

---

**Université ABBES LAGHROUR Khenchela**



جامعة عباس لغرور خنشلة  
Faculté de Sciences et Technologie  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Département de Génie Mécanique  
قسم الهندسة الميكانيكية



# Mémoire

de fin d'études Pour l'obtention du diplôme  
de **MASTER (LMD)**

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Génie des Matériaux**

## Thème

---

Etude du comportement mécanique d'un  
polyamide 66 (PA 66) renforcé par des fibres  
de verre courte

---

Réalisé par :

— RAZAMI Issam

Dirigé par : Mr. SID Noureddine

Membres de jury:

-Mr: HANNACHI Bouzid

-Mr : MANSOURI Khalifa

---

**Année universitaire : 2018-2019**

---

# REMERCIEMENTS

C'est un grand plaisir d'exprimer ma gratitude à mon encadreur, Mr **SID NOUREDDINE** de m'avoir fait confiance de mener à terme cette recherche sous sa direction. C'est grâce à lui, que j'ai pu, en effet, découvrir le monde de la recherche et vivre cette expérience très riche sur le plan scientifique et humain. Je suis très reconnaissant de sa méthode attentive et de ses qualités qui m'ont été d'un grand soutien ;

Aux membres de jury qui ont accepté de faire partie de ce jury de soutenance

J'adresse aussi toute ma gratitude au chef département de GM pour son aide et ses conseils judicieux ;

A tous les enseignants du département de sciences techniques.

Mes remerciements et ma grande gratitude s'adressent particulièrement à **ABBOUDI ABDELAZIZ** Doyen de la faculté de technologie et de sciences.

A tous les professeurs et cadres qui ont contribué à notre formation de près au de loin ;

A tout membres du battement 2 injection plastique ainsi que mes amis du laboratoire 13 sans oublier le directeur de l'unité dans laquelle je travaille Mr : **belhadj hssan**

Sans oublier mes amis et collègues de la promotion 2018/.2019

# *Dédicace*

Je dédis se travail :

**A**

*Mes très chers parents en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur sacrifice, compréhension et pour leur aide morale et financière, tout ce que je leur dois. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*Ma femme Ma mère MES chère sœurs et frères Toute ma famille, mes oncles*

*Tous mes amis sont au travail dans ECMK*

*Tous les étudiants de science et technique et ma promotion et tous qui m'aiment.*

*REZAMI ISSAM*

# SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

## Chapitre I

### Généralité sur matériaux composite

I.1 Définition.....02

I.2 Constituants des matériaux composites .....02

I.2.1 La matrice .....02

I.2.2 Renfort .....04

I.2.3 Les charges et les additifs .....10

I.3 Caractéristiques générales.....10

I.4 Classification des matériaux composites .....11

I.5 Avantages et inconvénients.....12

I.6 Mise en œuvre et architecture des matériaux composites .....12

I.6.1 Moulage sous vide .....12

I.6.2- Moulage par projection de résine.....13

I.6.3Moulage par injection basse pression de résine (RTM) :.....14

I.6.4 Moulage à froid .....14

I.6.5 Moulage par injection de compound BMC :.....15

I.6.6 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC .....15

## Chapitre II comportement effectif des matériaux composites

II.1 L'orientation des fibres .....17

II.1.1 Orientation d'une fibre en écoulement élongationnel.....17

II.1.2 Interface fibre/matrice.....18

II.2 Prédiction des propriétés effectives des matériaux composites à fibres aléatoires.....18

II.2.1 Les modèles semi-empiriques.....	18
II.2.2 Modèles d'homogénéisation.....	20
II.2.3 La méthode de l'inclusion équivalente selon Eshelby.....	20
II.3 Fractions volumiques .....	22
II.4 Fractions massiques.....	22
II.5 Relations entre fractions volumiques et massiques.....	22
II.6 Le Volume Élémentaire Représentatif VER.....	23
II.7 Conditions aux limites sur le VER.....	24

### **Chapitre III Etude expérimentale**

III.1 Conditions expérimentales.....	27
III.1.1 Présentation du matériau et des éprouvettes.....	27
III.1.2 Préparation des éprouvettes .....	29
III.1.3 Eprouvettes .....	30
III.1.4 dimension de Eprouvette utilisée.....	31
III.1.5 Injection des éprouvettes .....	31
III.2 Dispositif expérimental et éprouvette .....	34
III.3 Relation entre fraction massique et fraction volumique.....	34
III.4 Dispositions physiques de l'essai de traction.....	35
III.5 Vitesses d'essai.....	36
III.6 Résultats et discussion .....	37
III.6.1 Calcul de l'allongement pour éprouvette 1 renforcée avec 50-60% de fraction volumique .....	41
III.6.2 Calcul de l'allongement pour éprouvette 2 renforcée avec 50-60% de fraction volumique .....	41
III.6.3 Calcul de l'allongement pour éprouvette 3 renforcée avec 50-60% de fraction volumique .....	42
III.6.4 Calcul des contrainte et déformation pour éprouvette renforcée avec 50-60% de fraction volumique.....	43

III.6.3 Calcul des contraintes maximal par apport à la fraction volumique des déférentes éprouvettes (0% - 25 - 30% - 50 60%).....	44
Conclusion Générale .....	46
Liste des références.....	47

# Listes des figures :

## Chapitre I Généralité sur matériaux composite

Figure I.1 : matériaux composites .....	03
Figure I.2: Différentes familles de matrices .....	03
Figure I.3: Principaux matériaux de renfort .....	05
Figure.I.4 : Les structures géométriques des composites .....	08
Figure.I.5 : Exemples de renforts en verre RTP .....	09
Figure I-6 : Principe de moulage par infusion.....	13
Figure I-7 : Principe de moulage par injection de résine .....	14
Figure I.8 : principe de moulage par injection de résine.....	14
Figure I.9 : : principe de moulage par compression.....	15
Figure I.10 : principe de moulage par compression.....	16

## Chapitre II Comportement effectif des matériaux composites

Figure II.1 Mouvement d'une fibre dans un écoulement élongationnel.....	17
Figure II.2: Opération de déformation d'Eshelby.....	21
Figure II.3 Milieu hétérogène (a). Et milieu macroscopiquement (b) relies V.E.R.....	24

## Chapitre III Etude expérimentale

Figure III.1. Granulés de PA66 renforcé par fibres de verre.....	29
Figure III.2 dimension d'éprouvette normalisé .....	30
Figure III.3 dimension de Eprouvette utilisée.....	31
Figure III.4 Processus de moulage par injection.....	32
Figure III.5 machine de moulage par injection.....	33
FigureIII.6 Éprouvettes de traction .....	33
Figure III.7 conversion entre fraction massique et fraction volumique de Pa6/verre.....	36
Figure III.8 Machine de traction utilisée.....	36
Figure III.9 Eprouvette utilisée après essai de traction.....	37
Figure III.10 montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (0%).....	38
Figure III.11 les Eprouvette utilisée après essai de traction.....	38
Figure III.12 montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (25-30%) .....	39
Figure III.13 les Eprouvette utilisée après essai de traction.....	49
Figure III.14montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (50-60%).....	40

Figure III.15 les Eprouvette utilisée après essai de traction.....	40
Figure III.16les Eprouvette renforcée avec 50-60% de fraction volumique.....	41
Figure III.17 Courbe allongement pour 50-60% de fraction volumique.....	42
Figure III.18 Courbe allongement pour 50-60% de fraction volumique.....	43
Figure III.19 Courbe allongement pour 50-60% de fraction volumique.....	43
Figure III.20 courbe constraints $\sigma$ en fonction déformation $\varepsilon$ pour 50-60% de fraction volumique.....	44
Figure III.21 Courbe $\sigma$ max en fonction des fractions volumiques.....	44

## Chapitre I : Généralité sur matériaux composite

Tableau I.1: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques .....	04
Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre .....	06
Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.....	07

## Chapitre III Etude expérimentale

Tableau III.1 Propriétés du PA66.....	28
Tableau III.2 donne quelques propriétés de la fibre de verre de type E.....	28
Tableau III.3 dimension des éprouvettes normalisé.....	31
Tableau III.4 les propriétés mécaniques des constituants.....	34
Tableau III.5 tolérance sur les vitesses normalisées.....	36
Tableau III.6 les Force maximales moyen Vf 0%.....	38
Tableau III.7 les Force maximales moyen Vf 25-30%.....	39
Tableau III.8 les Force maximales moyen Vf 50-60%.....	40
Tableau III.9 Valeurs d'allongements $\Delta L$ en fonction des forces F.....	41
Tableau III.10 Valeurs d'allongements $\Delta L$ en fonction des forces F.....	41
Tableau III.11 Valeurs d'allongements $\Delta L$ en fonction des forces F.....	42
Tableau III.12 Valeurs des contraintes $\sigma$ et déformations $\epsilon$ .....	43
Tableau III.13 Valeurs des contraintes $\sigma$ max en fonction des fractions volumiques .....	44

# *Introduction générale*

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. 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, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre courte utilisés dans l'industrie. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Cette étude expérimentale présente, l'étude du comportement mécanique d'un polyamide 66 (PA66) renforcé par des fibres de verre courtes fréquemment utilisées dans l'industrie automobile. Afin d'étudier l'influence de la teneur de la quantité de fibres de verre introduite dans la matrice, une série d'essais de traction a été réalisée sur du polyamide renforcé ou non avec des fibres de verre courtes à différents fractions volumiques : 0 %, 25-30 % et 50-60 %.

Le mémoire est subdivisé en trois chapitres encadrés par cette introduction et la conclusion générale :

- Le premier chapitre est destiné à la découverte et à la présentation des matériaux composites.
- Le second chapitre présente une étude théorique du comportement effectif des matériaux composites à fibres courte aléatoires.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale.

# Chapitre I

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter une revue bibliographique sur les matériaux composites et leur mise en œuvre et architecture des matériaux composites.

### I.1 Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice.

La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. [1]

### I.2 Constituants des matériaux composites

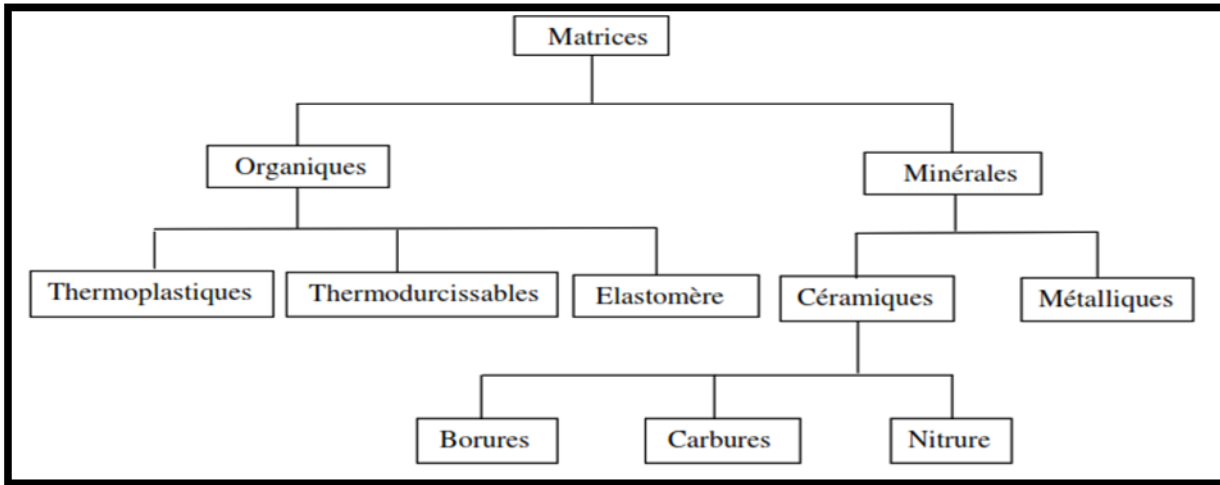
Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.
- D'une interface.

#### I.2.1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :



**Figure (I.2)** Différentes familles de matrices. [04]

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

#### a/ Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. [04]

#### b/ Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (Force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement. [05]

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau (I.1) :

**Tableau (I.1)** Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques. [04]

<i>Matrices</i>	<i>Thermoplastiques</i>	<i>Thermodurcissables</i>
<i>Etat de base</i>	<i>Solide prêt à l'emploi</i>	<i>Liquide visqueux à polymériser</i>
<i>Stockage matière de base</i>	<i>illimité</i>	<i>Réduit</i>
<i>Mouillabilité des renforts</i>	<i>difficile</i>	<i>Aisée</i>
<i>Moulage</i>	<i>Chauffage</i> <i>refroidissement</i>	<i>+</i> <i>Chauffage continu</i>

<i>Cycle</i>	<i>long</i>	<i>Court</i>
<i>Tenue au choc</i>	<i>Assez bonne</i>	<i>Limitée</i>
<i>Tenue thermique</i>	<i>réduite</i>	<i>Meilleure</i>
<i>Chute et déchets</i>	<i>recyclables</i>	<i>Perdus</i>

### c/ Les matrices naturelles

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et microorganismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose la lignine. [06]

### d/ Résines époxydes

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). [07]

## I.2.2 Renfort

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

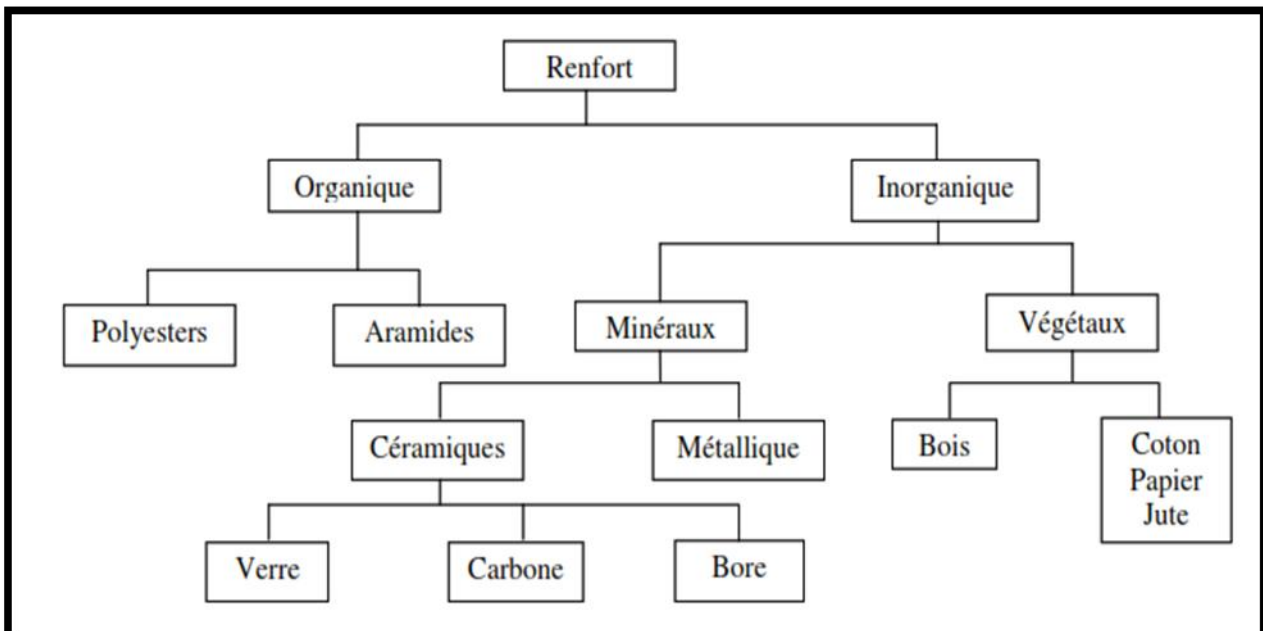


Figure (I.3) Principaux matériaux de renfort. [08]

### a/ Fibres de verre

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

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

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau (I.2).

**Tableau (I.2)** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre. [9]

<i>Caractéristiques</i>	<i>Type E</i>	<i>Type D</i>	<i>Type C</i>	<i>Type R</i>	<i>Type S</i>
<i>Résistance en traction</i> <i>(MPa)</i>	3500	2450	2800	4650	4650
<i>Module en traction</i> <i>(GPa)</i>	73,5	52,2	70	86,5	86,5
<i>Allongement à la</i> <i>rupture (%)</i>	4,5	4,5	4	5,3	5,3

**Les avantages :**

- Bonne résistance thermique et électrique.
- Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité.
- Bonne compatibilité avec les matrices organiques.

-Faible coût.

### ***Les inconvénients***

-Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique.

-Tenue au choc médiocre. [10]

### **b/ Fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont pour la plupart obtenues à partir d'une fibre précurseur de type poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent une étape d'oxydation pour faire réticuler le PAN et le rendre ainsi moins « fusible » en vue des traitements thermiques ultérieurs.

Elles sont ensuite soumises à une seconde étape, qui peut être une carbonisation à 1500°C ou à une graphitisation à 3000°C. Pendant cette étape, les fibres sont maintenues sous tension afin de conserver l'orientation de la structure moléculaire.

Dans le premier cas, on obtient des fibres haute résistances ou HR, et dans le deuxième cas, on obtient des fibres haut module ou HM Tableau (I.3). Il existe également des fibres de module intermédiaire, appelée inter médiate modules ou IM. Elles peuvent ensuite passer dans un électrolyte ou subir une oxydation pour créer des groupements polaires, destinés à favoriser l'enzymage. Il existe différents traitements de surface pour les fibres de carbone.

**Tableau (I.3) Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone. [11]**

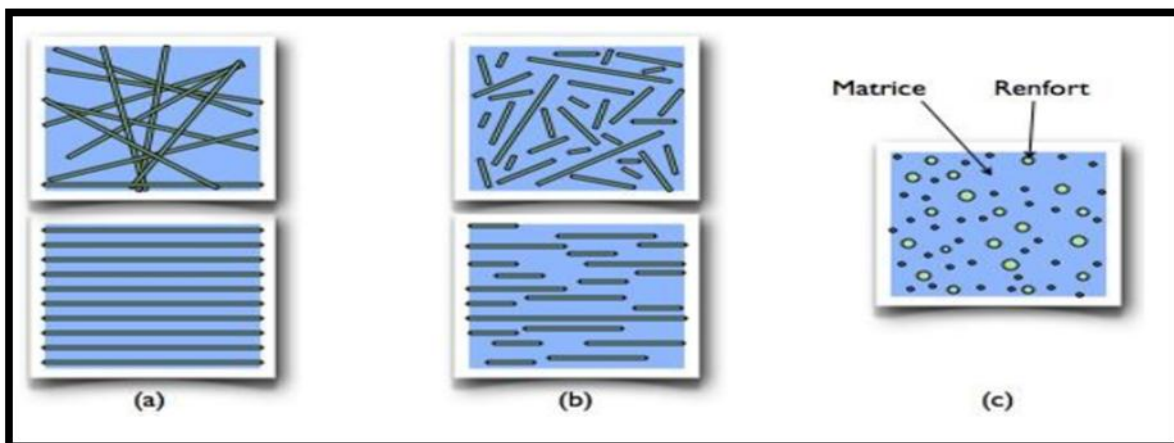
<i>Caractéristique</i>	<i>Fibres HR</i>	<i>Fibres HM</i>	<i>Fibres IM</i>
<i>Résistance en traction (MPa)</i>	<i>3400-4500</i>	<i>2000-2500</i>	<i>4800</i>
<i>Module en traction (GPa)</i>	<i>230-250</i>	<i>390-450</i>	<i>296</i>
<i>Allongement à la rupture (%)</i>	<i>1.4-1.8</i>	<i>0.5-0.6</i>	<i>2</i>
<i>Résistance en compression(MPa)</i>	<i>2200-2800</i>	<i>1300-1700</i>	<i>–</i>

Les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 à 24000 filaments, de fibres coupées, de rubans ou bien encore de tissus, qu'ils soient uni ou multidirectionnels. Elles présentent des caractéristiques spécifiques élevées comme leur haut module en traction. Elles ont également un coefficient de dilatation très faible, une conductivité thermique élevée. En revanche, certains inconvénients demeurent comme leur résistance limitée aux chocs, une faible résistance à l'abrasion.

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues, c'est-à-dire de longueur comparable aux dimensions de la pièce, Voir figure (I.4) (a).
- Les fibres courtes, c'est-à-dire de longueur faible devant les dimensions de la pièce, voir figure (I.4) (b).
- Les particules, ou charges renforçant figure (I.4) (c).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées "en vrac", aléatoirement.



**Figure (I.4)** Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

### c/ Renforts et propriétés mécaniques

Les renforts sont généralement conçus de sorte à avoir des propriétés mécaniques (notamment la résistance et la rigidité) optimales. Ceci passe naturellement par le choix d'un matériau adéquat, mais pas seulement : dans le cas des composites modernes, le caractère particulaire ou filamentaire des renforts fait qu'il est généralement possible de les fabriquer avec très peu de défauts, alors qu'une pièce massive du même matériau en contiendrait beaucoup plus, ce qui nuirait à sa résistance mécanique (c'est pourquoi le verre, peu résistant sous forme massive, peut être employé comme renfort lorsqu'il est sous forme de fibres).

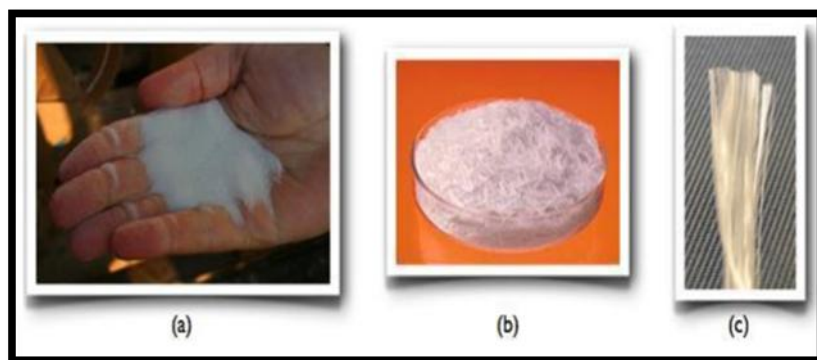
Sauf cas particuliers, les renforts sont donc beaucoup plus rigides et plus résistants que la matrice (souvent d'un facteur 10, voire 100 ou plus). Par conséquent, les propriétés mécaniques du composite dépendent fortement de la forme et de l'orientation des renforts :

- Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules, du moins dans les directions renforcées par les fibres.

- Les composites à fibres parallèles présentent un comportement mécanique anisotrope, tandis que les composites à fibres orientées aléatoirement ou à particules présentent un comportement à peu près isotrope.

Ainsi, pour des applications structurelles, c'est-à-dire des pièces devant résister à des efforts importants, on utilise généralement des fibres longues, dont on adapte l'orientation aux sollicitations subies par la pièce, et les composites ainsi conçus ont généralement des comportements anisotropes. En revanche, pour des applications non structurelles, on utilise généralement des fibres courtes ou des particules, dont le coût de mise en œuvre est moins élevé. Cette distinction vaut aussi bien pour les composites modernes que pour les "multi- matériaux" traditionnels. Par exemple :

- Le verre, associé à des matrices de résine, est utilisé sous forme de microbilles figure (I.5) (a) ou de fibres courtes figure (I.5) (b) pour réaliser des plastiques renforcés ou des isolants thermiques. Sous forme de fibres longues figure (I.5) (c), il peut servir à des applications structurelles comme les coques des bateaux ;



**Figure (I.5)** Exemples de renforts en verre : (a) microbilles creuses, (b) fibres courtes (image de RTP Compagnie), (c) fibres longues.

### I.2.3 Les charges et les additifs

#### a/ les charges

*Charges renforçâtes* : L'objet de l'incorporation de charges renforçâtes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en : [1]

- Charges sphériques

- Charges non sphériques
- Charges non renforcées :

Les charges non renforcées 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 :

- Charges de faible coût.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques

## **b/ Les additifs**

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme : [1]

Lubrifiants et agents de démoulage,

- Pigments et colorants,
- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets

## **I.3 Caractéristiques générales**

Un matériau composite consiste dans le cas le plus générale d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice.

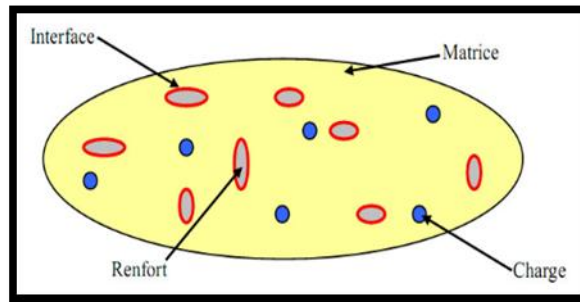
La phase discontinues appelée le renfort ou matériau renforçant Figure (I.1). Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomère, pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pas pratiquement pas modifiées par injection de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

-des propriétés des matériaux constituants.

-de leur distribution géométrique.

-de leurs interactions, etc.



**Figure (I.1)** Matériaux *composites*. [1]

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

Selon la nature de la matrice, on distingue trois grandes classes de composites, considérées ici par ordre croissant de tenue en température :

- Les composites à matrice polymère (CMP)
- Les composites à matrice métallique (CMM)
- Les composites à matrice céramique (CMC)

Les matériaux utilisés comme renforts présentent de bonnes propriétés mécaniques intrinsèques (carbone, alumine, silice, bore, kevlar. Acier, nitrure et carbure de silicium...). Les renforts continus ou fibres longues procède un diamètre qui varie selon leur nature, entre quelques micromètres et une centaine de micromètres. Selon l'application envisagée, l'assemblage de ces fibres longues peut être unidimensionnel (plis unidirectionnels). Bidimensionnel (plis tissés, mats à fibres coupées de quelques centimètres ou à fibres continues) ou tridimensionnel (tissus multidimensionnels). Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, sont employées dans les produits de grande diffusion, et possède une grande importance. Les fibres de carbone et de kevlar sont utilisées dans pour des applications plus spécifiques de hautes performances telles que l'aéronautique et l'aérospatiale.

D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère ...) et des charges (fibres broyées, écailles, poudres...). L'utilisation des (CMP) reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C. [3]

#### **I.5 Avantages et inconvénients**

L'allègement des véhicules : un gain de masse de 1 kilogramme induit un gain final de 1,5 kilogramme, du fait de l'allègement consécutif des organes mécaniques. La réduction des couts : par réduction du nombre de pièces nécessaires à la réalisation d'un élément, et par réduction de l'isolation aux bruits. La résistance à la corrosion des pièces composites. ne peut signaler comme inconvénients notables.

La difficulté, en fabrication de grande série, d'obtenir des états de surface aussi bons que ceux des tôles métalliques peintes.

Pour la carrosserie, le passage dans le circuit de peinture des tôles s'effectue à température élevée, de même que les traitements de surfaces préalables.

## I.6 Mise en œuvre et architecture des matériaux composites

### I.6.1 Moulage sous vide

*Principe* : 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. [12]

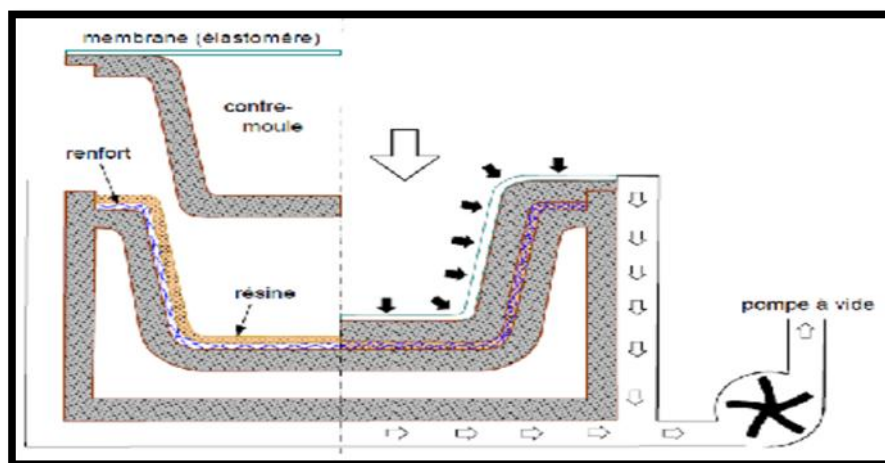


Figure (I.6) Principe de moulage par infusion. [2]

#### a/ Avantage

- Taux de renfort pouvant atteindre 65 %.

- Bon compactage des tissus
- Bonne imprégnation

#### b/ Inconvénients

- Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres
- Matériel non réutilisable

### I.6.2 Moulage par projection de résine

*Principe* : 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.

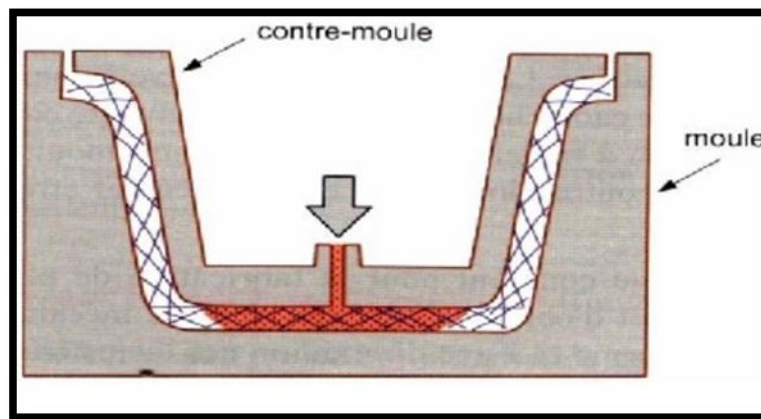


Figure (I-7) : Principe de moulage par injection de résine [1].

### I.6.3 Moulage par injection basse pression de résine (RTM)

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est mis en place dans le moule, ensuite, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. La pression de moulage est faible et le procédé convient pour des cadences jusqu'à 30 pièces par jour.

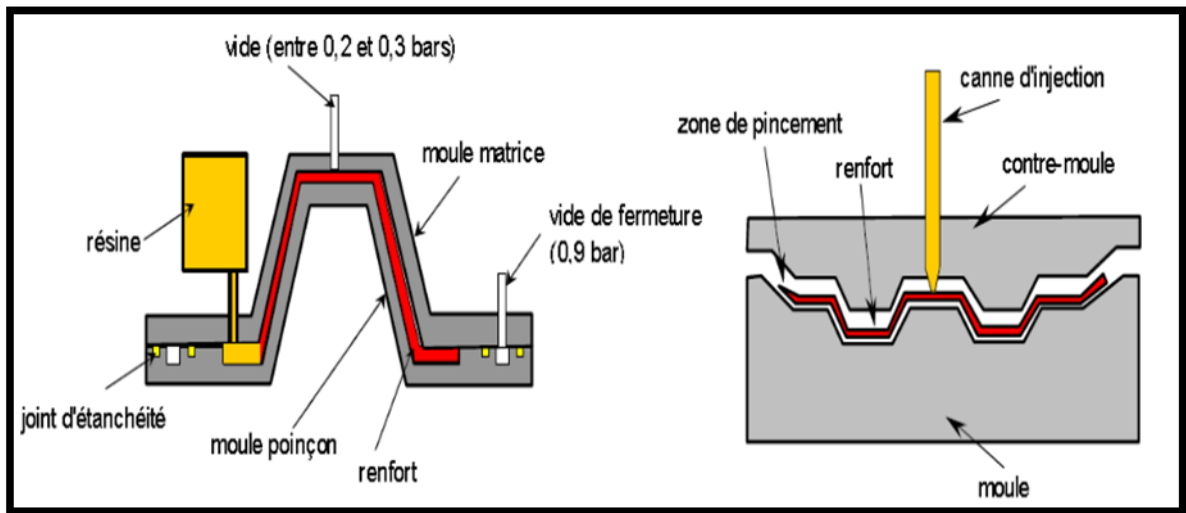


Figure (I.8) principe de moulage par injection de résine.

#### I.6.4 Moulage à froid

C'est un moulage dans lequel on se sert d'une presse à compression entre moule est contre moule rigides initialement sans apport thermique extérieur. Le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule, la résine dotée d'un système catalytique très réactif, est tout de suite versée en vrac. La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule.

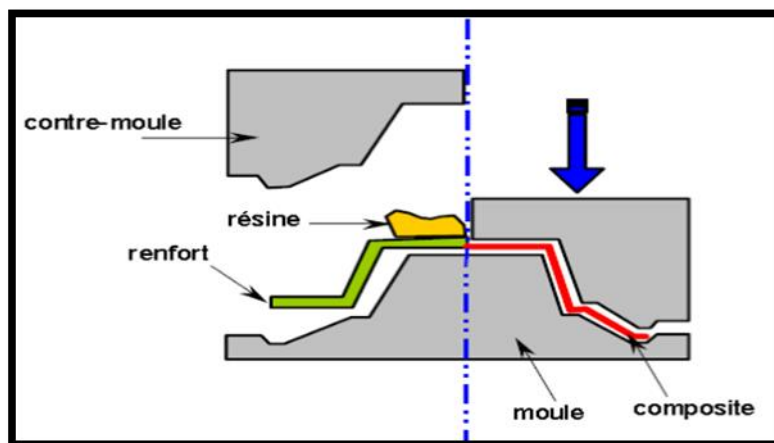


Figure (I.9) principe de moulage par compression.

#### I.6.5 Moulage par injection de compound BMC

Le compound (Bulk Molding Compound), est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcé par des fils de verre coupés. Cette masse est préparée dans un

malaxeur. Le moulage se fait à chaud (130-150 °C) par injection (principalement) entre moule et contre moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l’empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide. On utilise ce type de moulage pour une production en grandes séries, et pour des pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses.

### I.6.6 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC

Le mat pré imprégné (Sheet Molding Compound) est une nappe de fils coupés ou continus, imprégné par un mélange de résine polyester, de charges et d’adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat pré imprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre moule en acier usiné.

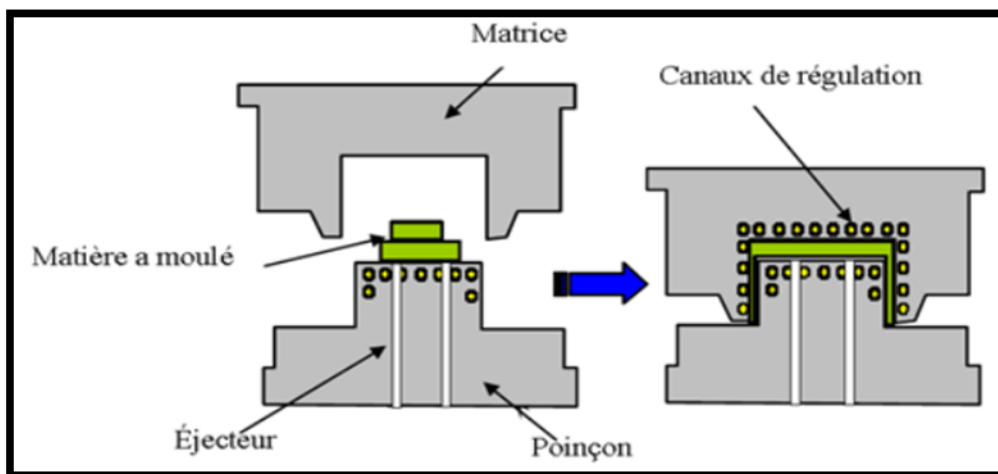


Figure (I.10) principe de moulage par compression.

# Chapitre II

## Introduction

L'objectif de ce chapitre c'est de présenter les modèles semi-empiriques et les différentes méthodes approchées d'homogénéisation qui fournissent des expressions analytiques du comportement effectif des matériaux composites à fibres aléatoires.

### II.1 Orientation des fibres

L'orientation des fibres dans un composite joue un rôle important dans les propriétés mécaniques. En effet, une orientation privilégiée a tendance à fragiliser le composite dans le sens transverse de cette orientation. Les composites à fibres discontinues sont peu orientés. Cependant, lors de la mise en œuvre des composites par injection et extrusion, des directions d'écoulement de matières privilégiées peuvent apparaître menant à un alignement des fibres. Les propriétés mécaniques sont bien évidemment très supérieures dans le sens du renfort, comme dans le cas des matériaux fortement orientés tels que les composites unidirectionnels.

Ce caractère anisotrope est pris en compte dans l'utilisation de certaines pièces.

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'orientation des fibres lors de la mise en œuvre des composites [13]:

Les dimensions des fibres.

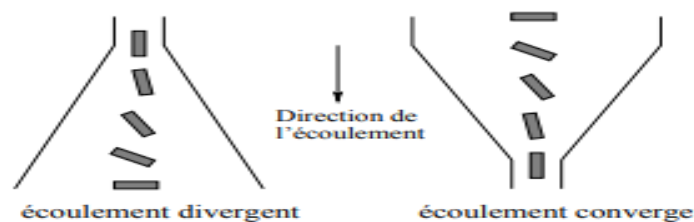
Les propriétés viscoélastiques de la matrice polymère à l'état fondu.

La forme de l'empreinte du moule.

Les traitements des fibres.

#### II.1.1 Orientation d'une fibre en écoulement élongationnel

En écoulement élongationnel, la fibre s'oriente perpendiculairement ou parallèlement à la direction de l'écoulement suivant que le taux d'élongation est négatif ou positif. Contrairement à l'écoulement de cisaillement, il existe en élongation une position d'équilibre stable de la fibre. Celle-ci s'oriente suivant la direction de l'élongation comme le montre la figure II.1. [14]



**Figure II.1** Mouvement d'une fibre dans un écoulement élongationnel [14].

## II.1.2 Interface fibre/matrice

La liaison entre fibre et matrice dépend généralement de l'arrangement atomique et moléculaire ainsi que des compositions chimiques de la fibre et de la matrice. Cependant, les propriétés morphologiques et la capacité de diffusion de chaque matériau sont aussi à prendre en compte dans la compréhension des phénomènes interfaciaux. Plusieurs facteurs peuvent donc influencer l'interface et le transfert de charge entre fibre et matrice. Généralement, il s'agit de la contribution de plusieurs facteurs. Afin d'améliorer l'adhésion fibre/matrice, la fibre est traitée chimiquement ou physiquement. Dans le cas des fibres de verre ou de carbone, la fibre est revêtue d'une substance chimique dite ensimage qui dépend du type de la fibre et de la matrice. Cependant, ces ensimages sont optimisés pour les thermodurcissables et peu pour les thermoplastiques. [14]

## II.2 Prédiction des propriétés effectives des matériaux composites à fibres aléatoires

Le développement des matériaux composites peut s'avérer long et coûteux. Alors la prédiction du comportement mécanique de ces matériaux est appréciée afin de diminuer le temps et le coût des tests expérimentaux. Dans le but de déterminer les propriétés effectives d'un matériau composite à fibres aléatoires, plusieurs méthodes ont été utilisées comme les modèles semi empiriques, l'homogénéisation analytique et numérique. [15]

### II.2.1 Les modèles semi-empiriques

Plusieurs modèles semi-empiriques ont été utilisés pour déterminer les propriétés élastiques des matériaux composites à fibres aléatoires. Parmi ces modèles, la loi de mélange (équation II.1). [15]

$$E_C = E_f V_f + E_m v_m \quad (\text{II.1})$$

Loi de mélange inverse est donnée par l'équation (II.2). [16]

$$E_C = \frac{E_m E_f}{E_m v_f + E_f v_m} \quad (\text{II.2})$$

Le modèle de Hirsch, est présenté par l'équation (II.3). [17]

$$E_C = X(E_f v_f + E_m v_m) + (1 - X) \frac{E_m E_f}{E_m v_f + E_f + v_m} \quad (\text{II.3})$$

Avec  $E_C$ : Module d'Young du composite.

$E_f$ : Module d'Young des fibres

$E_m$ : Module d'Young de la matrice

$v_f$ : La teneur en volume des fibres

$v_m$ : La teneur en volume de la matrice

$x$ : un paramètre qui décrit le transfert des contraintes entre les fibres et la matrice, il est compris entre 0 et 1.

Dans la littérature, quelques chercheurs ont utilisé le modèle de Tsai-Pagano et Halpin-Tsai pour calculer le module d'Young des matériaux composites à fibres aléatoires. [18]

Le modèle de Tsai-Pagano est présenté par l'équation (II.4)

$$E_{random} = \frac{3}{8}E_{11} + \frac{5}{8}E_{22} \quad (\text{II.4})$$

$E_{11}$  et  $E_{22}$  se calculent en utilisant le modèle de Halpin-Tsai qui est appliqué dans le cas des composites à fibres unidirectionnelles. L'avantage de ce modèle est qu'il tient en compte l'influence du rapport d'aspect des fibres (*Longueur des fibres/ diamètres des fibres*).

Le module longitudinal  $E_{11}$  est calculé par l'équation (II.5)

$$E_{11} = \frac{1+\zeta_1\eta_L v_f}{1-\eta_L v_f} E_m \quad (\text{II.5})$$

L :longueur des fibres

$$\eta_L = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}-1\right)}{\left(\frac{E_f}{E_m}+\zeta_1\right)} \quad \text{et} \quad \zeta_1 = \frac{2L}{d} \quad (\text{II.6})$$

Avec,  $d$  :diamètre des fibres

Le module transversal  $E_{22}$  est calculé par l'équation (II.7)

$$E_{22} = \frac{1+\zeta_2\eta_T v_f}{1-\eta_T v_f} E_m \quad (\text{II.7})$$

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{E_f^{-1}}{E_m}\right)}{\left(\frac{E_f^{-1}}{E_m}+\zeta_2\right)} \quad (\text{II.8})$$

$\zeta_2$  : Un paramètre lié au degré de renforcement de la matrice par les fibres. Il correspond au paramètre d'ajustement de la courbe qui représente la rigidité transversale normalisée

$E_f/E_m$  en fonction du rapport de rigidité des constituants  $E_f/E_m$  [18].

Ce paramètre est utilisé dans la littérature pour prédire le module d'Young des matériaux composites à fibres aléatoires en utilisant  $\zeta_2 = 2$ .

L'utilisation de cette valeur avec n'importe quel teneur en volume de fibres n'est pas tout à fait précise, car elle donne un bon ajustement lorsque la teneur en volume des fibres est 55% de fibres circulaires. [18]

Les modèles semi-empiriques ne présentent pas des prédictions exactes dans la plupart des cas, puisqu'ils ne prennent pas en considération toutes les informations de la microstructure (les propriétés des phases, leur fraction volumique, la forme et l'orientation des renforts...). De plus ils ne sont pas des modèles explicatifs des phénomènes physiques.

## II.2.2 Modèles d'homogénéisation

### II.2.3 La méthode de l'inclusion équivalente selon Eshelby

Cette méthode est adaptée à des matériaux contenant de faibles concentrations en fibres (domaine dilué) [19].

Eshelby considère que les contraintes internes du matériau sont dues à une inadéquation entre les formes des constituants (fibres et résine). Si l'on assimile une fibre à un ellipsoïde dont le facteur de forme est quelconque, on considère la contrainte comme uniforme sur toute sa surface [19].

Un composite supposé homogène et infini est décomposé en deux domaines : la fibre et la matrice. Pour une déformation imposée au matériau, l'amplitude de la déformation de l'inclusion est déterminée [19]. Eshelby a visualisé les déformations à l'aide de grilles dont les lignes représentent les différents déplacements et l'épaisseur la rigidité du matériau (Figure II.2).

La fibre est découpée dans le matériau élastique homogène non contraint et subit une déformation en dehors des contraintes appliquées à la matrice (on parle de déformation libre). Son volume ayant changé, elle ne peut plus être replacée telle quelle dans la matrice, sa surface doit être déformée de  $-\varepsilon^{-T}$  [19].

Une fois en position, fibre et matrice forment à nouveau un matériau homogène mais un champ de contraintes et de déformations élastiques se crée dans la fibre et dans la matrice. Le matériau est alors caractérisé par une hétérogénéité de pré déformation d 'un milieu homogène et il n'y a pas d'hétérogénéité élastique [19].

En considérant le milieu isotrope, Eshelby recherche un équilibre entre fibre et matrice pour une déformation contrainte  $\epsilon^c$  liée à la forme initiale de la fibre. Comme la fibre est déformée uniformément, la contrainte de la fibre  $\sigma_f$  est calculée avec la loi de Hooke en faisant intervenir la déformation élastique  $(\epsilon^{-c} - \epsilon^{-T})$  ainsi que le tenseur de rigidité  $C_m$

$$\sigma_f = C_m (\epsilon^{-c} - \epsilon^{-T}) \quad (II.9)$$

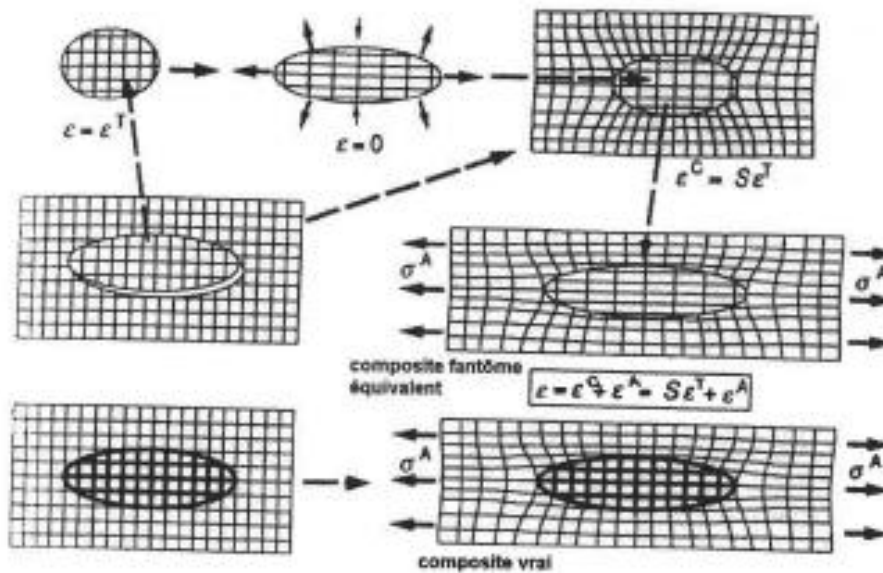


Figure II.2: Opération de déformation d'Eshelby

L'inclusion devient soumise à des contraintes par le milieu qui l'entoure. Selon Eshelby le champ de déformation résultant  $\epsilon^c$  dans l'inclusion est uniforme et il est donné par l'équation (II.10). [20]

$$\epsilon^c = S^E : \epsilon^* \quad (II.10)$$

Où  $S^E$  est le tenseur d'Eshelby.

### II.3 Fractions volumiques

Considérons un volume  $v_c$  de matériau composite, composé d'un volume  $v_f$  de fibres et d'un volume  $v_m$  de matrice. Par la suite, les indices c, f et m seront systématiquement utilisés comme indices respectifs des caractéristiques du matériau composite, des fibres et de la matrice. La fraction volumique de fibres est :[21]

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (\text{II.11})$$

La fraction volumique de matrice est :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$V_m = 1 - V_f \quad (\text{II.13})$$

Puisque

$$v_c = v_f + v_m \quad (\text{II.14})$$

#### II.4 Fractions massiques

Les fractions massiques sont définies de la même manière à partir des masses  $p_c$ ,  $p_f$ ,  $p_m$  respectives de matériau composite, de fibres, de matrice. Les fractions massiques ou fractions en masse de fibres et de matrice s'écrivent respectivement : [21]

$$P_f = \frac{P_f}{P_c} \quad (\text{II.15})$$

$$P_m = \frac{P_m}{P_c} \quad (\text{II.16})$$

$$P_m = 1 - P_f \quad (\text{II.17})$$

#### II.5 Relations entre fractions volumiques et massiques

Les relations entre les fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques  $\rho_c$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho_m$  respectives du matériau composite, des fibres, de la matrice. Les masses et volumes sont liés par les relations : [21]

$$P_c = \rho_c v_c, P_f = \rho_f v_f, P_m = \rho_m v_m \quad (\text{II.18})$$

La masse totale du matériau composite est :

$$P_c = P_f + P_m \quad (\text{II.19})$$

Ou

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (\text{II.20})$$

La masse volumique du matériau composite s'écrit donc en fonction des fractions volumiques suivant :

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m (1 - V_f) \quad (\text{II.21})$$

De même, en partant du volume total du composite :

$$v_c = v_f + v_m \quad (\text{II.22})$$

nous obtenons :

$$\frac{P_c}{\rho_c} = \frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m} \quad (\text{II.23})$$

D'où l'expression de la masse volumique en fonction des fractions massiques :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m}} \quad (\text{II.24})$$

Les relations entre fractions massiques et fractions volumiques peuvent maintenant être établies, en partant des relations de définition :

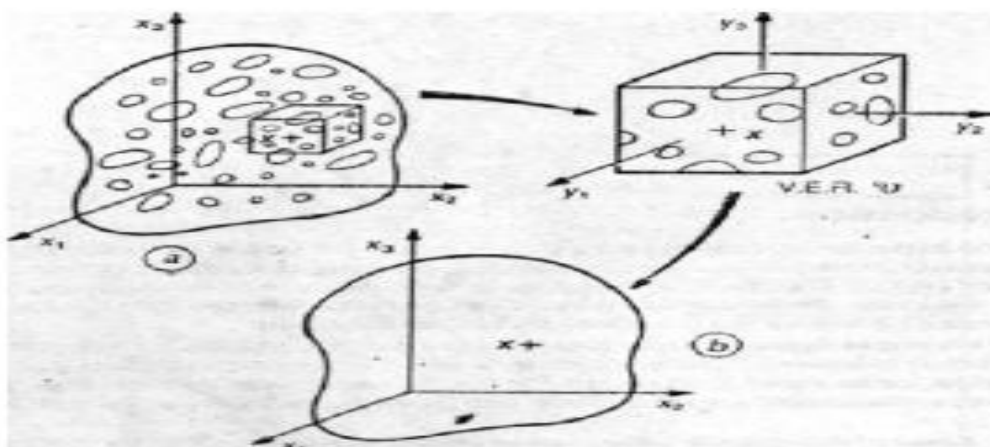
$$P_f = \frac{P_c}{\rho_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (\text{II.25})$$

## II.6 Le Volume Élémentaire Représentatif VER

On définit un volume élémentaire représentatif (V.E.R) dans lequel est calculé le comportement du matériau homogène équivalent. Ce V.E.R doit être plus grand que les inclusions (fibres) mais plus petit que le matériau étudié.

Dans la réalité, il est illusoire de vouloir connaître la densité de probabilité d'un champ (Contrainte, masse volumique, déformation, etc.) en chaque point  $x$  de la structure.

Le volume élémentaire représentatif (V.E.R.) joue pour les matériaux hétérogènes le rôle classique de l'élément de volume de la mécanique des milieux continus. Afin de traduire la notion d'homogénéité d'une grandeur ou de la valeur efficace de cette grandeur ; on distingue classiquement deux échelles : [22]



**Figure II.3** Milieu hétérogène (a). Et milieu macroscopiquement (b) relies V.E.R[22]

## II.7 Conditions aux limites sur le V.E.R.

Le volume élémentaire représentatif joue, alors, le rôle classique de l'élément de volume en mécanique des milieux continus. Il doit donc comporter le contenu énergétique de l'élément de volume, [23] propriété que l'on peut traduire par l'égalité entre les moyennes des contraintes et des déformations par :

$$\overline{(\sigma_{ij} \varepsilon_{ij})} = \bar{\sigma}_{ij} \bar{\varepsilon}_{ij} \quad (\text{II.26})$$

La relation (II.26) est connue sous la nom d'égalité de macro-homogénéité de Hill. Trois type de conditions aux limite sur le bord du V.E.R. sont classiquement envisagés pour remplacer les conditions  $(\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^0 \text{ et } \bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij}^0)$  parce qu'elles respectent l'égalité de macro-homogénéité (II.26)

Le processus de micromécanique défini par les équations locales (loi de comportement locale),  $(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \gamma_j} = 0, i = 1,2,3), (\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^0 \text{ et } \bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij}^0)$  s'écrit

alors de la manière suivante :

- La loi de comportement locale (II.26)
- Equations d'équilibre locales dans v :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \gamma_j} = 0, i = 1,2,3 \quad (\text{II.27})$$

Conditions aux limites sur :

-contraintes homogènes :

$$\sigma_{ij} n_j = \sigma_{ij}^0 n_j, i = 1,2,3 \quad (\text{II.28})$$

Ou

-déformations homogènes :

$$U_i = \varepsilon_{ij}^0 n_j, i = 1,2,3 \quad (\text{II.29})$$

Ou

-condition de périodicité :

$\sigma_{ij} n_j$  Antipériodique en

$$y = (y_i): U_i = \varepsilon_{ij}^0 y_j + U_i^* \quad (\text{II.30})$$

$U_i^*$  Périodique en  $y = (y_i)$

Dans ces conditions les tenseurs  $\sigma^0 = (\sigma_{ij}^0)$  et  $\varepsilon^0 = (\varepsilon_{ij}^0)$  sont des données que nous allons interpréter, et  $n = (n_i)$  est le vecteur normal unitaire extérieur à  $v$  [23].

Dans les conditions (II.30), propres aux milieux périodiques, l'anti périodicité du vecteur contraint provient du fait que, sur les faces opposées, les vecteurs contraints sont opposés. Il est clair que dans de tels milieux les champs de contrainte  $\sigma(x, y)$  ou de déformation  $\varepsilon(x, y)$  ne sont pas parfaitement périodiques mais que leurs fluctuations sont périodiques en  $y$  à une distance suffisante du bord de la structure. En générale, les conditions aux limites ne sont pas équivalentes entre elle et aucune n'est équivalente aux conditions de périodicité (II.27) dans le cas particulier des milieux périodiques. [23]

L'intégration des relations d'équilibre locale (II.26) montre que la contrainte moyenne sur le V.E.R.[23] a pour expression :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{v} \int \frac{\partial(\sigma_{ik} \gamma_j)}{\partial \gamma_k} dy \quad (\text{II.31})$$

En appliquant le théorème de la divergence à la relation ci-avant et en tenant compte des conditions de contraintes homogènes (II.31), il vient :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^0 \quad (\text{II.32})$$

L'égalité (II.14), compte tenu des conditions en déformations homogènes ou périodicité (II.29) ou (II.28), montre de même que la déformation moyenne dans le V.E.R.[24] a pour valeur :

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 \quad (\text{II.33})$$

Les égalités (II.32) et (II.33) permettent donc d'interpréter d'une part les données comme des valeurs moyennes et montrent d'autre part que l'égalité de macro-homogénéité est satisfaite.[23] En effet, les équations d'équilibre locales (II.26) et le théorème de la divergence fournissent la relation suivante :

$$(\overline{\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}) = \frac{1}{2V} \int (U_i n_j + U_j n_i) dS \quad (\text{II.34})$$

Si bien que

$$(\overline{\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}) = \begin{cases} \sigma_{ij}^0 \bar{\varepsilon}_{ij} [\text{condition (2.18)}] \\ \bar{\sigma}_{ij} \varepsilon_{ij}^0 [\text{condition (2.19) ou (2.20)}] \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

L'égalité de macro-homogénéité s'interprète comme le principe des travaux virtuels sur le V.E.R. le travail moyen des efforts intérieurs [premier membre de l'égalité (II.25)] est égale au travail moyen des efforts extérieurs [second membre de l'égalité (II.25)]. [23]

# Chapitre III

## Introduction

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de la fraction volumique sur le comportement mécanique d'un composite (matrice renforcée par fibres courtes). Pour cela, on a utilisé trois fractions différentes (0% (matériau non renforcé), 25-30% et 50-60%).

Le matériau de notre étude est un PA66 renforcé par des fibres de verre courtes. Ces matériaux étant obtenus par injection, les phénomènes rhéologiques lors du remplissage, couplés à la complexité géométrique de la pièce, rendent la structure obtenue très souvent anisotrope. Notons que les propriétés mécaniques résultantes de cette microstructure, complexe et hétérogène, sont uniques en tout point considéré.

Nous pouvons lister les principaux facteurs, à priori, influents :

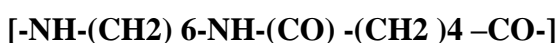
- L'orientation des fibres
- La qualité de l'interface fibre-matrice
- La longueur des fibres ou leur élancement (rapport longueur sur diamètre) ;
- La fraction massique, ou volumique, de fibres
- Le taux de cristallinité et la morphologie de la matrice (isotropie ou anisotropie du polymère).

### III.1 Conditions expérimentales

#### III.1.1 Présentation du matériau et des éprouvettes

Le matériau étudié est un composite constitué de polyamide 66 (P A66) chargé de fibres de verre courtes de type E. [24]

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. Sa structure moléculaire est :



Le P A66 est souvent renforcé par les fibres de verre courtes. Ce composite, en raison de son excellente résistance à l'huile, trouve par exemple des applications sous le capot des voitures. Quelques caractéristiques du P A66 sont données dans le Tableau (III.1)

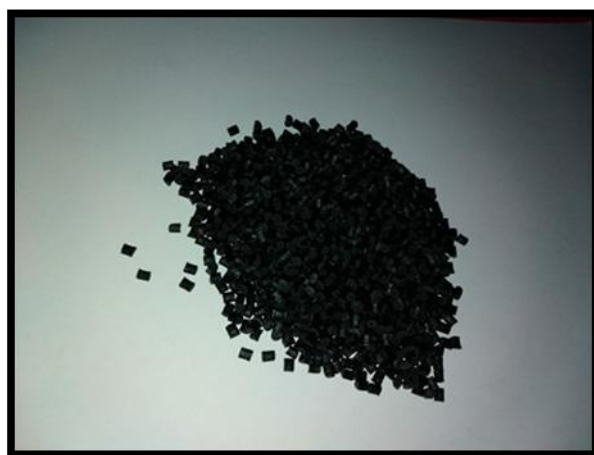
**Tableau III.1** Propriétés du PA66 [24]

Densité	1,14 g/cm <sup>3</sup>
Température à fusion	264°C
Module élastique	1,5-2,5 Gpa
Limite d'élasticité	60-75 MPA
Déformation à la rupture	40-80%
Coefficient de dilatation	90x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Température de mise en forme	260-325°C

Le **tableau III.2** donne quelques propriétés de la fibre de verre de type E. [24]

Densité	2,54 g/cm <sup>3</sup>
Module élastique	3,5 Gpa
Résistance	60-75 MPA
Déformation à la rupture	4,5%

Dans notre étude, le PA66 utilisé a été fourni, sous forme de granulés Figure (III.1), par la société Addiplast à l'état non chargé et avec trois taux de charge en fibres de verre : 0, 25-30% et 50-60%.



**Figure III.1.** Granulés de PA66 renforcés par fibres de verre

### III.1.2 Préparation des éprouvettes

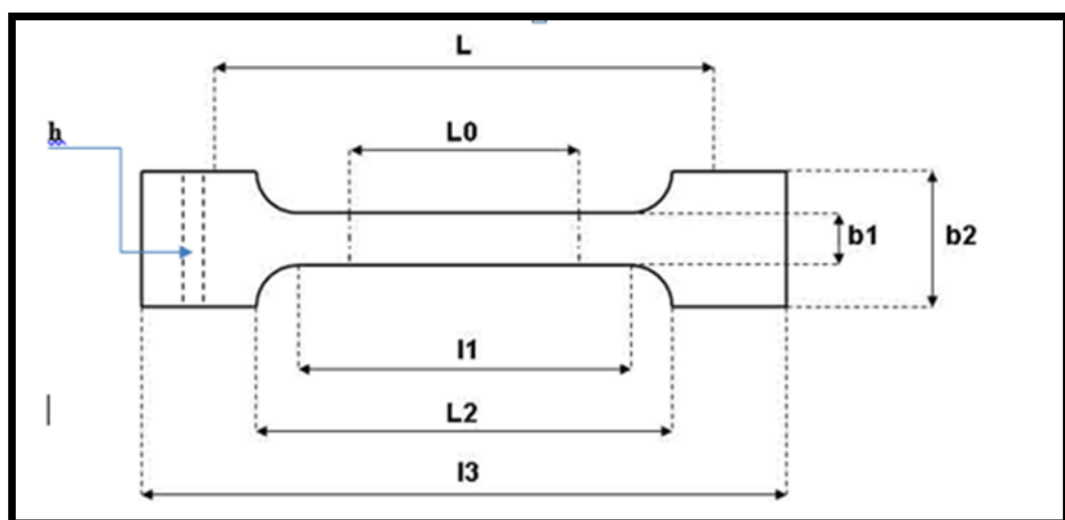
Les éprouvettes est réalisée par injection du composite suivant la norme ISO. On a réalisé 3 éprouvettes avec des fractions volumiques différentes variant de 0 (matériau non renforcé) jusqu'à 50-60%.

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient destruction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu' à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Cet essai a comme objectif

- ✓ De mesurer des courbes de traction sur des polymères.
- ✓ D'interpréter les résultats obtenus : déterminer l'allongement à rupture etc...
- ✓ D'estimer la précision de mesure

### III.1.3 Eprouvettes



**Figure III.2** dimension d'éprouvette normalisée.

$L_0$  = Longueur de référence

**L** = Ecartement entre outillages

**l<sub>1</sub>** = Longueur de la partie calibrée étroite

**L<sub>2</sub>** = Ecartement entre les parties parallèles larges

**l<sub>3</sub>** = Longueur totale

**b<sub>2</sub>** = Largeur dans la zone d'épaulement

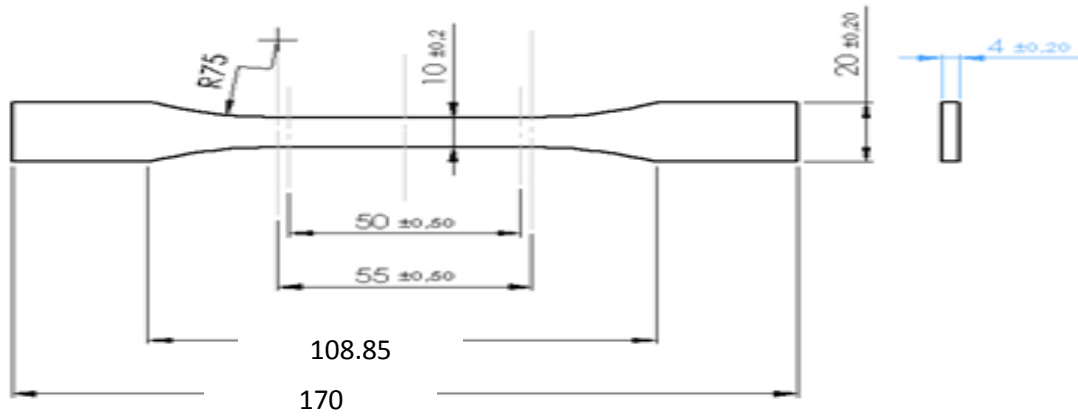
**b<sub>1</sub>** = Largeur dans la zone de la longueur de référence

**h** = épaisseur de l'éprouvette

**Tableau III.3** : dimension des éprouvettes normalisé

Norme	Type d'éprouvette	l <sub>3</sub>	l <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	h	L <sub>0</sub>	L
ISO 527-2	1A	> 150	80 ± 4	20±0,2	10±0,2	4±0,2	50 ± 0,5	115
ISO 527-2	1B	> 150	60 ± 0,5	20±0,2	10±0,2	4±0,2	50 ± 0,5	L <sub>2</sub> +5 ; L <sub>2</sub> =106....120

### III.1.4 dimension d'Eprouvette utilisée



**Figure III.3** dimension d'éprouvette utilisée.

### III.1.5 Injection les éprouvettes

Les éprouvettes ont été obtenues par moulage à partir de matière première sous forme de granulés. Le procédé utilisé (injection molding) a nécessité une presse à injecter de 80 tonnes.

*Le principe :*

La trémie de la presse est alimentée en granulés

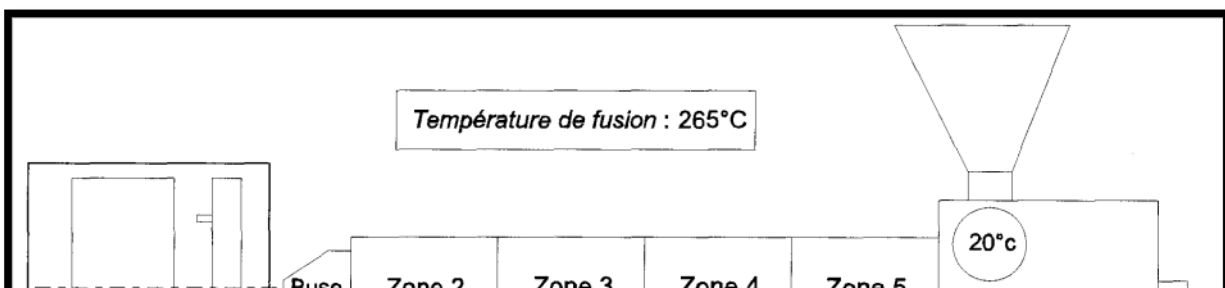
-Les granulés passent de la trémie à un ensemble vis fourreau qui malaxe, plastifie et homogénéise le matériau. La vis à diamètre interne croissant transporte la matière au travers de plusieurs zones de température figure III.4 jusqu'à l'obtention d'une matière visqueuse qui s'accumule au niveau d'une buse.

-La matière est injectée dans le moule à l'image d'une seringue une fois la buse placée au point d'alimentation du moule. Les conditions de pression et de température à l'intérieur du moule sont contrôlées à l'aide du panneau numérique. Ce moule est tout d'abord fermé puis verrouillé par un système hydraulique.

La pression maximale pouvant être supportée par cette partie est de 80 tonnes. Un pic de pression intervient une fois l'empreinte pleine.

-Le moule est refroidi. Une certaine pression est maintenue pendant une dizaine de secondes pour limiter le retrait de la matière.

-Les pièces sont retirées du moule. [24]



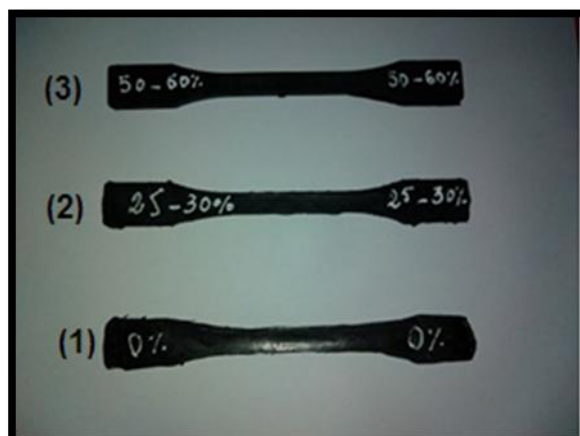
**Figure III.4** Processus de moulage par injection



**Figure III.5** machine de moulage par injection.

Les moules disponibles ont permis d'obtenir directement les éprouvettes de traction de type « haltère » et des plaques de 170 mm \* 20 mm \* 4.02 mm.

Les photographies suivantes présentent les éprouvettes de traction obtenues Figure III.6 :



### Figure III.6 Éprouvettes de traction :

(1) PA 66 à 0% de fibres de verre

(2) PA 66 à 25-30% de fibres de verre

(3) PA 66 à 50-60% de fibres de verre

### III.2 Dispositif expérimental et éprouvette

Le matériau utilisé dans notre étude est un composite de matrice thermoplastique le polyamide renforcé par des fibres de verre E. le tableau III.4 résume les propriétés mécaniques des constituants.

Tableau III.4 les propriétés mécaniques des constituants.

	module de Young E	coefficient de poisson	masse volumique
Fibre de verre E	<b>74000</b>	<b>0.25</b>	<b>2600</b>
Matrice polyamide 6	<b>2000</b>	<b>0.35</b>	<b>1100</b>

### III.3 Relation entre fraction massique et fraction volumique

Il est nécessaire de convertir la fraction massique des fibres en fraction volumique et vice versa. En effet, connaissant les masses volumiques de la matrice et des fibres, par une simple « loi des mélanges » nous pouvons écrire :

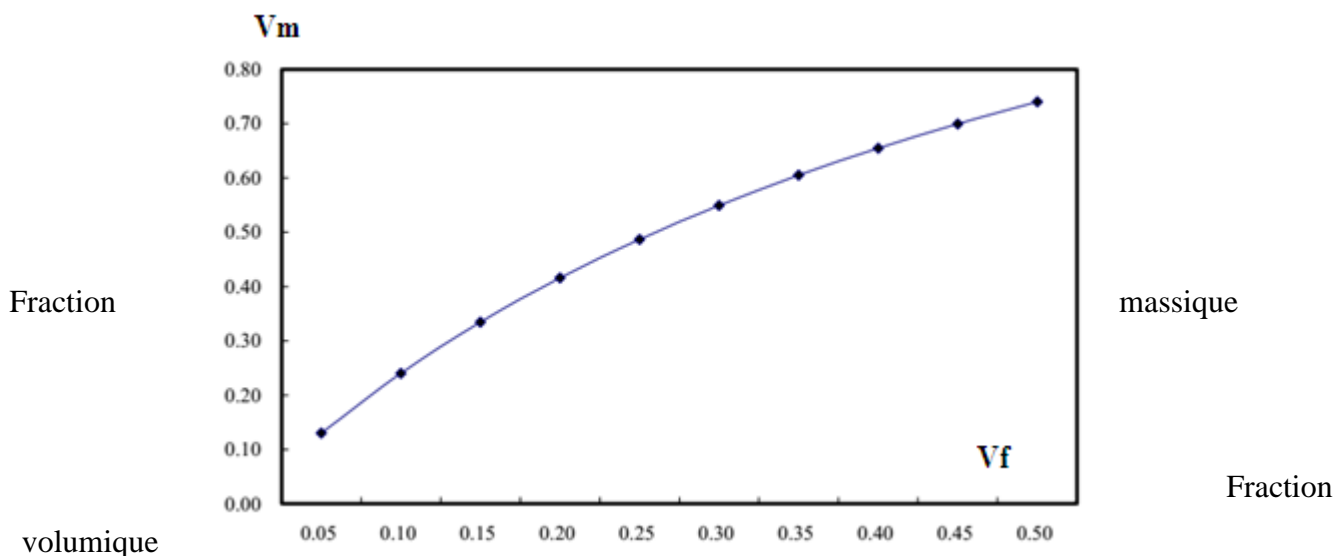
$$mf = \frac{Vf \rho_f}{Vf \rho_f + (1-Vf) \rho_m} \quad (\text{III.1})$$

$$Vf = \frac{mf \rho_m}{mf \rho_m + (1-mf) \rho_f} \quad (\text{III.2})$$

Où :

- Vf : représente la fraction volumique des fibres
- $\rho_f$  : représente la masse volumique des fibres
- mf : représente la fraction massique des fibres
- $\rho_m$  : représente la masse volumique de la matrice

La montre la relation entre la fraction massique et la fraction volumique du composite polyamide/ Verre E :



**Figure III.7** conversions entre fraction massique et fraction volumique de Pa6/verre.

#### III.4 Dispositions physiques de l'essai de traction

L'essai de traction est généralement réalisé introduisant une éprouvette dans une machine de traction figure III.8. Cette machine consiste en une base plane et un piston hydraulique ayant un mouvement linéaire perpendiculaire ment à cette même base. De plus, des mâchoires (hydraulique ou manuelles) se trouvent sur le piston ainsi que sur la base.

Ces dernières sont installées de sorte à ce que les axes soient colinéaires avec celui du piston. Alors, une fois l'éprouvette insérée dans les mâchoires, le piston est déplacé verticalement et la force axiale nécessaire à ce déplacement est enregistrée.

De plus, des jauges à déformations sont collées sur l'éprouvette a fin démesurer les déformations intervenant dans le calcul des propriétés mécaniques.

Ces propriétés mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante : Premièrement, la contrainte axiale dans l'éprouvette est obtenue en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section utile de l'éprouvette au début de l'essai. Deuxièmement, le module élastique en tension est calculé en divisant la contrainte axiale par la déformation mesurée par la jauge. Finalement, la contrainte à la rupture est habituellement identifiée comme étant la contrainte maximale enregistrée durant tout.



**Figure III.8** Machine de traction utilisée.

### III.5 Vitesses d'essai

En l'absence de cette information, elle doit être agréée par les parties intéressées conformément au tableau ci-contre.

Il peut être nécessaire ou souhaitable d'adopter différentes vitesses pour la détermination du module jusqu'à u seuil d'écoulement et pour le mesurage des autres caractéristiques après le seuil.

**Tableau III.5** tolérance sur les vitesses normalisées

<b>Vitesse</b> mm/min	<b>Tolérance</b> %
1	± 20 <sup>1)</sup>
2	± 20 <sup>1)</sup>
5	± 20
10	± 20
20	± 10
50	± 10
100	± 10
200	± 10
500	± 10

### III.6 Résultats et discussion

La figure III.9 présente les différentes éprouvettes après essai de traction.



Figure III.9 Eprouvette utilisée après essai de traction.

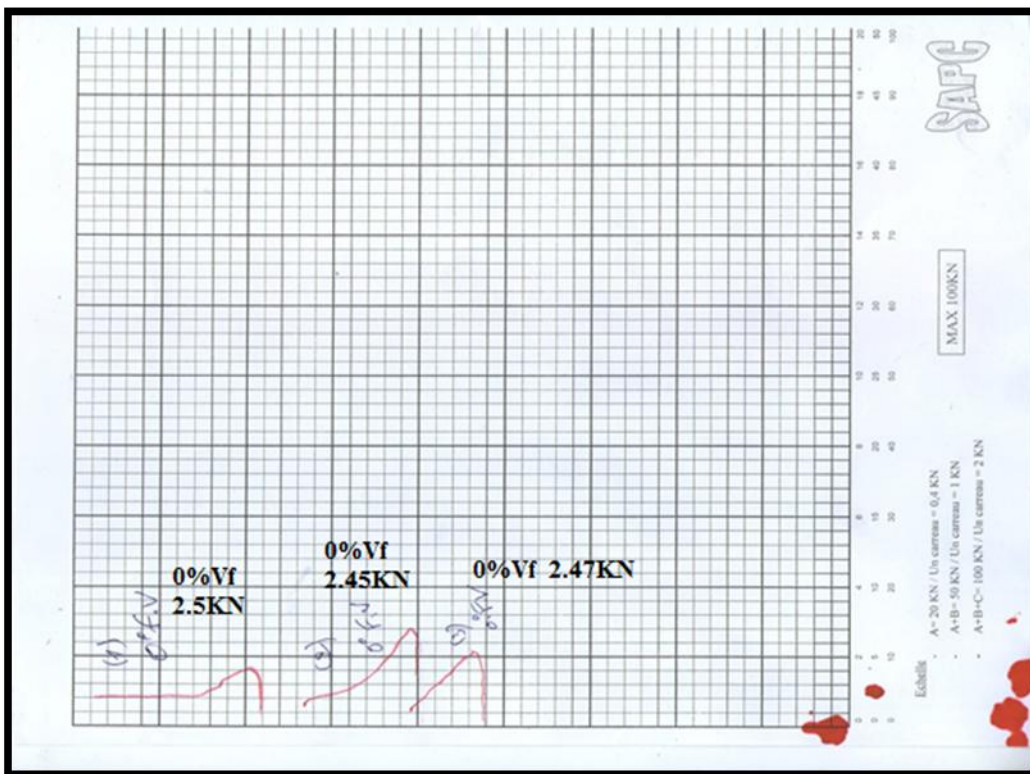


Figure III.10 montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (0%).

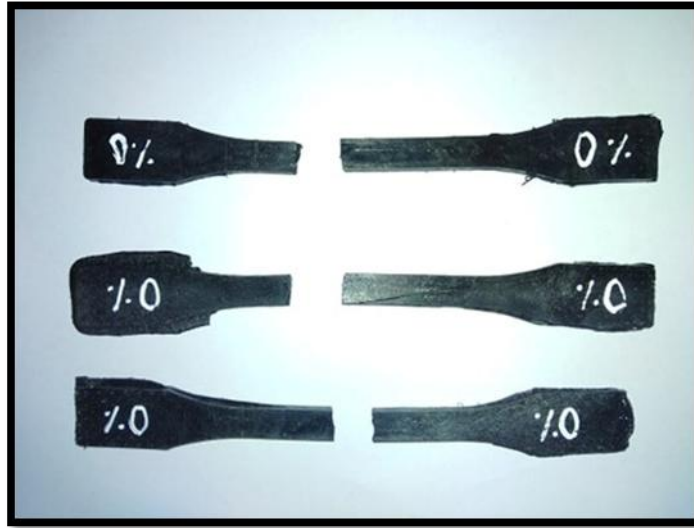
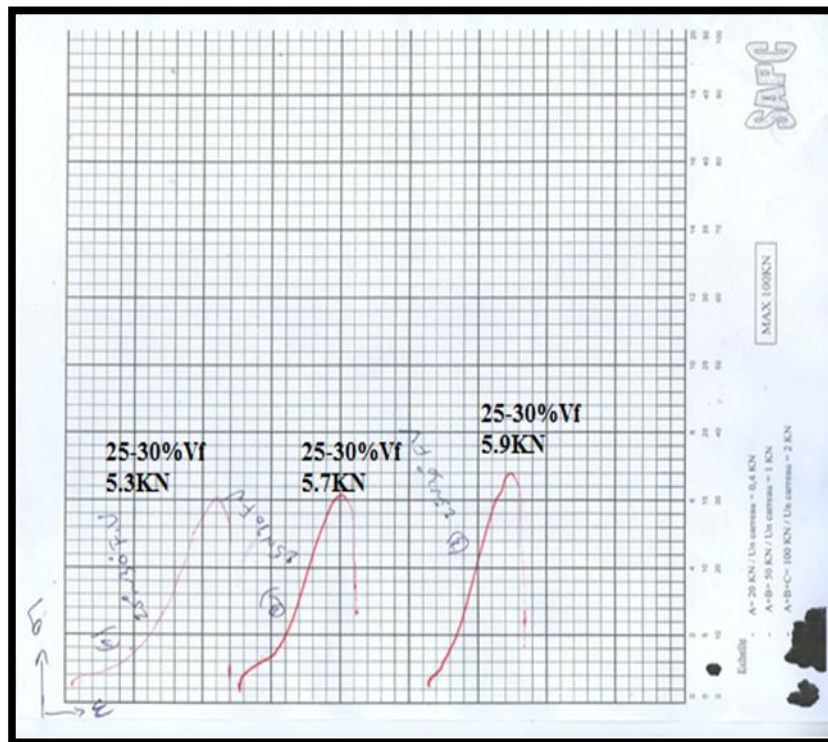


Figure III.11 les Eprouvette utilisée après essai de traction.

Tableau III.6 les Force maximales moyen Vf 0%

N° éprouvette	éprouvette1	éprouvette2	éprouvette3	F max moyen
F max(KN)	2.5	2.45	2.43	2.45



La figure III.12 montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (25-30%).



Figure III.13 les Eprouvette utilisée après essai de traction.

Tableau III.7 les Force maximales moyen Vf 25-30%

N° éprouvette	éprouvette1	éprouvette2	éprouvette3	F max moyen
F max(KN)	5.3	5.7	5.9	5.63

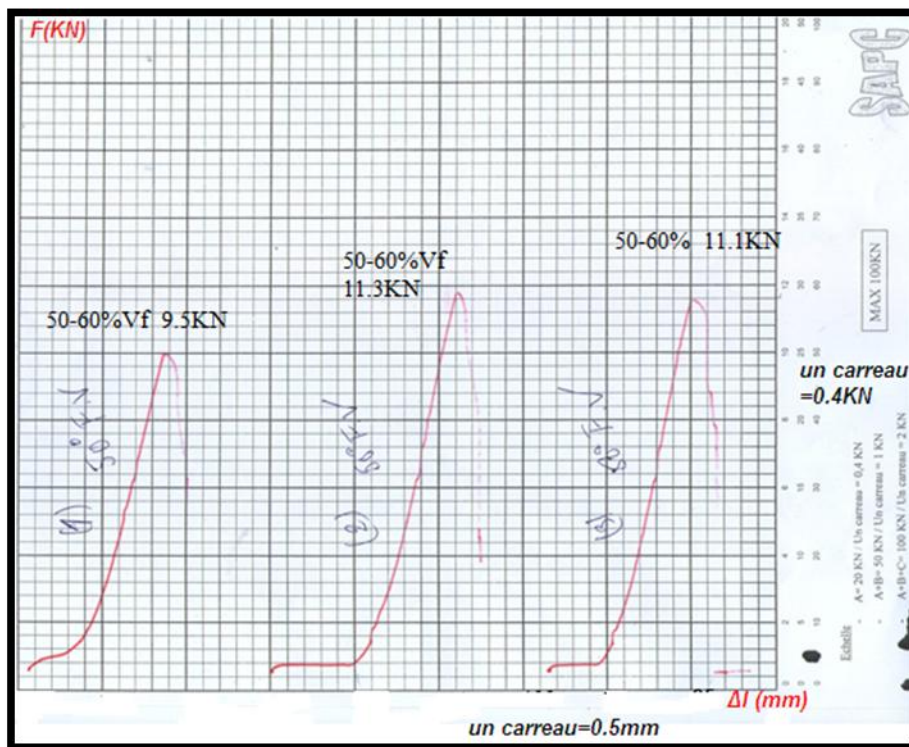


Figure III.14 montre l'essai de traction sur des éprouvettes renforcées par (50-60%).

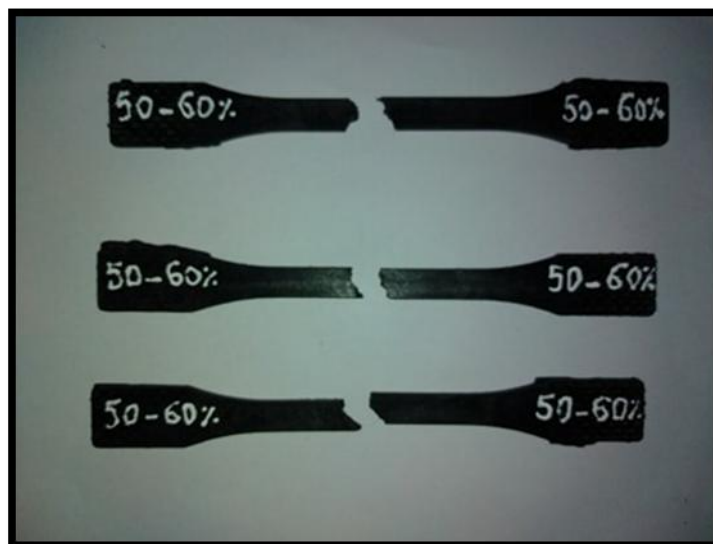


Figure III.15 les Eprouvette utilisée après essai de traction.

Tableau III.8 les Force maximales moyen Vf 50-60%

N° éprouvette	éprouvette1	éprouvette2	éprouvette3	F max moyen
F max(KN)	9.5	11.3	11.1	10.63

### III.6.1 Calcul de l'allongement pour éprouvette 1 renforcée avec 50-60% de fraction volumique

Tableau III.9 Valeurs d'allongements  $\Delta L$  en fonction des forces F

F (KN)	0	1.6	2.4	5.2	6.4	8	9.5
$\Delta L$ mm	0	1.3	1.6	2.5	2.75	2.85	3

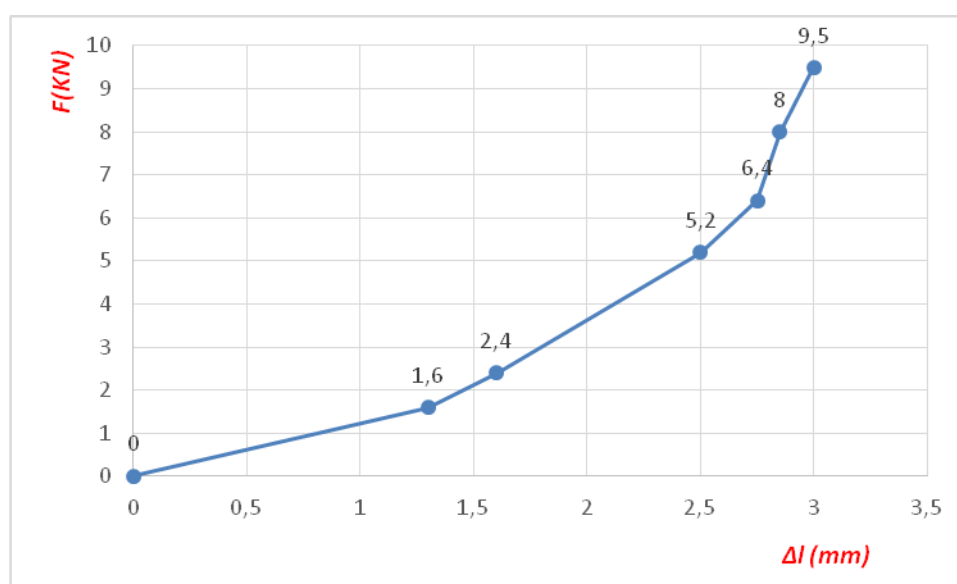
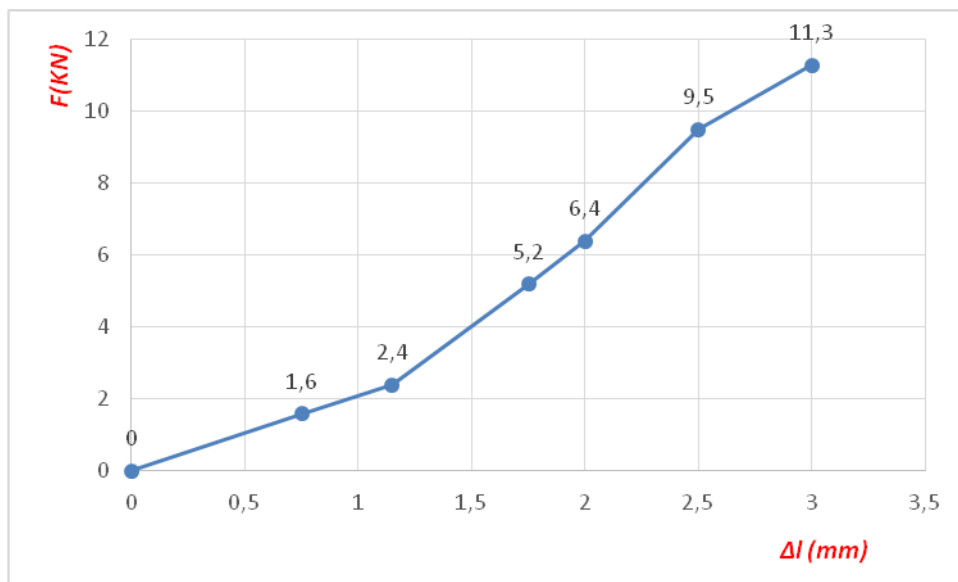


Figure III.16 Courbe allongement pour 50-60% de fraction volumique.

### III.6.2 Calcul de l'allongement pour éprouvette 2 renforcée avec 50-60% de fraction volumique

**Tableau III.10** Valeurs d'allongements  $\Delta L$  en fonction des forces F

F (KN)	0	1.6	2.4	5.2	6.4	9.5	11.3
$\Delta L$ mm	0	0.75	1.15	1.75	2	2.5	3



**Figure III.17** Courbe allongement pour 25-30% de fraction volumique.

### III.6.3 Calcul de l'allongement pour éprouvette 3 renforcée avec 50-60% de fraction volumique

**Tableau III.11** Valeurs d'allongements  $\Delta L$  en fonction des forces F

F (KN)	0	1.6	2.4	5.2	6.4	9.5	11.1
$\Delta L$ mm	0	0.75	1	1.6	1.8	2.5	3

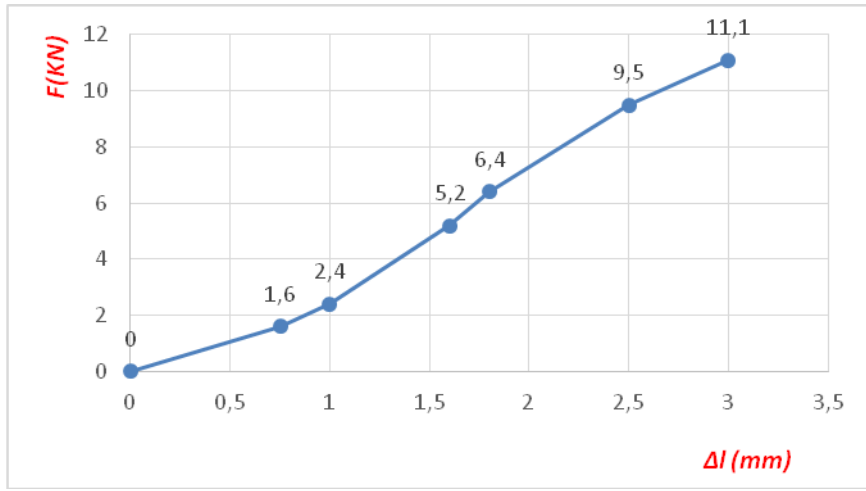


Figure III.18 Courbe allongement pour 50-60% de fraction volumique.

### III.6.4 Calcul des contraintes et déformation pour éprouvette renforcée avec 50-60% de fraction volumique

On a :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{III.3})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{III.4})$$

$$S : 4 \times 10 = 40 \text{ mm}^2$$

$$L_0 = 50 \text{ mm}$$

Tableau III.12 Valeurs des contraintes  $\sigma$  et déformations  $\varepsilon$

$\sigma = \frac{F}{S}$	0	40	60	130	160	237.5	265.7
$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	0	0.004	0.005	0.010	0.012	0.014	0.016

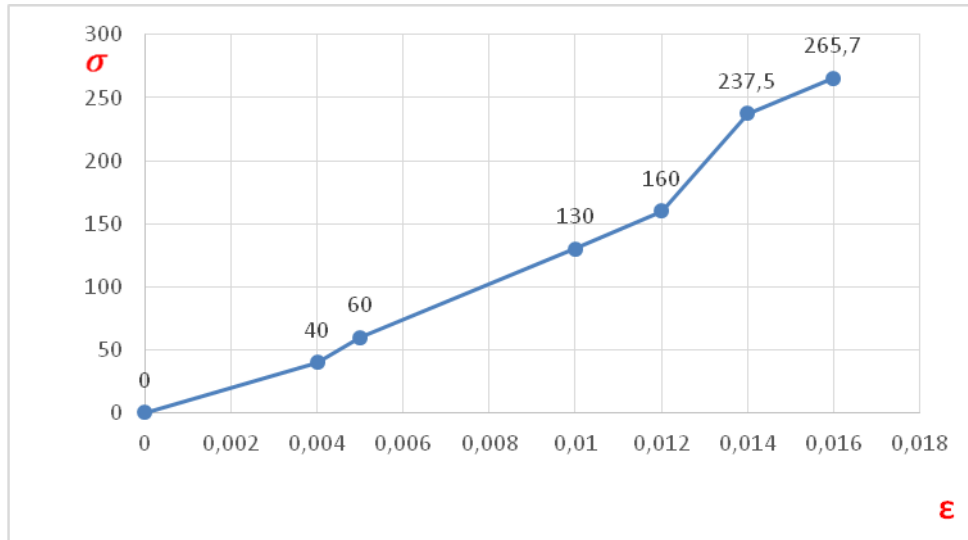


Figure III.19 courbe contraintes  $\sigma$  en fonction déformation  $\epsilon$  pour 50-60% de fraction volumique.

### III.6.3 Calcul des contraintes maximal par apport à la fraction volumique des déférentes éprouvettes (0% - 25 - 30% - 50-60%)

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S} : \text{Contrainte maximale}$$

$$\sigma_{\max 0\%} = \frac{F_{\max 0\%}}{S} = \frac{2450}{40} = 61.25 \text{ N/mm}^2$$

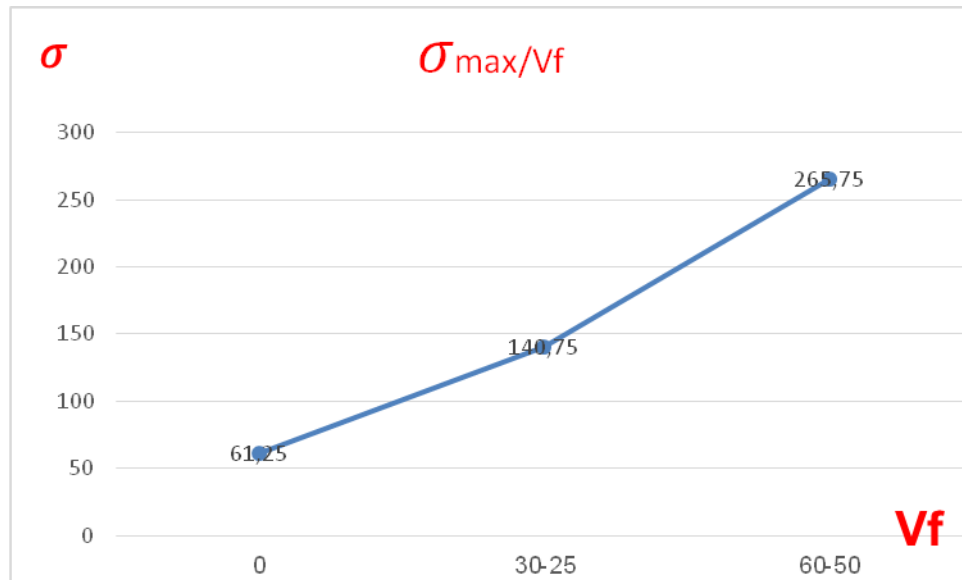
$$\sigma_{\max 25-30\%} = \frac{F_{\max 25-30\%}}{S} = \frac{5630}{40} = 140.75 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\max 50-60\%} = \frac{F_{\max 50-60\%}}{S} = \frac{10630}{40} = 265.75 \text{ N/mm}^2$$

$V_f$  : Fraction volumiques des fibres

Tableau III.13 Valeurs des contraintes  $\sigma_{\max}$  en fonction des fractions volumiques

$\sigma_{\max}$	61.25	140.75	265.75
$V_f$	0%	25-30%	50-60%



**Figure III.20** Courbe  $\sigma_{max}$  en fonction des fractions volumiques.

Les figures III.10, III.12 et III.14 illustrent les courbes charges appliquées en fonction de l'allongement pour chaque taux de charge. Nous avons constaté que l'augmentation du taux de fibres de verre améliore la résistance mécanique du polyamide et diminue sa ductilité.

### Conclusion

Dans cette étude l'effet du taux de fibre de verre a été étudié. Sur les différentes éprouvettes nous avons pu observer que pour chaque matériau, les variations des caractéristiques mécaniques (contrainte à rupture, déformation à rupture) en fonction du taux de fibres de verres sont indiquées. Des conclusions peuvent être établies, l'augmentation du taux de fibres induit une augmentation de la contrainte à rupture.

## ***Conclusion générale***

Ces dernières années on a assisté à un développement très important dans l'utilisation des matériaux composites dans différents secteurs de l'industrie (automobile, aérospatiale, bâtiment, génie civil, ..). Ce développement est essentiellement dû aux bonnes caractéristiques de ces matériaux qui résultent d'une association des performances de leurs constituants.

Avec ce développement, les ingénieurs sont confrontés à des problèmes délicats de modélisation et de calcul de structures. En effet, les structures construites en matériaux composites sont caractérisées par de fortes hétérogénéités à l'échelle microscopique et par une forte anisotropie à l'échelle macroscopique ce qui rend très difficile l'utilisation des moyens de calcul développés pour des structures composées des matériaux isotropes et homogènes.

Elle présenté dans ce travail a été consacré à une étude expérimentale. Cette étude concerne l'influence de la fraction volumique sur le comportement mécanique des composites renforcés par des fibres courtes, dans notre cas on a choisi une matrice de polyamide 6 renforcée par des fibres de verre courtes. On a constaté que l'augmentation du pourcentage de renforts améliore la rigidité du composite. La fraction volumique de fibres augmente la rigidité et la contrainte à la rupture et l'augmentation du taux de fibres induit une augmentation de la contrainte à rupture.

## Liste des références

- [1] 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.
- [2] Jean Marie Berthelot, « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4<sup>ème</sup> édition, TEC & DOC, Le Mans Novembre 2010.
- [3] Damien Ducret, « Elasticité anisotrope et endommagement des matériaux composites, caractérisation ultrasonore et modélisation micromécanique » Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, Lyon, 2000
- [04] JULES.E.J, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers,2001.
- [05] KAUSCH.H.-H, HEYMANS.N, PLUMER.C.J, and DECROLY.P, « Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physique»,2001.
- [06] BEWA.H, « Matériaux polymères biodégradables et applications Note de Synthèse II »,Direction des Energies Renouvelables,des Réseaux et des Marchés Energétiques,p1-16,2006.
- [07] BARDONNET.P,« Résines époxydes(EP) »,Techniques de l'Ingénieur,vol.A3465.
- [08] MOKADDEM.A, « Modélisation du Comportement de L'interface Fibre-Matrice de Matériaux Composites », Mémoire de magister, USTO, 2008.
- [9] RENARD.J, « Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère », Lavoisier, 2005.
- [10] Michel Dupeux, " Aide mémoire science des matériaux ", Dunod, Paris, 2004
- [11] BERTHELOT.J-M,« Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures »,4<sup>ième</sup>édition, Lavoisier, 2005.
- [12] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [13] Fu S. Y., Lauke B., (1996), Effects of fibre length and fibre orientation distributions on the tensile strength of short-fibre-reinforced polymers, Composites Science and Technology, Vol. 56, Issue 10, pp. 1179-1190.
- [14] Vincent M. and Agassant J.F. Numerical and experimental study of the fiber motion in reinforced thermoplastic flows. Rheology Acta, 26: pp 144- ? 1988.
- [15] Tahar DHAOUADI- Caractérisation et modélisation des propriétés mécaniques des biocomposites à fibres courtes aléatoires- ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.2018
- [16] Nagarajan, V., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2013). New engineered biocomposites from

poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)/poly(butylene adipate-coterephthalate) (PBAT) blends and switchgrass: Fabrication and performance evaluation. *Industrial Crops and Products*, 42(1), 461-468.

[17] Muthuraj, R., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2017). Biocomposite consisting of miscanthus fiber and biodegradable binary blend matrix: Compatibilization and performance evaluation.

[18] Halpin JC, Tsai SW. (1967). Effect of environmental factors on composite materials; Air Force Technical Report AFML-TR 67-423. Dayton, OH: Wright Aeronautical Laboratories.

[19] Eshelby J. D., *Proc. Roy. Soc. London, A* 241, 376-396, 1957.

[20] Ghossein, E. (2014). *Numerical validation of analytical homogenization models for the case of randomly distributed and oriented ellipsoidal fibers reinforced composites*. (Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal, Montréal, Qc, Canada

[21] Jean-Marie Berthelot «Mécanique des Matériaux et Structures Composites» Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés Le Mans, France

[22] KRONER(E) –effective elastic moduli of periodic and random media: a unification (module d'élasticité effectifs des milieu périodique et aléatoires : une unification). *Mechanics research communications (USA)* vol. 7 n° 5 1980 p. 323-27 bibl.(5réf.) pergamn press New York

[23] Saber BENFERDI « Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différentes approche mathématiques » Université MENTOURI Constantine 2010

[24] Bouchaïb MOUHMIID « Etude de l'endommagement et de la rupture d'un polyamide 66 chargé en fibres de verre courtes » UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE , Laboratoire de Mécanique de Lille (CNRS UMR 8107)

## Résumé

Cette étude concerne l'influence de la fraction volumique sur le comportement mécanique des composites renforcés par des fibres courtes, dans notre cas on a choisi une matrice de polyamide 6 renforcée par des fibres de verre courtes. On a constaté que l'augmentation du pourcentage de renforts améliore quasi systématiquement la rigidité du composite. La fraction volumique de fibres augmente la rigidité et la contrainte à la rupture. Cette augmentation s'accompagne d'une réduction de la déformation à la rupture. Nous noterons que la fraction volumique de fibres influence le facteur d'orientation, ce qui entraîne une interaction de 2 facteurs majeurs. Cependant, une trop grande quantité de renforts implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performances dans certains cas. D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites fabriqués qui contiennent un pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans rencontrer de nombreuses difficultés lors du moulage, à partir d'un taux de 50% en fibres, le matériau devient rugueux et la surface présente des ruptures.

## ملخص

تتعلق هذه الدراسة بتأثير جزء الحجم على السلوك الميكانيكي للمركبات المقوية بالألياف القصيرة ، وفي حالتنا اخترنا مصفوفة بولياميد 6 معززة بألياف زجاجية قصيرة. وقد وجد أن زيادة نسبة التعزيزات بشكل منهجي تقريبا يحسن من صلابة المركب. يزيد جزء حجم الألياف من الصلابة والضغط عند الكسر. ويصاحب هذه الزيادة انخفاض التشوه عند الكسر. نلاحظ أن جزء حجم الألياف يؤثر على عامل التوجيه ، مما يؤدي إلى تفاعل عاملين رئيسيين. ومع ذلك ، فإن الكثير من التعزيز يعني صعوبة في الالتصاق ، مما يؤدي إلى انخفاض الأداء في بعض الحالات. وفقاً للأدبيات ، من الشائع جداً العثور على مركبات مُصنعة تحتوي على نسبة من الألياف أعلى من 50-60% ، دون مواجهة العديد من الصعوبات أثناء النفخ ، بمعدل 50% من الألياف ، تصبح المادة خشنة وتمزق السطح

## Abstract

This study is a composite textured composite fertilizer compound compound textures textures. It was found that the percentage of reinforcements was almost always equal to the stiffness of the compound. The fiber size portion increases the hardness and pressure at breakage. This improvement is accompanied by reduction of deformation in the fracture. Note that the fiber size segment affects the steering factor, leading to the interaction of two main factors. This is one of one from one of one of one of one of one's dump performance in a given situation. From literature, it is not common to find compounds containing a proportion of fiber greater than 50-60%, without facing molding difficulties, of fiber by 50%, become raw materials and the surface has breaks