On remarque aussi la présence de contrainte élevée dans la matrice thermoplastique entre ces particules.

La Figure III.14 représente l'évolution des contraintes Von Mises en fonction de la fraction volumique. On remarque que lorsque la fraction volumique augmente les contraintes diminuent pour les trois arrangements (carré, hexagonale et aléatoire). Pour la Figure III.15, lorsque la fraction volumique augmente les contraintes longitudinales diminuent aussi pour les trois arrangements.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Les composites renforcés par des particules ont été développés en grande partie pour combler l'écart de propriété entre les stratifiés (des fibres continues) utilisées comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses. À certains égards, les particules couplent les avantages de chacun de ces matériaux. Ainsi, la particule a trouvée sa place dans les structures légèrement chargés, dans lequel la rigidité domine la conception, mais dans lequel il doit être également une augmentation notable de la force sur le matériau non renforcé. Étant donné que les particules et la matrice ont souvent des modules d'élasticité très différents, la contrainte dans chaque élément doit être différente, en fait, la contrainte est plus élevée dans le matériau présentant le module d'élasticité le plus élevé (généralement le renfort). Le module d'élasticité du verre est beaucoup plus grand que celui de la matrice thermoplastique. Les composites thermoplastiques renforcés par des particules gagnent de la place dans le monde de l'industrie.

Cette étude concerne l'étude de l'effet de la fraction volumique des particules de verre sur le comportement mécanique d'un matériau composite à matrice polyamide 66. On a constaté dans cette étude expérimentalement et par une simulation numérique que la fraction volumique des particules joue un rôle important dans le comportement du composite ; l'augmentation de  $V_f$  conduit à la diminution des contraintes de Von Mises et des contraintes longitudinales, cela est juste dans le cas des éprouvettes traitées et non traitées et pour les trois types d'arrangements. Les composites renforcés par particules ne cesse d'évolué dans l'industrie a cause de leurs facilités de mise en forme et les faibles couts, ce qui a conduit aux nouveaux composites qui sont les nanocomposites.

Enfin, pour compléter ce travail on propose d'étudier le comportement de ce composite dans le cas de la rupture d'une ou plusieurs particules, et aussi pour des particules de forme différentes (autre que la forme circulaire).

# Références Bibliographique

## *Références Bibliographiques*

- [1] J. L. Kardos, «Critical issues in achieving desirable mechanical properties for short Fiber composites», Pure & App. Chem, Vol. 57, No. 1 1, pp. 1651—1657, 1985.
- [2] Jean-Marie Berthelot matériaux composites-comportement mécanique et analyse des structures ; 5 édition, lavoisier, Paris, 2012.
- [3] Jean Marie. Berthelot, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures », édition TEC et DOC, 1999.
- [4] Bernadette Bensaude-Vincent et Pierre Laszlo, Éloge du mixte: « Matériaux nouveaux et philosophie ancienne, Hachette Littératures », mars 1998, 223 p.
- [5] Mustapha MALHA, “Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum”, Thèse de docteur de UNIVERSITÉ MOHAMMED V – AGDAL, 2013.
- [6] Jean-Marie Berthelot, « Mécanique des Matériaux et Structures Composites », Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise France, Septembre 2013.
- [7] Wladimir Andreff, « Le muscle et la machine: le dialogue entre le sport et l'innovation », Culture technique, 1985, p90
- [8] Laurent Gornet, «*Généralités sur les Matériaux Composites*», (2011).
- [9] Nadia Behlouli, « les matériaux composites », cours des matériaux composites, Université de Strasbourg.
- [10] Joel Cugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [11] CARMA « Glossaire des matériaux composites », Actualisation, octobre 2006.
- [12] J.F. Agassant, J.M. Haudin, « Mise en forme des polymères thermoplastiques », in M. Carrega (éditeur), Les référentiels Dunod, Pratique des matériaux industriels, sous-chapitre 2.3.2, Dunod, Paris (1991).
- [13] G. Coroller et al, « Contribution à l'étude des propriétés d'un composite PP/lin mis en œuvre par extrusion », JNC 17 - Poitiers 2011.

- [14] J. M. BERTHELOT. Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures. 4ème édition. Paris : TEC & DOC - Lavoisier, 2005, pagination multiple.
- [15] Florian Gehring, « Etude du comportement mécanique et de l'endommagement de composites thermoplastiques renforcés de fibres courtes de chanvre : Approche expérimentale et modélisation ». Pour l'obtention de grade de docteur a l'université de Lorraine 2013.
- [16] Ciambella, J., Stanier, D. C., & Rahatekar, S. S. (2017). "Magnetic alignment of short carbon fibres in curing composites". *Composites Part B: Engineering*, 109, 129-137.
- [17] J. L. Kardos, "Critical issues in achieving desirable mechanical properties for short fiber composites", *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 57, No. 11, pp. 1651—1657, 1985.
- [18] Shao-Yun Fu & Bernd Lauke, "effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers", *Composites Science and Technology* 56 (1996) 1179-1190.
- [19] Anh Dung NGÔ, « Matériaux composites », SYS-857 , 2013.
- [20] Béatrice LARGE-TOUMI, « Etude du comportement en fatigue de composites carbone/époxy : rôle de l'interface ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 1994.
- [21] Ourahma Ali, « Etude de comportement en fatigue de composites à fibres de verres discontinus Renforçant une matrice en polypropylène ». Thèse doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2004.
- [22] P. KRAWCZAK et J. PABIOT, "La mesure des porosités dans les composites industriels et leur incidence sur les propriétés mécaniques". *Composites*, N° 3, p 291- 295, Centre de Promotion des Composites, Paris (F), 1999.
- [23] A. Thionnet, « Prévision d' endommagement sous chargements quasi-statiques et cycliques des structures composites stratifiées », Thèse de doctorat, Paris VI, 1991.
- [24] M. Hildebrand, « Amélioration de la résistance des stratifiés pour bateaux », Technical Research Centre of Finland, Ship Laboratory, colloques sur La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1992.
- [25] Hanane NECHAD, « Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante », Thèse doctorat a l'Ecole doctorale : Matériaux de Lyon, 2004.
- [26] F. T. Wallenberger, *Fiberglass and Glass Technology, Energy-Friendly Compositions and Applications*, XV, 474p, Hardcover, (2010).

[27] Cédric THOMAS, « Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV », Thèse doctorat à l'École nationale supérieure des mines de Paris. 2011.

[28] E. Guth, “*Theory of Filler Reinforcement*,” Journal of Applied Physics, 1945, Vol. 16, No. 1, pp. 21-25. <https://doi.org/10.1063/1.1707495>

[29] Castem, <http://www-cast3m.cea.fr>

[30] S. Houshyar, R and al.. “Modelling of polypropylene fibre-matrix composites using finite element analysis”, eXPRESS *Polymer Letters* Vol.3, No.1, 2–12. 2009.

[31] H.F. Lei, Z.Q and Zhang, B. Liu. (2012). “Effect of fiber arrangement on mechanical properties of short fiber reinforced composites”, *Elsevier Composites Science and Technology*, 72, 506–514. 2012.

[32] John F. O’Gara and al. “*predicting the tensile strength of short glass fiber reinforced injection molded plastics*”, Delphi Research Labs. 2010.

[33] Prince and al. (2012). Analysis of Failure Phenomena in Multi- Fiber polymer composite material at varying volume fraction using Finite Element Modeling, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, pp.287-291; Mar-Apr 2012.

---

## RESUME

Dans ce mémoire, l'effet de la fraction volumique des particules de verre sur le comportement mécanique du composite à matrice polyamide 66 a été étudié. Les petites particules adhèrent fortement au polymère, ce qui conduit à un fort effet de renforcement. Lorsque la surface totale de contact augmentait, davantage de charges étaient transférées aux particules de renforcement. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique d'un composite à matrice thermoplastique, renforcés par des particules de verre, sous chargement de traction unidirectionnelle expérimentalement (à l'Entreprise de la Construction Mécanique Khenchela) et par la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus présentés pour une variété de fraction volumique des particules et pour les trois arrangements (Carré, hexagonale et aléatoire). Ces résultats montrent que lorsque le  $V_f$  augmente, les contraintes de Von Mises diminuent.

**Mots-clés :** Particules de verre, Polyamide66, Composite, fraction volumique, Chargement en traction, Simulation numérique, Expérimentale.

---

## ABSTRACT.

In this thesis, the effect of the volume fraction of the glass particles on the mechanical behavior of the composite with a polyamide 66 matrix was studied. The small particles adhere strongly to the polymer, which leads to a strong reinforcing effect. As the total contact area increased, more charges were transferred to the reinforcing particles. The objective of this work is to study the mechanical behavior of a composite with a thermoplastic matrix, reinforced by glass particles, under unidirectional tensile loading experimentally (at the Mechanical Construction Company Khenchela) and by the method of Finite elements. The results obtained presented for a variety of volume fraction of the particles and for the three arrangements (Square, hexagonal and random). These results show that when the  $V_f$  increases, the Von Mises stresses decrease.

**Keywords:** Glass Particles, Nylon66, Composite, Volume fraction, Tensile Loading, Finite Element, experimental.

---

## ملخص

في هذه الأطروحة، تمت دراسة تأثير النسبة الحجمية لجزيئات الزجاج على السلوك الميكانيكي للمادة المركب مع مصفوفة بوليأמיד 66. تلتصق الجزيئات الصغيرة بقوة بالبوليمر، مما يؤدي إلى تأثير تقوية عالي. مع زيادة مساحة التلامس الإجمالية، يتم نقل المزيد من القوى إلى جزيئات التسليح. الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الميكانيكي لمركب مع مصفوفة لدائن حرارية، معززة بجزيئات زجاجية، تحت تحميل شد أحادي الاتجاه تجريبياً (في شركة الإنشاءات الميكانيكية خنشلة) وطريقة العناصر المنتهية. النتائج التي تم الحصول عليها قدمت لمجموعة متنوعة من النسب الحجمية للجسيمات وللترتيبات الثلاثة (مربعة، سداسية وعشوائية). تظهر هذه النتائج أنه عندما يزيد  $V_f$ ، تقل اجهادات Von Mises.

كلمات المفتاحية: الجسيمات، مادة البوليأמיד 66، المركب، النسبة الحجمية، تحميل الشد، العناصر المحدودة، دراسة تطبيقية.