



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

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Construction Mécanique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**LARIBI Anfel**

Le : dimanche 4 juillet 2021

## **Etude expérimentale et numérique du comportement élastique d'un matériau composite à renfort textile**

---

### **Jury :**

Dr	Belhi GUERIRA	MCA	Université de Biskra	Président
Pr	Lakhdar SEDIRA	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	Youcef DJEBLOUN	MCB	Université de Biskra	Examineur



# Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah Tout-Puissant, Qui m'a donné la force et le courage de finir mes études dans de bonnes conditions.*

*Merci Allah, de m'avoir donné la volonté de terminer ce mémoire*

*Je tiens à remercier ma directeur de thèse le professeur **Sedira Lakhdar** pour sa patience, son assiduité et surtout ses conseils avisés qui ont contribué à ma réflexion.*

*Je tiens également à remercier tous les professeurs et tout le personnel du Département de génie mécanique, et en particulier, Dr. **Guerira Belhi***

*Mes remerciements particuliers à Mr. **Merabet Kamel***

*Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

*Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier ma famille qui m'a encouragé à poursuivre mes études.*

*Laribi Anfel*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières*

*tout au long de mes études,*

*A mes chères sœurs.....pour leurs encouragements constants et leur soutien moral,*

*A mes chers frères.....pour leur soutien et leurs encouragements,*

*A mes amis..... pour leurs encouragements et leur soutien,*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*Merci d'être toujours à mes côtés*

*Laribi Anfel*

## Liste des matières

Remerciments.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Dédicaces .....	II
Liste des matières.....	III
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures .....	VII

## Introduction générale

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I

### Généralités sur les matériaux composites à renfort en textile

I.1. Introduction.....	4
I.2. Matériaux composites .....	4
I.2.1. Définition de matériaux composites .....	4
I.2.2. Les constituants de matériaux composites.....	4
I.2.2.1 Le renfort .....	5
I.2.2.2. La matrice .....	5
I.2.3. Classification des matériaux composites .....	5
I.2.3.1 la forme du composant.....	5
I.2.3.2. La nature de constituant .....	6
I.2.4. Architecteur d'un matériau composite.....	7
I.2.4.1. Monocouche.....	7
I.2.4.2. Sandwich.....	7
I.2.4.3. Stratifié.....	8
I.2.5. Raisons d'utiliser des matériaux composites.....	8
I.3. Les matériaux composites à renfort tissu.....	9
I.3.1. Les composites textiles .....	9
I.3.2. Les tissus.....	10
I.3.3. Renfort tissés.....	10
I.3.3.1. Les armures.....	10
I.3.3.2. Les mèches.....	11
I.3.4. Les fibres de verre.....	11
I.4. Les polymères .....	12

## Liste des Matières

---

I.5. Conclusion .....	13
-----------------------	----

### **Chapitre II Etude bibliographiques sur les propriétés élastiques des composites à renfort tissu**

II.1. Introduction .....	15
II.2. Propriétés élastiques d'un matériau unidirectionnel.....	15
II.2.1. Un matériau unidirectionnel .....	15
II.2.2. La matrice de rigidité et de souplesse.....	15
II.2.3. Les modules de l'ingénieur .....	16
II.2.4. Propriétés élastiques d'un matériau orthotrope dans le repère local.....	16
II.2.4.1. Un matériau orthotrope.....	16
II.2.4.2. Matrices de rigidité et de souplesse.....	17
II.2.4.3. Le module de l'ingénieur.....	18
II.3. Propriétés élastiques d'un matériau orthotrope dans le repère hors axes principal .....	18
II.4. Modèles d'homogénéisations analytiques .....	21
II.4.1. Bornes Vogt et Reuss .....	21
II.4.2. Modèle de Mori-Tanaka .....	21
II.5. Conclusion .....	22

### **Chapitre III**

#### **Elaboration du matériau et caractérisation expérimentale**

III.1. Introduction .....	25
III.2. Matériels et méthodes .....	26
III.2.1. Caractérisation mécanique des constituants.....	26
III.2.1.1. La résine .....	26
III.2.1.2. Le renfort.....	27
III.2.2. Préparation de matériaux.....	30
III.2.3. Moulage par compression.....	31
III.2.4. Préparation d'éprouvettes.....	32
III.2.5. Les défauts de fabrication .....	34
III.2.6. Caractérisation expérimentale .....	35
III.2.6.1. Les caractéristiques expérimentales de flexion pour la résine pp.....	35
III.2.6.2. Les caractéristiques expérimentales de flexion pour le composite pp/verre.....	37
III.2.6.3. Les caractéristiques expérimentales de traction avec extensomètre pour la résine pp	38
III.2.6.4. Les caractéristiques expérimentales de flexion traction pour le composite pp/verre...	39

## Liste des Matières

---

III.3. Conclusion.....	42
------------------------	----

### **Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement de composite soumis à une charge de traction**

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Présentation du logiciel <i>Digimat</i> .....	45
IV.3. Calcul des propriétés élastiques d'un VER composite à renfort tissu par la méthode des champs moyens (FM).....	46
IV.3.1. Calcul par la méthode Modèle de Moritanaka ( <i>Digimat MF</i> ).....	46
IV.3.2. Calcul des propriétés élastiques d'un VER composite à renfort tissu par la méthode des éléments finis (FE).....	51
IV.4. Conclusion.....	54

### **Bibliographes**

Bibliographes.....	57
Conclusion générale.....	61
Résumé.....	
الملخص.....	

## Liste des Tableaux

---

### Liste des tableaux

#### Chapitre I

##### Généralités sur les matériaux composites à renfort tissu

Tableau I.1. Compositions massiques principales des fibres de verre (%) ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Tableau I.2. Les propriétés de polymère PP .....	13

#### Chapitre III

##### Elaboration du matériau et caractérisation expérimentale

Tableau III.3. Module de Yong de traction a la renfort verre. ....	30
Tableau III.4. Paramètres de l'extrusion et tailles de particules .....	30
Tableau III.5. Conditions de traitement de l'extrusion et préparation des plaques.. ....	32
Tableau III. 6. Dimensions d'éprouvettes de traction. ....	34
Tableau III.7. Module de Yong de flexion de pp. ....	37
Tableau III.8. Module de Yong pour le composite pp/verre en essai de flexion. ....	38
Tableau III.9. Propriétés mécaniques de polypropylène obtenu par essai de traction .....	39
Tableau III.10. Module de young de la composite pp/verre en traction. ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	

#### Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du

##### Composite soumis à une charge de traction

Tableau IV.11. Propriétés de la matrice et de fibre.....	47
Tableau IV. 12. Propriétés géométriques du fil de verre.. ....	48
Tableau IV.13. Les modules d'ingénieur du fil avancé.....	49
Tableau IV.14. Les module d'ingénieur du fil de base.....	51
Tableau IV.15. Propriétés physiques et élastiques de constituants de composite.....	52

### Liste des figures

#### Chapitre I

##### Généralités sur les matériaux composites à renfort tissu

Figure I.1. Matériaux composites.....	4
Figure I.2. Les constituants d'un composite.....	5
Figure I.3. Classification des composites selon la forme des constituent .....	6
Figure I.4. Classification des composites selon la nature de constituant .....	7
Figure I.5. Composite monocouche .....	7
Figure I.6. Schéma représentatif d'une structure sandwich.....	8
Figure I.7. Constitution d'un stratifié.....	8
Figure I.8. Les types des composites textiles .....	9
Figure I.9. Armures pour un renfort tissé 2D (taffetas, serge, satin).....	11

#### Chapitre II

##### Chapitre II Etude bibliographiques sur les propriétés élastiques des composites à renfort tissu

Figure II.10. Matériau composite unidirectionnel.....	15
Figure II. 11. Couche de matériau composite orthotrope .....	17
Figure II.12. Axes principaux (1, 2, 3) d'une couche de stratifié et axes de référence .....	19

#### Chapitre III

##### Etude experimental

Figure III.13. Plan expérimental .....	26
Figure III. 14. Les granuler de polypropylène.....	27
Figure III.15. Tissu de fibre de verre.....	27
Figure III. 16. les fils de chaine et de trame.....	28
Figure III. 17. Essai traction de fil de verre, dispositif de fixation.....	29
Figure III.18. Graphe contrainte/déformation d'essai traction sur fil de verre.....	29
Figure III.19. Les granulés de polypropylène extrudé.....	31
Figure III.20. La machine de CNC utilisé.....	32
Figure II.21. Les dimension de échantillon.....	33
Figure III.22. Echantillons de pp et pp/verre pour les tests de flexion.....	32
Figure III.23. Eprouvettes de composites PP/verre.....	34

## Liste des Figures

---

Figure III.24. Déformation de tissu.....	35
Figure III.25. Essai de flexion (polypropylène).....	36
Figure III.26. Courbe de contrainte/ déformation de la matrice pp en essai de flexion.....	36
Figure III.27. Courbes de contrainte/déformation de composite pp/verre en essai flexion. ....	37
Figure III.28. Essai de traction polypropylène pur.....	38
Figure III.29. Courbes de contrainte/ déformation de polypropylène.....	39
Figure III.30. Essai de traction pp/verre.....	40
Figure III.31. Ligne de rupture de PP/verre sous l'effet de traction.....	40
Figure III.32. Courbe contrainte/déformation de composite pp/verre d'essai traction. ....	41

### **Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

Figure IV. 33. La méthode de modélisation.....	47
Figure IV. 34. Motife de tissage.....	48
Figure IV.35. Géométrie les fils de base.....	50
Figure IV. 36. Generation de la microstructure. ....	53
Figure IV. 37. Maillage de la microstructure.....	53
Figure IV.38. Contraintes longitudinales dans un volume élémentaire représentatif de composite à base de Polypropylène et de fil en verre tissé.....	54

# Introduction Générale

### **Introduction générale :**

En fait, les matériaux composites existaient depuis des siècles. L'os et le bois sont des matériaux composites constitués de fibres noyées et liées entre elles par des tissus, dont le rôle est de distribuer les contraintes et de réaliser la protection contre l'environnement extérieur. Les études des matériaux composites sont généralement très complexes. Ces matériaux sont recommandés pour leurs nombreux avantages [1] :

- Bonne adaptation sur les conceptions de formes.
- Possibilité d'obtenir de nouvelles performances (tenue mécanique particulière, résistance chimique, résistance électrique, résistance aux érosions, résistance aux hautes températures...).
- Concevoir des pièces multifonctionnelles.....

Dans le cadre de ce travail accompli, nous avons étudié un matériau composite à base de renfort en textile de fibre de verre (type taffetas) et une matrice de polymère (Polypropylène). Le but de cette étude se résume en trois points :

1. Elargir le domaine de connaissance lié à ce type de matériau d'une part et de s'initier à l'ingénierie des textiles et des polymères.
2. Etudier expérimentalement le comportement élastique d'un matériau composite soumis à des tests mécaniques et de le confronter avec les modèles numériques et analytiques.
3. Déterminer les propriétés élastiques du modèle homogénéisé.

Cependant, le travail se scinde en quatre chapitres :

- Chapitre I : Cette partie constitue un ensemble de définitions sur les matériaux composites, les matériaux en textiles, leurs types et leur architecture.
- Chapitre II : Dans cette partie, on s'intéresse à définir le comportement élastique des matériaux composites à renfort alignés ou croisés en fibre longues. Les différentes méthodes d'homogénéisation sont présentées dont l'objectif est la caractérisation macroscopique des de ce type de composites.
- Chapitre III : La partie expérimentale est présentée dans ce chapitre, dont le travail de laboratoire est réparti sur : la préparation du matériau et les éprouvettes, la réalisation des essais de traction et de flexion sur le matériau composite lui même et ses constituants, détermination l'allure de la réponse contrainte/déformation et les propriétés élastiques des matériaux préparés.
- Chapitre IV : La modélisation numérique et analytique du comportement en traction des composites à renfort en textile est étudiée dans ce chapitre. La simulation et l'analyse sont faites

## **Introduction générale**

---

par des codes de calcul destinés aux calcul et la conception des matériaux et structures composites.

# Chapitre I:

*Généralités sur les matériaux  
composites à renfort en textile*

## **I.1. Introduction :**

Depuis l'Antiquité, les matériaux composites existent, ce qui signifie qu'ils ne sont pas nouveaux, car la façon dont ils se trouvent dans la nature et la façon dont l'être humain les utilise ont changé avec l'âge.

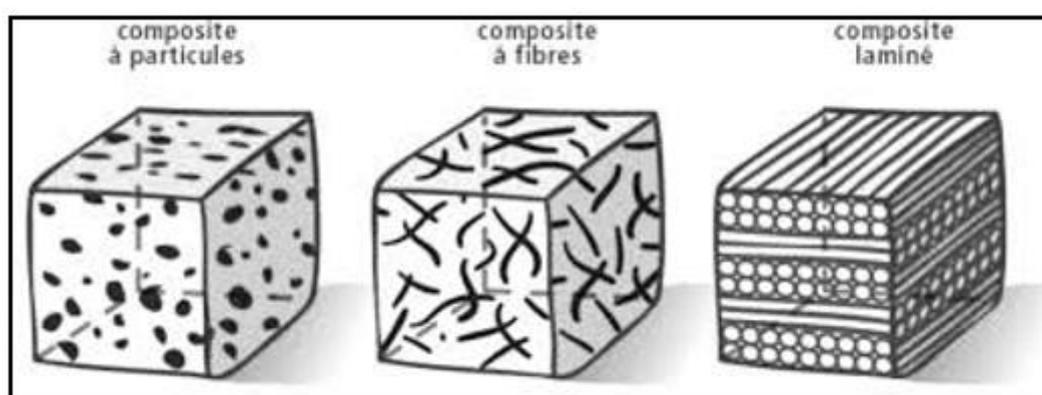
Il y a des œuvres historiques Contient des références à certaines formes de matériaux composites Par exemple, la paille a été utilisée par les arabes pour renforcer les briques ; le contreplaqué a été utilisé par les anciens Egyptiens, les épées et les armures médiévales ont été fabriquées par des couches des différents matériaux[2].

L'objectif principal de ce chapitre est d'identifier les matériaux composites et les plus particulièrement les composites à renfort en textile, leurs constituants, leurs propriétés, ainsi que leurs avantages et inconvénients .

## **I.2. Matériaux composites :**

### **I.2.1. Définition de matériaux composites :**

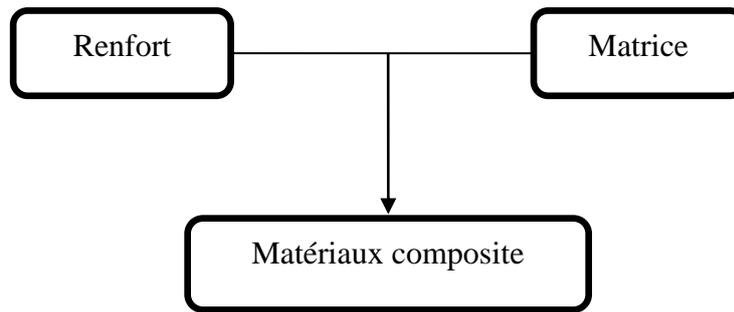
La manière générale, de mot "composite "d'après Berthelot [3]«c'est un l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément ».



**Figure I.1. Matériaux composites.**

### **I.2.2. Les constituants de matériaux composites :**

En général les matériaux composites sont constitués au moins de deux constituants nommées renforts et matrice.



**Figure I.2. Les constituants d'un composite.**

### **I.2.2.1 Le renfort :**

Le matériau de renfort assure les propriétés mécaniques du matériau composite (rigidité, résistance à la rupture, dureté...etc.) et les propriétés physiques. Et il y a beaucoup de fibres disponibles sur le marché Dépend du prix de revient de la structure produite.

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes[4]

- Linéique (fils, mèches),
- Tissus surfaciques (tissus, mats)
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

### **I.2.2.2. La matrice :**

La matrice est une sorte d'adhésif qui permet de disperser les éléments de renfort dans des positions appropriées, de les protéger physiquement et chimiquement, de créer une liaison mécanique entre eux.[5]

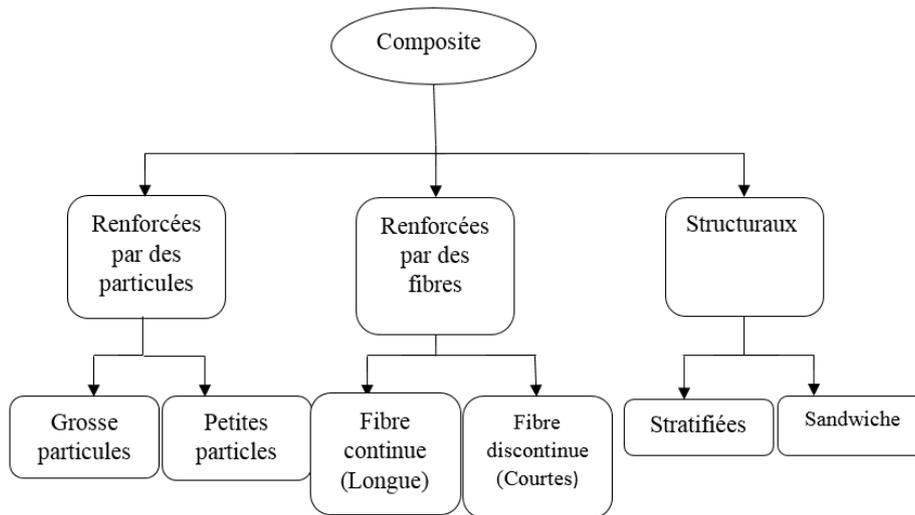
## **I.2.3. Classification des matériaux composites :**

Il existe un grand nombre de matériaux composites qui peuvent être classés selon :

### **I.2.3.1 La forme du composant :**

La figure (I.3) présente un schéma simple de classification des matériaux composites en fonction de la forme des constituants, elle comprend trois parties de base :

1. Renforcement des particules, car la forme de la fibre se présente sous la forme de particule. Il existe des grosses particules, ou des petites particules.
2. Renforcées par des fibres, soit continués (fibres longues), soit discontinues (coupées, courtes).
3. Composite structuraux contient : Stratifiées, Sandwiche.

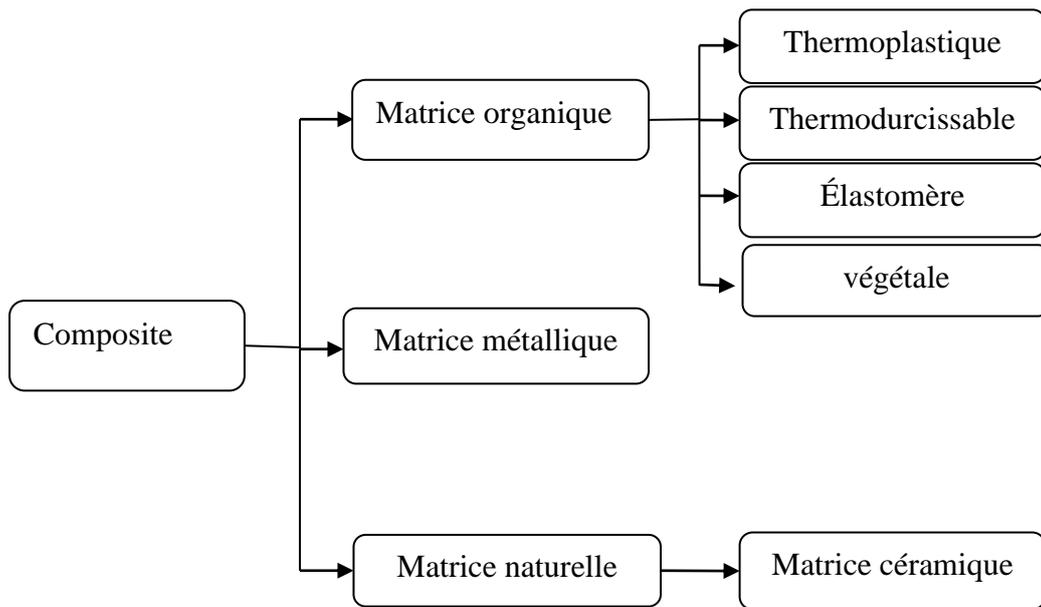


**Figure I.3. Classification des composites selon la forme des constituants [6].**

### **I.2.3.2. La nature de constituants :**

La classification de matériaux composite Selon la nature de constituants. Il se compose de trois parties :

- ✓ Matrice organique: Thermoplastique, thermodurcissable, élastomère, végétale.
- ✓ Matrice métallique
- ✓ Matrice naturelle : Matrice céramique (minérale)-

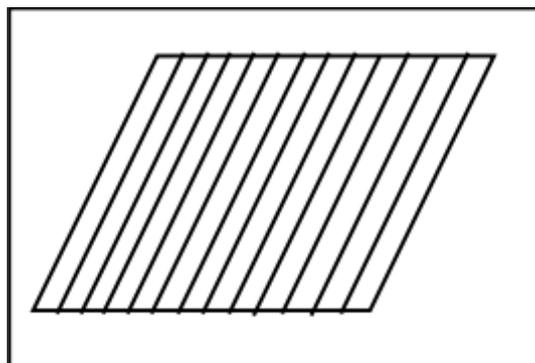


**Figure I.4. Classification des composites selon la nature de constituant [6].**

## **I.2.4. Architecteur d'un matériau composite :**

### **I.2.4.1. Monocouche :**

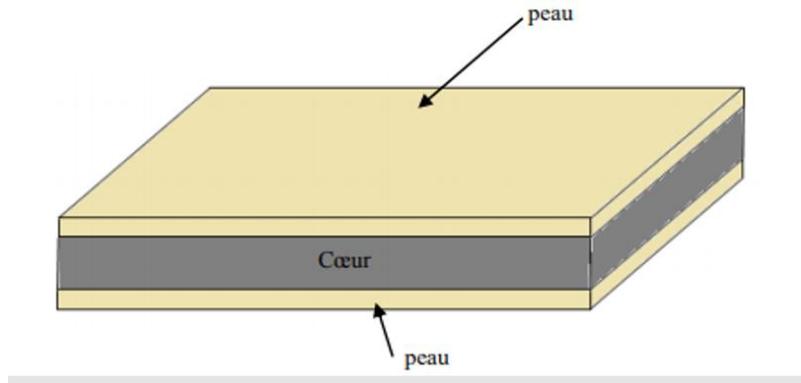
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissus et mat [7].



**Figure I.5. Composite monocouche.**

### **I.2.4.2. Sandwich :**

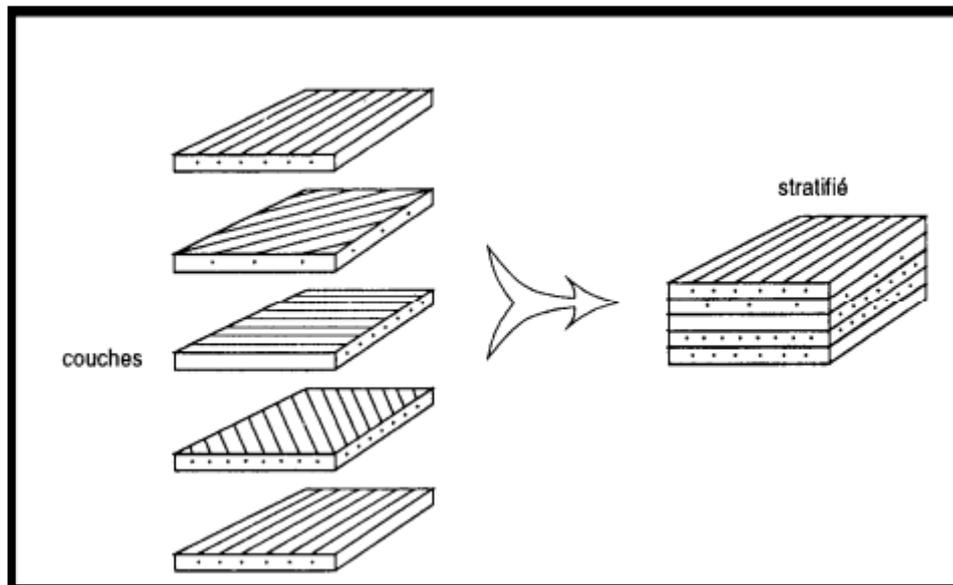
Une structure sandwich est une forme spéciale, elle se compose de deux peaux fines, liées à un cœur léger et épais (Figure I.5). Les deux peaux sont rigides et le cœur est relativement faible et souple, mais lorsqu' ils sont combinés sous forme de structure sandwich, ils produisent une structure rigide, solide et très légère[8].



**Figure I.6. Schéma représentatif d'une structure sandwich.**

### **I.2.4.3. Stratifié :**

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiés, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines[7].



**Figure I.7. Constitution d'un stratifié.**

### **I.2.5. Raisons d'utiliser des matériaux composites :**

Les matériaux composites existent depuis l'Antiquité et le développement de ces composés est dû au besoin croissant de l'industrie, en particulier dans :

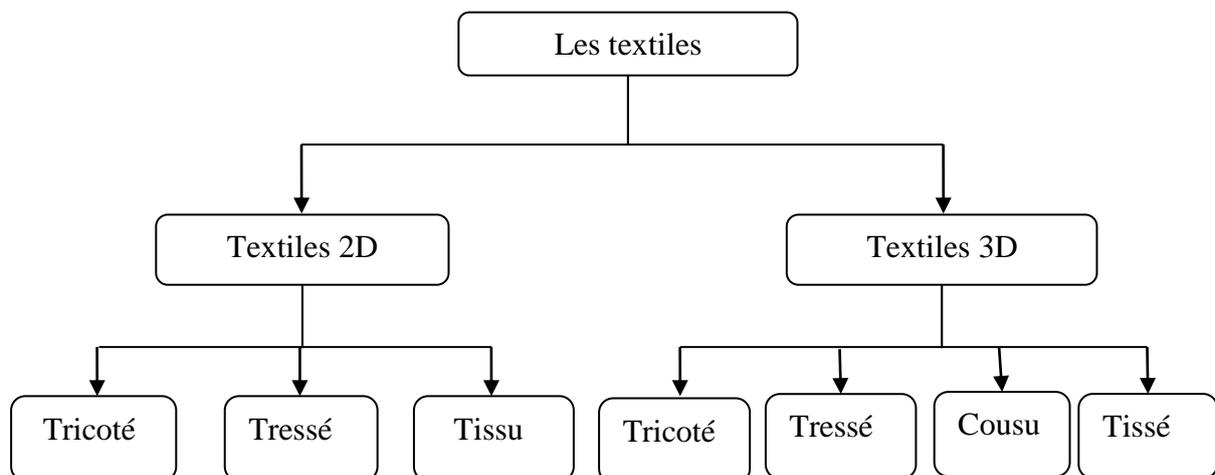
- ✓ Aérospatial
- ✓ Aéronautique
- ✓ Défense
- ✓ Sport
- ✓ Biomécanique

Dans tous ces domaines, la portabilité, la rigidité et la résistance du matériau sont toujours cruciales.

### **I.3. Les matériaux composites à renfort tissu :**

#### **I.3.1. Les composites textiles :**

Les composites à renforts textiles sont une sous-classe de matériaux composites où le renforcement est un matériau textile constitué d'un réseau de fibres naturelles ou artificielles généralement disposés en mèches ou fils [9].



**Figure I.8. Types des composites textiles [9].**

Il existe deux types de composite textile :

- **A) Les bidimensionnelles (2D) :**

Dans les préformes bidimensionnelles, les mèches sont continuées, enchevêtrées, orientées au moins selon deux directions et étendues dans le plan. Ce qui donne à la préforme une épaisseur très petite par rapport à ces dimensions planes. La majorité des préformes textiles bidimensionnelles sont les tissés, les tricotés et les tressés dont les moyens et les modes de tissage, diffèrent d'un type à l'autre [10].

- **B) Les tridimensionnelles (3D) :**

Les préformes tridimensionnelles assurent le transfert d'effort dans les trois directions de l'espace. Les principales préformes textile à trois dimensions sont : les tricotés, les tressés, les cousus et les tissés [9].

### **I.3.2. Les tissus :**

Les tissus sont utilisés dans les composites depuis plusieurs années. Ils sont Constitués généralement d'au moins deux types de mèches entrelacées orthogonalement Selon les deux directions chaîne et trame[1].

Les tissus est constitué par[11] :

- Fils de chaîne : les fils parallèles à la longueur du tissu.
- Fils de trame : les fils perpendiculaires à la longueur du tissu.

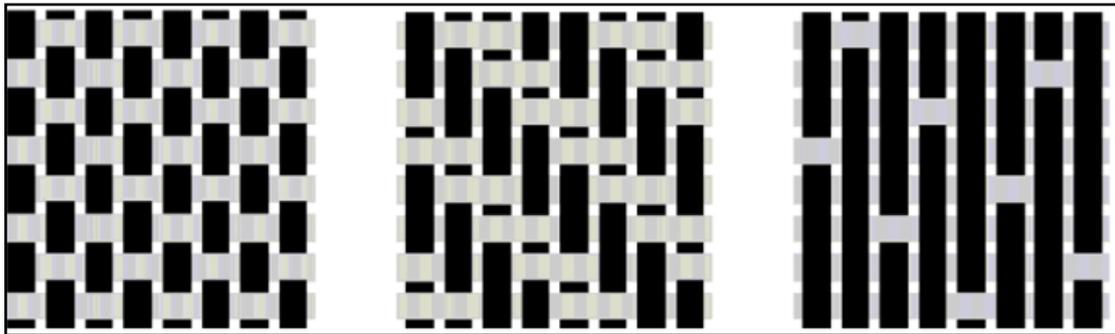
### **I.3.3. Renfort tissés :**

Ces tissus sont fabriqués sur métier à tisser par entrelacement de deux fils de directions différentes : la chaîne et la trame. Chaîne dans la longueur du tissu et trame pour le fil transverse qui est entraîné par la navette afin de former le motif de tissage. Le mode d'entrecroisement de ces fils est appelé armure [12]. Nous pouvons distinguer le renfort tissé par un deux paramètres sont : les armures, ses mèches[13].

#### **I.3.3.1. Les armures :**

Nous avons un que l'armure est la représentation de l'entrelacement des fils et des duites[14]. Ou cet entrecroisement de mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Nous avons aussi vu qu'il existait trois grandes familles de tissu simples [13]:

- a) **Les Taffetas** : Le fil de trame passe alternativement au-dessus puis au-dessous de chaque mèche de chaîne.
- b) **Le sergé (n x m)** : Le fil de trame passe au-dessus de m fils de chaîne, chacun passant à son tour sur n fils de trame.
- c) **Le satin de(n)** : Chaque fil de trame flotte au-dessus de (n-1) fils de chaîne[15].



**Figure I.9. Armures pour un renfort tissé 2D (taffetas, sergé, satin)[12].**

### **I.3.3.2. Les mèche :**

Les mèches à partir desquelles sont tissés les renforts sont-elles mêmes constituées de milliers voire dizaine de milliers de fibres. Une fibre est un solide ayant une dimension privilégiée, on parle aussi de solide à une dimension. La longueur des fibres utilisées dans les matériaux composites varie de quelques mm (fibres courtes) à quelques km (fibres continues), alors que leur diamètre est généralement de l'ordre 1 à 30  $\mu\text{m}$ . Par définition, une mèche est un assemblage de fibres plus ou moins cohérentes entre elles suivant le mode de fabrication.

Pour caractériser une mèche plusieurs éléments sont nécessaires :

- Le matériau, et le type d'assemblage des fibres.
- La masse linéique donnée en tex (1 tex = 1g/km).
- La rigidité, en Newton.
- La ténacité, ou résistance à la rupture en traction, en Newton [12].

### **I.3.4. Les fibres de verre :**

Les fibres de verre contiennent dans leurs composés de nombreuses combinaisons différentes et ont de nombreux types, mais le type le plus courant et utilisé est le verre E.

C'est une composition avec un taux de trioxyde de bore B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inférieur à 5 % en masse pour des applications de renforts classiques et de résines thermoplastiques ou thermodurcissables. Il existe deux autres types de verre E : type E avec un taux de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 5 et 10 % en masse à usage électronique et type E-CR sans B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [13].

/	Type E	Type C	Type A	/	Type E	Type C	Type A
Silice SiO <sub>2</sub>	52-62	64	72	Oxyde de fer Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05-0.8	-	-
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12-16	4	0.3	Oxyde de titane TiO <sub>2</sub>	0-1.5	-	-
Chaux CaO	16-25	8	10	R <sub>2</sub> O	0-2	-	-
Magnésie MgO	0-5	3	2.8	Fleur F <sub>2</sub>	0-1	-	-
Oxyde de sodium Na <sub>2</sub> O	-	14	14.2	Oxyde de potassium K <sub>2</sub> O	-	1	-
Oxyde de bore B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-10	6	-	trioxyde de soufre SO <sub>3</sub>	-	-	0.6

**Tableau I.1. Compositions massiques principales des fibres de verre (%) [13].**

#### **I.4. Les polymères :**

Dans cette étude la matrice utilisée est de type polymère thermoplastique. Les thermoplastiques ont actuellement un taux de croissance supérieur à celui des résines thermodurcissables, en raison de la nécessité du recyclage des composites et de leur déchets. En fait, les thermoplastiques peuvent être refondu et recyclé, et même la production de ces matériaux composites peut être plus importante car il suffit de refroidir la pièce et de ne pas attendre la fin Cycle de polymérisation[16].

<b>Propriétés du polypropylène</b>	
<b>Densité</b>	0,905
<b>Température de fusion</b>	165 – 170 °C
<b>Module élastique</b>	1,0 – 1,4 GPa
<b>Limite d'élasticité</b>	25 – 38 MPa
<b>Déformation à la rupture</b>	300%
<b>Coefficient de dilatation</b>	175* 10 <sup>-6</sup> °C
<b>Température de mise œuvre</b>	190 – 285 °C

**Tableau I.2. Les propriétés de polymère PP [16].**

### **I.5. Conclusion :**

Les matériaux composites sont des matériaux plus légers permettant une flexibilité et une facilité dans plusieurs secteurs. Leur légèreté et leur solidité résultantes de l'assemblage de deux matériaux non miscibles qui seuls ne peuvent pas se prévaloir de telles propriétés. L'atout incontestable des composites à matrice organique est leur aptitude à être conçus à « la carte », en jouant notamment sur les propriétés de la résine qui peuvent être améliorées grâce à des additifs, la nature des fibres de renfort (carbone, verre) et l'orientation des fibres dans la pièce composite. Ainsi, on peut concevoir des matériaux quasiment « sur mesure » en les mettant en forme via une multitude de procédés (moulage, compression et formage, injection, etc.)

Dans les matériaux composites à renfort textile, le choix du type de matrice et de renfort, ainsi que l'arrangement des fibres sont fonction des propriétés finales recherchées (propriétés mécaniques, aspect de surface). Par contre, le choix de la mise en œuvre dépend de la pièce à réaliser et de sa géométrie[17].

# Chapitre II:

*Etude bibliographiques sur  
les propriétés élastiques des  
composites à renfort en textile*

## **II.1. Introduction :**

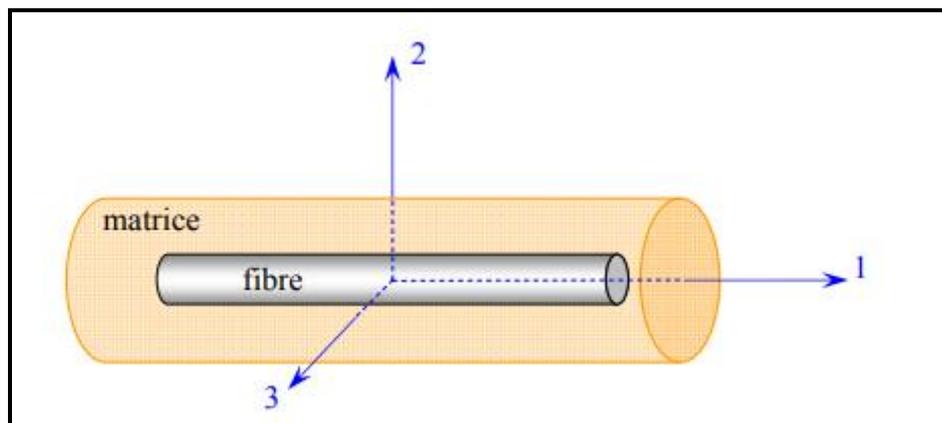
Dans ce travail, nous identifierons la première approche de la mécanique des renforts tissés à partir de matériaux composites qui sont utilisés dans la mécanique des hautes performances tels que les plans orthopédiques.

Dans ce chapitre, nous examinerons les techniques de mesure de base ou principales qui sont utilisées pour étudier le comportement mécanique des composites tissés et le développement du comportement élastique.

## **II.2. Propriétés élastiques d'un matériau unidirectionnel :**

### **II.2.1. Un matériau unidirectionnel :**

La cellule élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel peut être considérée comme constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice. Le matériau est alors appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse [3].



**Figure II.10. Matériau composite unidirectionnel.**

### **II.2.2. La matrice de rigidité et de souplesse :**

La loi de Hooke s'écrit suivant l'une des deux formes matricielles [3]:

- **La forme directe :**

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22}-C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

- La forme inverse

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

### II.2.3. Les module de l'ingénieur :

Les propriétés élastiques du matériau composite unidirectionnel dépendent de 5 Constante indépendante :

- Les expressions des modules en fonction des constantes de rigidité sont[3].

$$E_L = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22}+C_{23}} \qquad \nu_{LT} = \frac{C_{12}}{C_{22}+C_{23}}$$

$$E_T = C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22} - 2C_{23}) + C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}$$

$$\nu_{TL} = \frac{C_{12}(C_{23}-C_{22})}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}} \qquad G_{LT} = C_{66}$$

(II.3)

- Les expressions des modules en fonction des constantes de souplesse sont[3]:

$$E_L = \frac{1}{S_{11}} \qquad \nu_{LT} = -\frac{S_{12}}{S_{11}}$$

$$E_T = \frac{1}{S_{22}} \qquad \nu_{TL} = -\frac{S_{12}}{S_{22}} \qquad G_{LT} = \frac{1}{S_{66}}$$

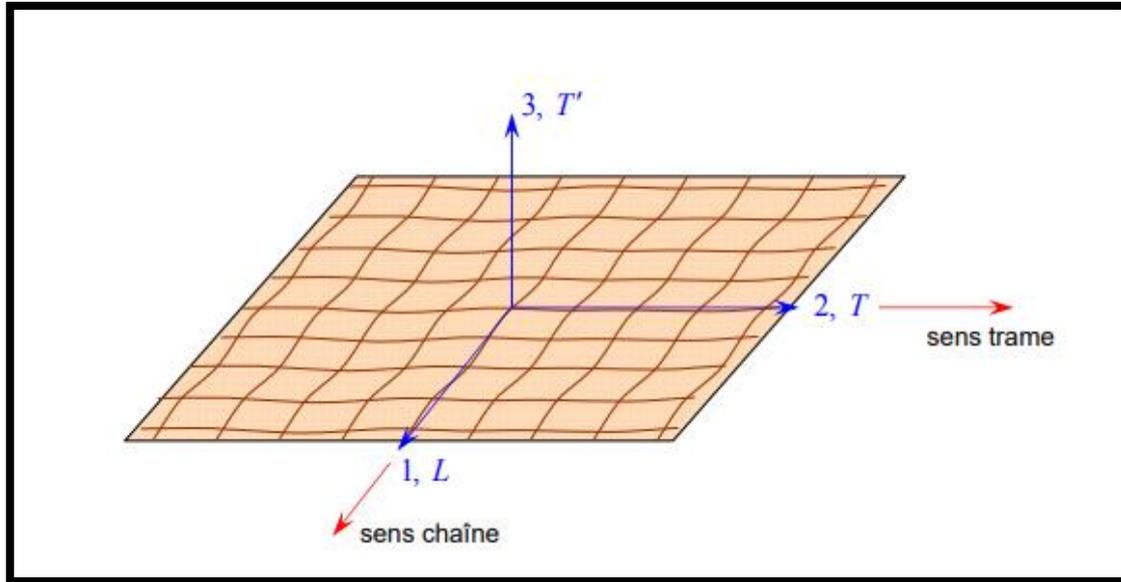
(II.4)

### II.2.4. Propriétés élastiques d'un matériau orthotrope dans le repère local :

#### II.2.4.1. Un matériau orthotrope :

## *Chapitre II Etude bibliographiques sur les propriétés élastiques des composites à renfort tissu*

Un matériau monoclinique suivant deux plans perpendiculaires est dit orthotrope. De plus, un matériau qui possède deux plans de symétries perpendiculaires possède obligatoirement le troisième et ce type de matériau est dit orthotrope. Un matériau orthotrope est caractérisé par 9 constantes élastiques indépendantes si les plans de symétries sont connus[4].



**Figure II. 11. Couche de matériau composite orthotrope [3].**

### II.2.4.2. Matrices de rigidité et de souplesse :

- **La loi de Hooke s'écrit suivant l'une des deux formes matricielles la forme directe [3]:**

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

- **La forme inverse :**

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

**II.2.4.3. Le module de l'ingénieur :**

Le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope peut être décrit par les 9 modules indépendants :

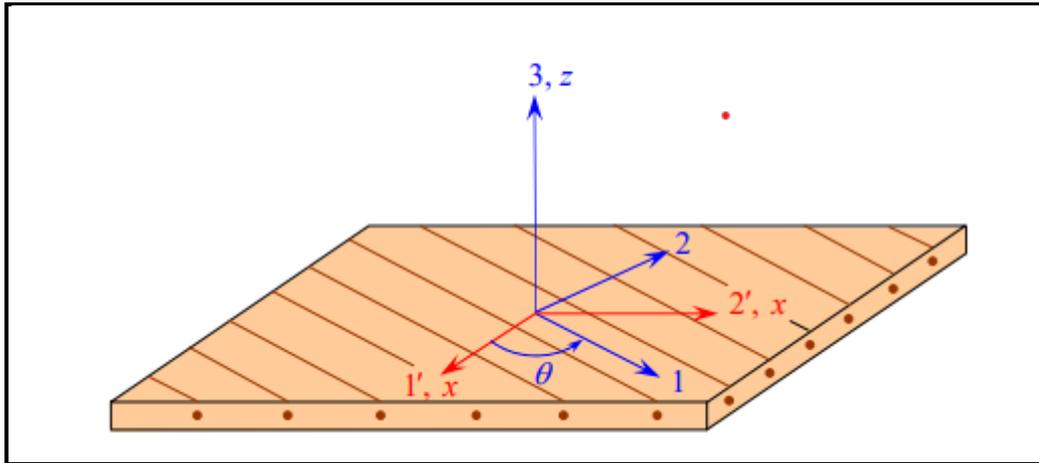
- ✓ **Modules d'Young** :  $E_L ; E_T , E_{T'}$
- ✓ **Coefficients de Poisson** :  $\nu_{LT} ; \nu_{LT'} ; \nu_{TT'}$
- ✓ **Modules de cisaillements** :  $G_{LT} ; G_{LT'} ; G_{TT'}$

Donc la matrice s'écrit à la forme suivant [3] :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{LT'}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TT'}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT'}}{E_L} & -\frac{\nu_{TT'}}{E_T} & \frac{1}{E_{T'}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TT'}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT'}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \tag{II.7}$$

**II.3. Propriétés élastiques d'un matériau orthotrope dans le repère hors axes principal[3],[7] :**

Le comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel ou tissu, exprimé dans les directions principales étant exposé précédemment: un axe suivant la direction des fibres ou de la chaîne, les deux autres axes étant orthogonaux. Or, nous avons vu que les stratifiés étaient élaborés par couches successives, dont la direction des fibres ou de la chaîne est décalée d'une couche à l'autre.



**Figure II.12. Axes principaux (1, 2, 3) d'une couche de stratifié et axes de référence[3].**

Les matrices de rigidité  $C'$  et la matrice de souplesse  $S'$ , exprimées dans la base (1', 2', 3), sont obtenues en appliquant aux matrices de rigidité et de souplesse, rapportées à la base (1, 2, 3). Pour appliquer ici ces relations de changement de base (1, 2,3) à (1' ,2' ,3') se fait dans ce cas présente par une rotation d'angle  $(-\theta)$  :

➤ **Relations de la matrice de rigidité :**

$$C' = T_{\sigma}^{-1} C T_{\varepsilon} \tag{II.8}$$

➤ **Relations de la matrice souplesse**

$$S' = T_{\sigma}^{-1} S T_{\sigma} \tag{II.9}$$

La matrice de rigidité  $C'$ , et de souplesse  $S'$  exprimées dans la base (1',2',3') s'écrivent sous la forme :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & A_{26} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & 0 & 0 & A_{36} \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & A_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{45} & A_{55} & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{36} & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \tag{II.10}$$

➤ **L'expression des constantes de rigidité dans le système d'axe (1',2',3'). Pour un renfort tissu :**

$$C'_{11} = C_{11} \cos^4 \theta + C_{22} \sin^4 \theta + 2(C_{12} + 2C_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

**Chapitre II Etude bibliographiques sur les propriétés élastiques des composites à renfort tissu**

---

$$\begin{aligned}
 C'_{12} &= (C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + C_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\
 C'_{13} &= C_{12} \cos^2 \theta + C_{23} \sin^2 \theta \\
 C'_{14} &= 0 & C'_{15} &= 0 \\
 C'_{16} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
 C'_{22} &= C_{11} \sin^4 \theta + C_{22} \cos^4 \theta + 2(C_{12} + 2C_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
 C'_{23} &= C_{12} \sin^2 \theta + C_{23} \cos^2 \theta \\
 C'_{24} &= 0 & C'_{25} &= 0 \\
 C'_{26} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
 C'_{33} &= C_{22} & C'_{34} &= 0 & C'_{35} &= 0 \\
 C'_{36} &= (C_{12} - C_{23}) \sin \theta \cos \theta \\
 C'_{44} &= \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \cos^2 \theta + C_{66} \sin^2 \theta \\
 C'_{45} &= \left[ C_{66} - \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \right] \sin \theta \cos \theta & C'_{46} &= 0 \\
 C'_{55} &= \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \sin^2 \theta + C_{66} \cos^2 \theta & C'_{56} &= 0 \\
 C'_{66} &= [C_{11} + C_{22} - 2(C_{12} + C_{66})] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + C_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
 \end{aligned}$$

**(II.11)**

➤ **L'expression des constantes de souplesse dans le système d'axe (1',2',3'). Pour un renfort tissu :**

$$\begin{aligned}
 S'_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + S_{22} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\
 S'_{12} &= (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\
 S'_{13} &= S_{13} \cos^2 \theta + S_{23} \sin^2 \theta \\
 S'_{14} &= 0 & S'_{15} &= 0 \\
 S'_{16} &= [2(S_{11} - S_{12}) - S_{66}] \sin \theta \cos^3 \theta + 2(S_{12} - S_{22}) + S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
 S'_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + S_{22} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\
 S'_{23} &= S_{13} \cos^2 \theta + S_{23} \sin^2 \theta \\
 S'_{24} &= 0 & S'_{25} &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S'_{26} &= [2(S_{11} - S_{12}) - S_{66}] \sin^3 \theta \cos \theta + (2(S_{12} - S_{22}) + S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
 S'_{33} &= S_{33} & S'_{34} &= 0 & S'_{35} &= 0 \\
 S'_{36} &= 2(S_{13} - S_{23}) \sin \theta \cos \theta \\
 S'_{44} &= 2(S_{22} - S_{23}) \cos^2 \theta + S_{66} \sin^2 \theta & S'_{46} &= 0 \\
 S'_{55} &= 2(S_{22} - S_{23}) \sin^2 \theta + S_{66} \cos^2 \theta & S'_{56} &= 0 \\
 S'_{66} &= 2[2(S_{11} + S_{22} - 2S_{12}) - S_{66}] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
 \end{aligned}$$

**(II.12)**

#### **II.4. Modèles d'homogénéisations analytiques :**

Les modèles d'homogénéisation analytiques permettent d'estimer les propriétés élastiques effectives des composites à partir de la connaissance de la microstructure (propriétés des constituants, leurs formes, positions et orientations). La précision de ces modèles peut être évaluée par des méthodes numériques[18].

##### **II.4.1. Bornes Vogt et Reuss :**

Les approximations de Voigt (1889) et Reuss (1929) ont été obtenues en modélisant les propriétés élastiques (tenseur de rigidité  $C$  ou de souplesse  $S$ ) de matériaux composites[19]:

- **Borne de Voigt** : On appelle encore approche en déformation.[20]pour les tenseurs de déformation  $C^v$  nous obtenons par une simple loi de mélanges [21].

$$C^v = \sum_{i=0}^n f_i C^i \quad \text{(II.8)}$$

- **Borne de Reuss** : On Appelle aussi approche en contrainte.[20]pour le tenseur de contrainte  $S^R$  nous obtenons loi de mélanges [21].

$$C^R = (S^R)^{-1} = (\sum_{i=0}^n f_i S^i)^{-1} = (\sum_{i=0}^n f_i (C^i)^{-1})^{-1} \quad \text{(II.9)}$$

##### **II.4.2. Modèle de Mori-Tanaka :**

Le modèle de Mori-Tanaka est défini pour un milieu hétérogène du type matrice renforcée (milieu particulaire), constitué d'inclusions réparties de manière isotrope se comportant, en moyenne, comme des inclusions isolées dans une matrice infinie [21].

Le tenseur de localisation  $A^i$ s'écrit [21] :

## **Chapitre II Etude bibliographiques sur les propriétés élastiques des composites à renfort tissu**

---

$$\mathbb{A}^i = \mathbb{T}^i (\sum_{j=0}^n f_j \mathbb{T}^j)^{-1} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$\mathbb{T}^i = [\mathbb{I} + \mathbb{S}_{Esh}^i (\mathbb{C}^0)^{-1} (\mathbb{C}^i - \mathbb{C}^0)]^{-1} \quad (\text{II.11})$$

Ou  $\mathbb{S}_{Esh}^i$  représente le tenseur d'Eshelby. Nous obtenons l'expression du tenseur de propriétés effectives  $\mathbb{C}^{MT}$  :

$$\mathbb{C}^{MT} = \mathbb{C}^0 + \sum_{i=1}^n f_i (\mathbb{C}^i + \mathbb{C}^0) \mathbb{T}^i (\sum_{j=1}^n f_j \mathbb{T}^j)^{-1} \quad (\text{II.12})$$

$f_i$  : Est la fraction volumique de l'inclusion i (rapport de son volume sur le volume du VER)

$\mathbb{C}^i$  : Le tenseur de rigidité

$\mathbb{I}$  : Est la tenseur identité.

### **II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les lois de comportement élastiques de matériaux composites. En premier lieu, on a présenté les relations qui définissent la rigidité et la souplesse d'un composite à renfort unidirectionnel, tout en passant par celles liées aux matériaux orthotropes, que ce soit dans le repères local ou hors axes principaux. Cette partie nous permet de déduire également les propriétés élastiques du matériau en question. Finalement, quelques approches analytiques d'homogénéisation (Voigt, Reuss et Mori-Tanaka) ont été présentées dans un cadre de calcul des champs moyens (MF).

# Chapitre III :

*Elaboration du matériau et*

*Caractérisation expérimentale*



### **III.1. Introduction :**

Les matériaux composites doivent répondre aux exigences de contraintes mécaniques, en choisissant judicieusement les renforts et la matrice. L'utilisation des matériaux composites dans des domaines bien spécifiques (aéronautique, automobile, aérospatiale, isolation, etc...), représente un avantage considérable dans la mesure où , nous pouvons concevoir un matériau composite qui répond aux exigences des contraintes [8].

Ce chapitre est une synthèse des travaux expérimentaux réalisés sur ce sujet. Afin de réaliser ce travail, nous avons choisi une tresse de fils de verre utilisée comme renfort bidimensionnel. La nappe de verre est imprégnée de polypropylène par le procédé de moulage par compression. L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement mécanique du composite, à cet effet, différents essais mécaniques seront réalisés pour imiter la résistance en traction et en flexion de matériau préparé. .

## III.2. Matériels et méthodes :

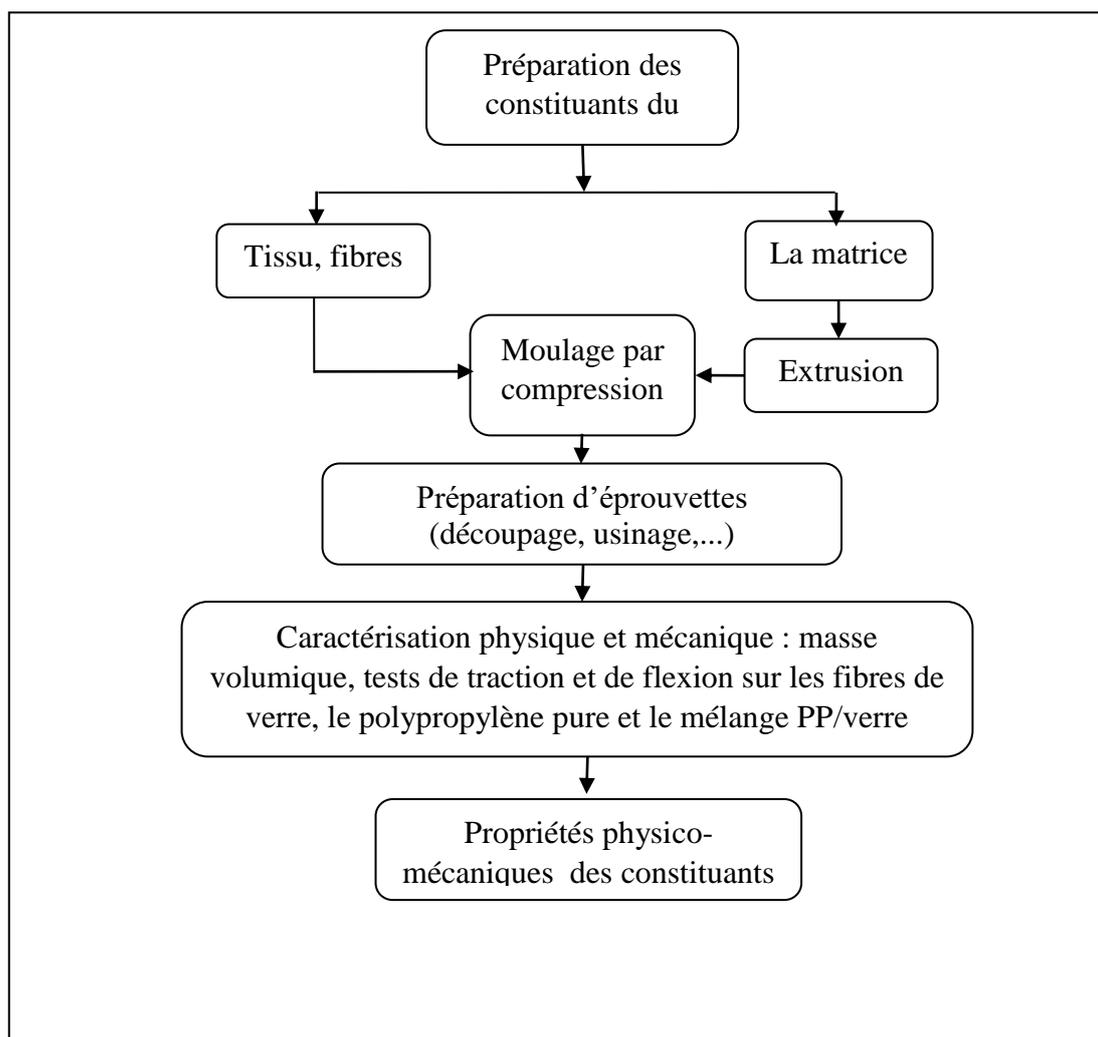


Figure III.13. Plan expérimental.

### III.2.1. Caractérisation mécanique des constituants :

#### III.2.1.1. La résine :

La résine utilisée dans cette étude est classée en tant que type de polymères, qui est appelée le polypropylène.

Il a une couleur translucide au blanc, est qui porte un nom industriel TASNEE PP H4260M, et un nom chimique Polypropylène Homopolymère, ces informations tirées de la fiche technique jointe au fabricant Saudi Polyolefin Company (SPC).

Les propriétés physiques et chimiques sont :

- La forme : granulés solides

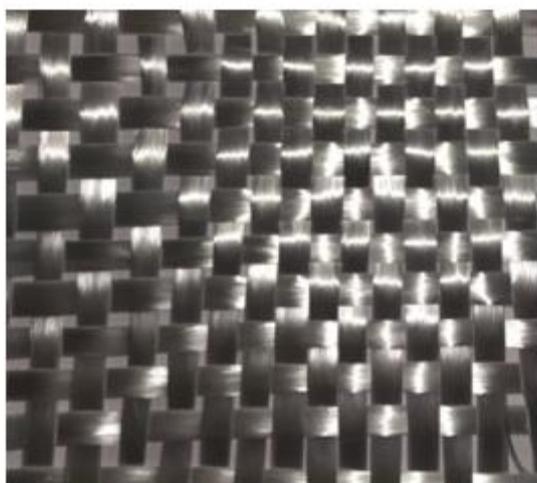
- La densité :  $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
- Point de fusion :  $140 - 170 \text{ (}^\circ\text{C)}$



**Figure III. 14. Granulés de Polypropylène.**

### III.2.1.2. Le renfort :

La fibre de verre utilisé dans cette étude et sous forme de tissu de taffetas, Les fils sont entrelacés d'une manière spéciale de sorte que le fil de trame passe alternativement au-dessus puis au-dessous de chaque fil de chaîne. س



**Figure III.15. Tissu de fibre de verre.**

#### ➤ La fraction volumique de tissu de verre :

Pour calculer la fraction volumique de tissu Nous savons que :

$$V_f = \frac{v_{tissu}}{v_T} \Rightarrow \frac{h_{tissu}bnl_0}{bnh_Tl_0} \Rightarrow \frac{h_{tissu}}{h_t} \Rightarrow V_f = 0.28\%$$

On pose:

- $V_f$  : La fraction volumique de fibre ;
- $v_{tissu}$  ;  $v_T$  : Le volume de tissu et de composite (pp/verre) respectivement ;
- $h_{tissu}$  ;  $h_T$  : Le Hauteur de tissu et de composite ;
- $b$  : Largeur de fil ;
- $l_0$  : Longueur ;
- $n$  : Nombre de fil chaine ou trame.

Considérant :

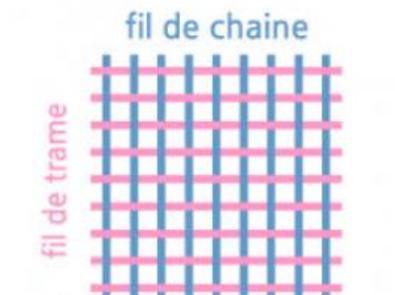


Figure III. 16. Les fils de chaine et de trame.

➤ **Le module de Yong expérimentale :**

Pour obtenir le module d'élasticité, on a réalisé le test de traction sur les fils de verre  $D=0.45$  mm,  $L=150$  mm. La machine d'essai c'est une machine universelle de modèle Instron 5567 en utilisant une capture de 5KN. Le dispositif de fixation est conçu spécialement pour arrondir la surface de contact et éviter tout genre de glissement. Trois fils ont été testés avec une vitesse de déplacement  $v=1$  mm/min, figure III.7.

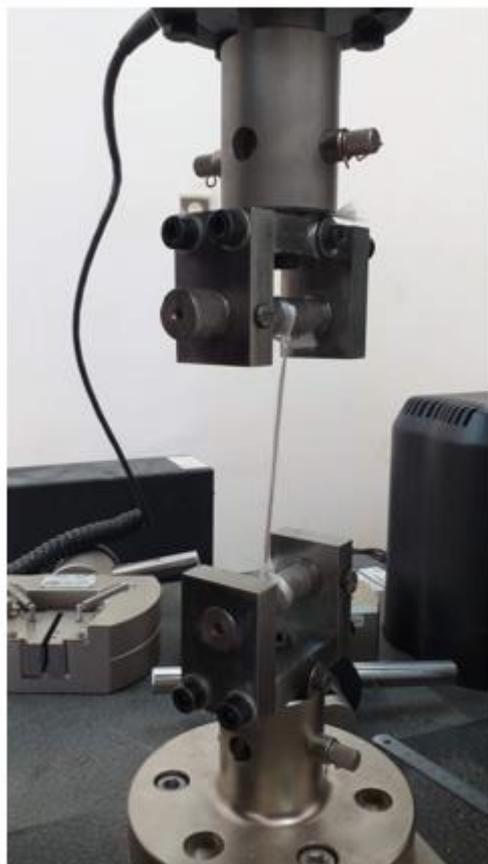


Figure III. 17. Essai traction de fil de verre, dispositif de fixation.

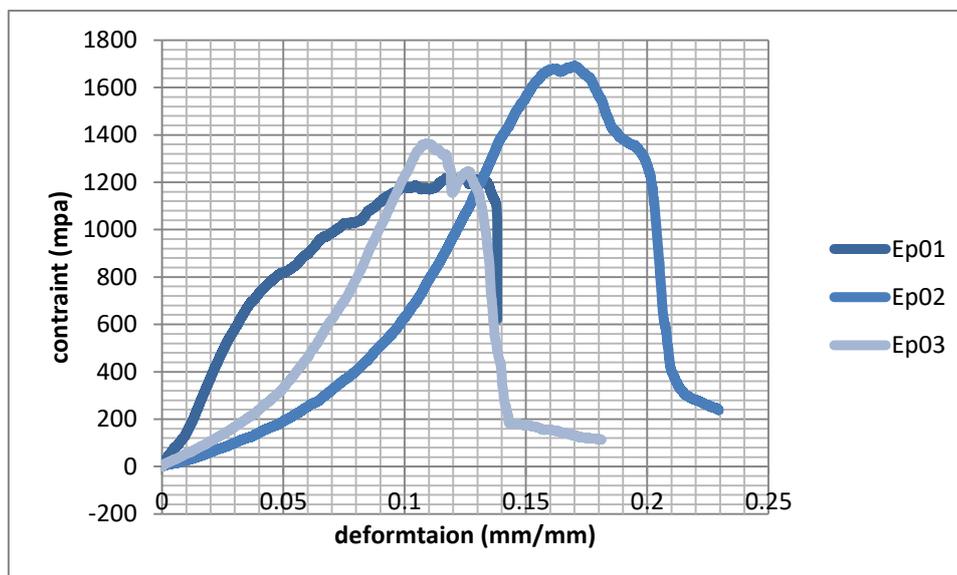


Figure III.18. Graphe contrainte/déformation d'essai traction sur fil de verre.

La figure (III.8) représente la réponse en traction de trois fils en verre. Les courbes obtenues montrent une allure qui passe par 3 zones. La première zone est la partie élastique du

matériau dont la déformation est réversible. La deuxième est non linéaire dite plastique où le fil atteint la valeur de contrainte maximale et la troisième partie débute par la diminution de la contrainte jusqu'à la rupture des fibres.

/	Ep01	Ep02	Ep03	moy
<b>Contrainte à la rupture (Mpa)</b>	1218.11	1690.68	1361.85	1423.54
<b>Déformation à la rupture (mm/mm)</b>	0.117	0.170	0.109	0.132
<b>module de Yong (Gpa)</b>	18.68	18.53	11.53	15.19

**Tableau III.3. Module de Yong de traction au renfort verre.**

Selon loi de Hook, le module de Yong moyen obtenu par l'essai traction de ce matériau est  $E_m = 15.19$  (Gpa).

### III.2.2. Préparation de matériaux :

La matrice a été préparé par le moyen d'une extrudeuse du modèle (thermo Scientific). Cette appareil est un rhéomètre à couple moderne et digitalisé, équipé d'une commande par ordinateur de qualité supérieure[22]. Et utilisé pour produire des composants en plastique (PP, PVC, PA, PU...).

Les particules de PP sont versées dans l'entonnoir, qui est lié à trois compartiments (zones) chauffés indépendamment (ayant 3 températures de consigne). Le mélange avance sous l'action de la pression de la vis de l'extrudeuse et arrive à une filière ronde chauffée généralement à la même température de la zone 3. Le filament de PP extrudé est découpé en particules (compounds) de taille contrôlée (longueur 1 mm et de diamètre 2). Le tableau suivant récapitule quelques détails de cette opération.

$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	V (mm/min)	$L_{granulé}$ (mm)	D (mm)
160	170	180	180	3	1	2

**Tableau III.4. Paramètres de l'extrusion et tailles de particules.**



**Figure III.19. Granulés de Polypropylène extrudé.**

### III.2.3. Moulage par compression :

Le matériel utilisé dans ce processus est :

- Moule de taille : L=180 mm ; l=130 mm ; e=4 mm
- Une balance de laboratoire de capacité maximale 600 g, et de précision de lecture 0.001 g.
- Presse à chaud, pression maximale 400 bar et une température de chauffage peut atteindre 250 °C. Cette appareil est sous la référence GM/01/2019 [23].
- Une paire de ciseaux.

Les plaques ont été préparées à l'aide d'une matrice de polypropylène extrudé de taille maximale de 2 mm<sup>2</sup> et des fibres verre sous forme d'un tissu de taffetas. Les plaques composites ont été obtenues par compression à chaud. La masse de granulé de PP total à utiliser est calculée sur la base de volume autorisé, elle est répartie en deux quantités. Dans le moule, nous disposons le tissu de verre entre les deux couches de PP. Le tableau III.5 indique les conditions de traitement utilisées dans le moulage des plaques.

/	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	P (bar)	T (min)
<b>Préchauffage</b>	150	150	-	-
<b>Compression de chauffage 1</b>	180	180	100	3 min
<b>Compression de chauffage 2</b>	180	180	200	4 min
<b>Refroidissement/ compression</b>	30	30	200	18 heures

Tableau III.5. Conditions de traitement de l'extrusion et préparation des plaques.

### III.2.4. Préparation d'éprouvettes :

Les éprouvettes ont été préparées par deux processus de découpage. Le premier concernant des éprouvettes rectangulaires destinées aux tests de flexion (par tronçonneuse à disque). Des éprouvettes haltères sont taillés par une fraiseuse CNC (F1-EMCO), Figure III.20. Les forme et les tailles des éprouvettes sont données sur les schémas, Figures III.21, III.22, III.23 et le tableau III.6.



Figure III.20. La machine de CNC utilisé.

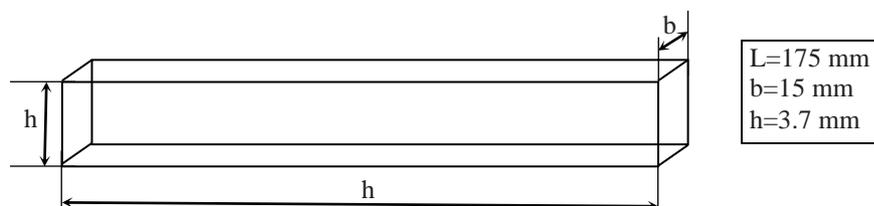


Figure III.21. Les dimensions d'échantillon.



Figure III.22. Echantillons de PP et PP/verre pour les tests de flexion.



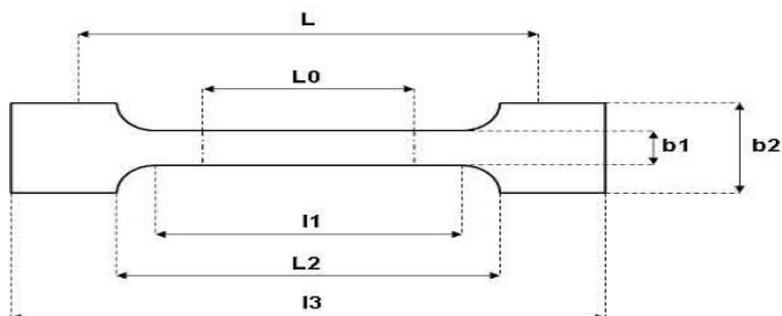


Figure III.23. Eprouvettes de composites PP/verre

$L_0$ (mm)	$l_1$ (mm)	$l_3$ (mm)	$b_1$ (mm)	$b_2$ (mm)
50	60	150	10	20

Tableau III. 6 Dimensions d'éprouvettes de traction.

### III.2.5. Les défauts de fabrication

Après le processus de production, certains défauts sont apparus dans les matériaux produits. Nous avons essayé de les réduire et de trouver des solutions pour ne pas affecter les résultats, les défauts de fabrication se résument en :

- Déformation de tissu (léger glissement des fils de chaîne et de trame l'hors de compression de mélange. Il nous a été difficile de contrôler les espaces à l'intérieur du tissu) voir la figure (III.24) ;
- Des particules de couleurs différentes surgissent au cours de processus de refroidissement ;
- La différence de la quantité d'excès du PP conduit à des plaques avec des tailles différentes (épaisseur).



Figure III.24. Déformation de tissu.

### III.2.6. Caractérisation expérimentale :

Des tests de traction et de flexion ont été réalisés par une machine de traction universelle de la marque Instron 5969. L'objectif principal est d'analyser le comportement de matériau composite à base de polymère et un renfort en tissu de verre. La loi de Hooke et la relation qui lie le déplacement vertical en flexion (la flèche) et la charge appliquée sont utilisées pour déduire les propriétés élastiques du matériau dans une seule direction, équations (III.1) et (III.2).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$\sigma$  : Contrainte de flexion, (MPa).

F : Charge appliquée, (N)

L : Distance entre les portées, (mm)

b : Largeur de l'éprouvette, (mm)

h : Epaisseur de l'éprouvette, (mm)

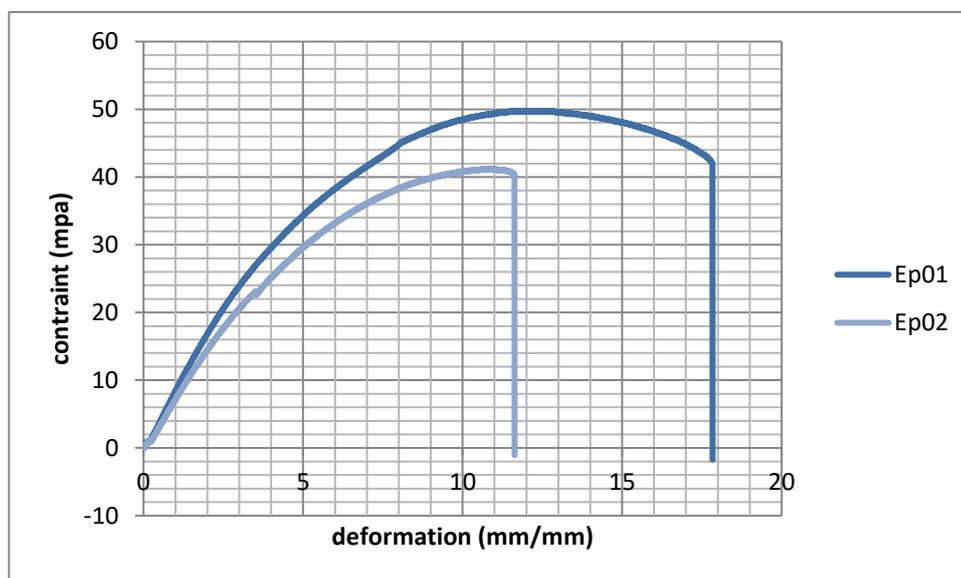
#### III.2.6.1. Les caractéristiques expérimentales de flexion pour la résine pp :

En général l'essai de flexion fait avec une force appliquée perpendiculairement concentrée au milieu à la surface de l'éprouvette. Les dimensions des éprouvettes sont:  $L=17.5 \pm 1$  (mm),  $h=3.5 \pm 0.5$  (mm),  $b=15 \pm 0.4$ (mm). Deux essais de flexion avec des vitesses de

déplacement ont été effectués pour obtenir le module de Young de flexion. On utilise les vitesses  $v_1=3$  mm/min et  $v_2 = 2$  mm/min, Figure III.25.



**Figure III.25. Essai de flexion (Polypropylène).**



**Figure III.26. Courbes de contrainte/ déformation de la matrice PP en essai de flexion.**

La figure (III.26) montre les courbes de contrainte en fonction de déformation pour deux éprouvettes de Polypropylène. Cette figure montre une allure semblable pour les deux éprouvettes. Une partie linéaire est clairement distingué jusqu' à la déformation.

Les résultats obtenus concernant le calcul des modules de Young sont illustrés sur le tableau III.7.

/	Ep01	Ep02	Moyenne
Déformation à la rupture (mm/mm)	17.63	11.21	14.42
Module de Young(Mpa)	8.55	7.36	7.95
Contrainte maximale(Mpa)	50	42	46
contrainte à la rupture (Mpa)	43.05	41	42.02

Tableau III.7. Module de Yong de flexion de PP.

La moyenne du module de Yong de l'essai de flexion est  $E_m = 7.953$  Mpa.

### III.2.6.2. Caractéristiques expérimentales de flexion pour le composite pp/verre :

Les dimensions des éprouvettes sont :  $L=18.5 \pm 1$  mm,  $h=5.5 \pm 1$  mm et  $b=15 \pm 0.4$  mm, trois éprouvettes ont été testés par essai de flexion avec deux valeurs de vitesse  $v_1=3$  mm/min, le dernier est de vitesse  $v_2=2$  mm/min. La figure III.27 représente les courbes de contrainte-déformation du composite PP/verre soumis à la flexion.

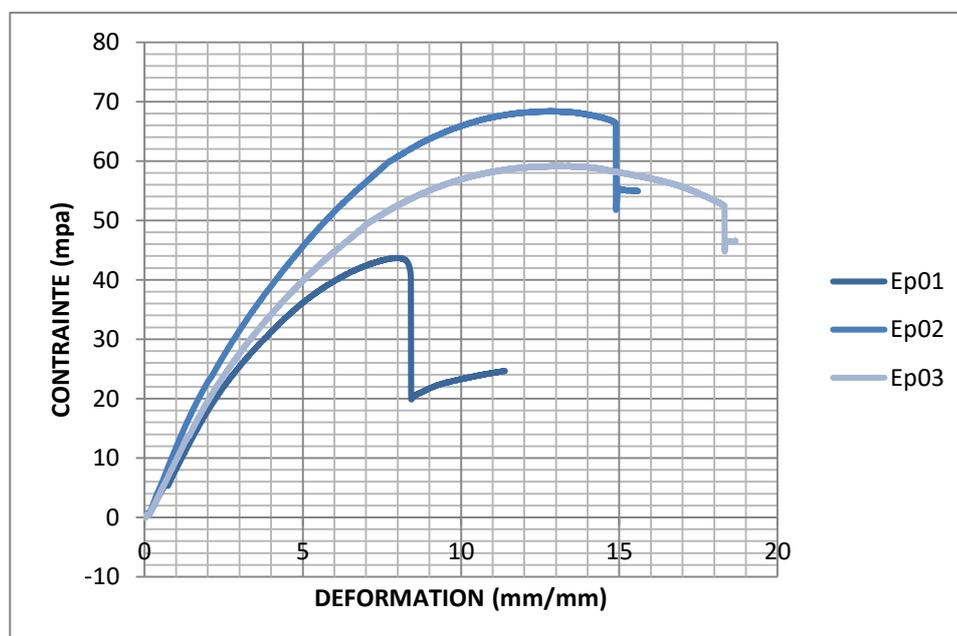


Figure III.27. Courbes contrainte/déformation du composite PP/verre en essai flexion.

Les courbes obtenues ont une forme pareille, presque identique dans la région linéaire. Ce qui facilite le calcul de la propriété élastique du matériau, d'après le tableau III.8, un module de

Young en flexion de l'ordre de 10 GPa est obtenu. Le matériau a montré une résistance à la traction supérieure à 43 Mpa et inférieure à 68 Mpa. Cette nuance de valeurs est liée généralement à la résistance à la traction de la matrice, d'où les propriétés sont plus faibles que celles du tissu.

Le tableau (III.8) récapitule le module de Yong des éprouvette testées, les contraintes maximales et à la rupture ainsi que les déformations correspondantes.

/	Ep01	Ep02	Ep03	moy
<b>Contrainte (Mpa)</b>	16.29	15.69	13.71	/
<b>Déformation (mm/mm)</b>	1.81	1.31	1.39	/
<b>module de Yong (Mpa)</b>	9.00	11.93	9.86	10.26
<b>contrainte maximale(Mpa)</b>	43.63	68.30	59.14	/

**Tableau III.8. Module de Yong pour le composite PP/verre en essai de flexion.**

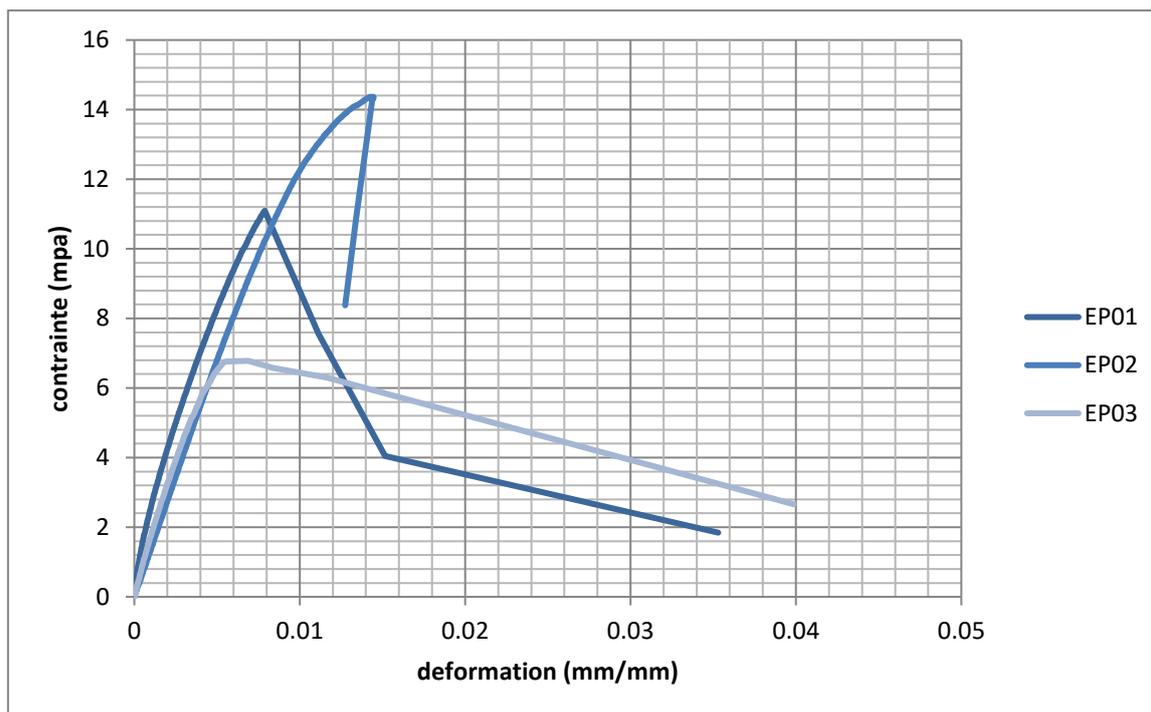
### III.2.6.3. Caractérisation expérimentale en traction de polypropylène :

Des essais sont effectués pour définir le comportement en traction du PP soumis à une vitesse de déplacement constante ( $v=2$  mm/min). Pour une meilleure précision, des extensomètres à contact avec une marge de mesure de 25 mm sont fixés au milieu des éprouvettes, Figure III.25.

Trois éprouvettes ont été taillées avec des dimensions normalisés, tableau (III.6), l'épaisseur  $h=3.5$  mm. La vitesse de déplacement est  $v=2$  mm/min.



**Figure III.28. Essai de traction polypropylène pur.**



**Figure III.29. Courbes de contrainte/ déformation de polypropylène.**

La figure (III. 29) représente les courbes obtenus l'hors des essais de traction. L'allure des courbes montrent un comportement quasi-élastique en dommageable. Ce comportement est justifié par la nature fragile de polypropylène. Rappelons qu'aucun plastifiant n'est ajouté au propylène durant le processus d'extrusion. Deux courbes sont confondues dans la région élastique, ce qui permet de déduire le module d'élasticité avec une bonne précision. Le tableau III.9 illustre les valeurs calculées et quelques propriétés mécaniques pratiques.

/	EP01	EP02	Ep.3	moyenne
<b>Contrainte (Mpa)</b>	6.805	8.777	2.39	5.99
<b>Déformation (mm/mm)</b>	0.003	0.006	0.001	0.003
<b>module de Yong (Gpa)</b>	1.78	1.33	1.72	1.61
<b>contrainte maximale (Mpa)</b>	11.09	14.36	6.78	10.74

**Tableau III.9. Propriétés mécaniques de polypropylène obtenu par essai de traction.**

Une moyenne du module de Yong de l'ordre de 1.61 GPa est obtenue.

#### III.2.6.4. Caractérisation expérimentale en traction de PP/verre :

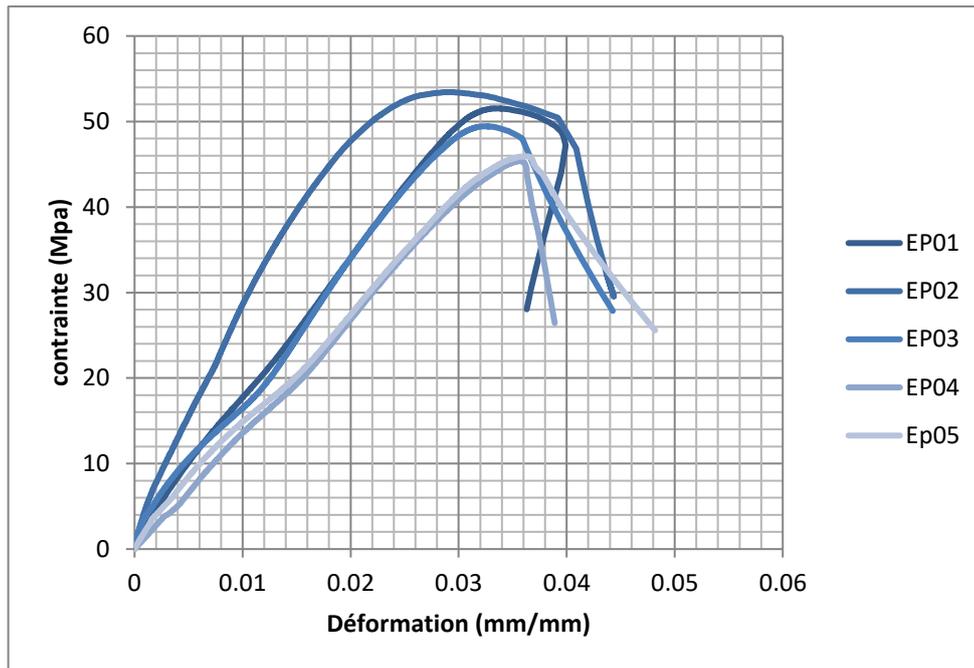
Les mêmes dimensions des éprouvettes précédentes sont utilisées dans l'essai de traction, une épaisseur de 4.3 mm est mesurée. Cinq éprouvettes ont été testées avec une vitesse de 2 mm/min.



**Figure III.30. Essai de traction PP/verre.**



**Figure III.31. Ligne de rupture de PP/verre sous l'effet de traction.**



**Figure III.32. Courbes contrainte/déformation de composite PP/verre de l'essai de traction.**

La figure III.32 représente les réponses en traction de cinq 5 éprouvettes en composites PP/verre. Le comportement de matériau est élasto-plastique avec trois zones de déformation. La première est élastique et qui change la pente après une certaine déformation. Cela est du à l'écart de rigidité qui se manifeste chaque fois les fils de subissent la charge. Donc, la forme de tresse provoque l'allongement progressif des fils dans le chaîne sens longitudinal avec une faible charge. La seconde pente est légèrement supérieure à la première. La première zone est suivie par une petite zone plastique. Finalement, le matériau atteint une contrainte maximale avant qu'il se rompe pour des contraintes presque les mêmes (45 -50 Mpa), tableau III.10. Au moment de déclenchement de la rupture, les fils de verre restent encore attachés et présentent une certaine résistance à l'allongement. Les valeurs moyennes de module de Young, les contraintes maximales, les contraintes à la rupture et les déformations à la rupture sont récapitulées sur le tableau III.10

	<b>Ep01</b>	<b>Ep02</b>	<b>Ep03</b>	<b>Ep04</b>	<b>Ep05</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Contrainte (Mpa)</b>	2.64	4.684	2.461	3.338	2.204	/
<b>Déformation (mm/mm)</b>	0.001	0.001	0.00049	0.002	0.001	/
<b>Module de Young (GPa)</b>	2.44	4.68	5.02	1.40	2.2	3.15
<b>contrainte maximale (Mpa)</b>	51.00	53.28	49.25	45.03	45.16	/

**Tableau III.10. Module de Young de la composite pp/verre en traction.**

### III.3. Conclusion :

Un matériau composite orthotrope à base de renfort tissu de verre et une matrice de polypropylène a été préparé et analysé. Un procédé délicat de la mise en forme de composite est suivi afin d'arriver à la forme désirée. Les constituants de matériau sont identifiés au préalable avec une série des essais de traction et de flexion.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout du renfort sous forme de tissu améliore considérablement la rigidité de composite. Une augmentation de Young de composite égale au double et une amélioration qui dépasse cinq fois la contrainte à la rupture de la matrice est obtenue avec une fraction volumique de 14% uniquement dans chaque direction (chaîne ou trame) , cela se résume ainsi :

Les contraintes à la rupture sont de l'ordre de :

- 1200 à 1600 Mpa pour les fils de verre.
- 7 à 14 Mpa pour le polypropylène.
- 50 Mpa pour le composite.

Les module de Young de composites et ses des constituants sont :

- Pour le Polypropylène : 1.6 GPa
- Pour les fibre de verre : 15.19 GPa
- Pour le composite PP/verre : 3.15 GPa

# Chapitre IV:

*Modélisation numérique et analytique*  
*de comportement du composite soumis*  
*à une charge de traction*



### **IV.1. Introduction :**

Le principal défi est de comprendre le comportement complexe d'un matériau composite à renfort tissu. Quoique ce type de matériau possède une structure orthotrope, l'effet de croisement des fils a une influence considérable sur les performances des composites.

La modélisation numérique offre la possibilité de tenir en compte l'apport des paramètres géométriques dans le comportement global du matériau, l'état de contraintes et de déformation peut être analysé sur le plan local. En outre, quelques approches analytiques moins coûteuses sont généralement utilisées. Donc, La modélisation micromécanique est intégrée dans la suite de ce travail de master, grâce au modèle de Mori-Tanaka. Seule l'élasticité a été étudiée. A l'aide de ce modèle, nous pouvons déduire les propriétés élastiques de matériau.

### **IV.2. Présentation du logiciel *Digimat* :**

Logiciel *Digimat* est une technologie de modélisation de matériaux multi-échelle de pointe qui accélère le développement de matériaux et de pièces composites pour les fournisseurs de matériaux. Les solutions *Digimat* sont utilisées par les ingénieurs de CAE, les scientifiques des matériaux et les spécialistes des procédés de fabrication des matériaux composites pour prédire avec précision le comportement micromécanique linéaire et non linéaire des matériaux multiphasiques complexes. Le code *Digimat* aide les utilisateurs à concevoir et fabriquer des matériaux et des pièces composites innovants avec une grande efficacité en temps et en coûts. à concevoir et fabriquer des matériaux et des pièces composites innovants avec une grande Efficacité en temps et en coûts.

*Digimat* -MF et *Digimat* -FE sont utilisés à l'échelle microscopique, pour comprendre, prédire les propriétés des matériaux composites.

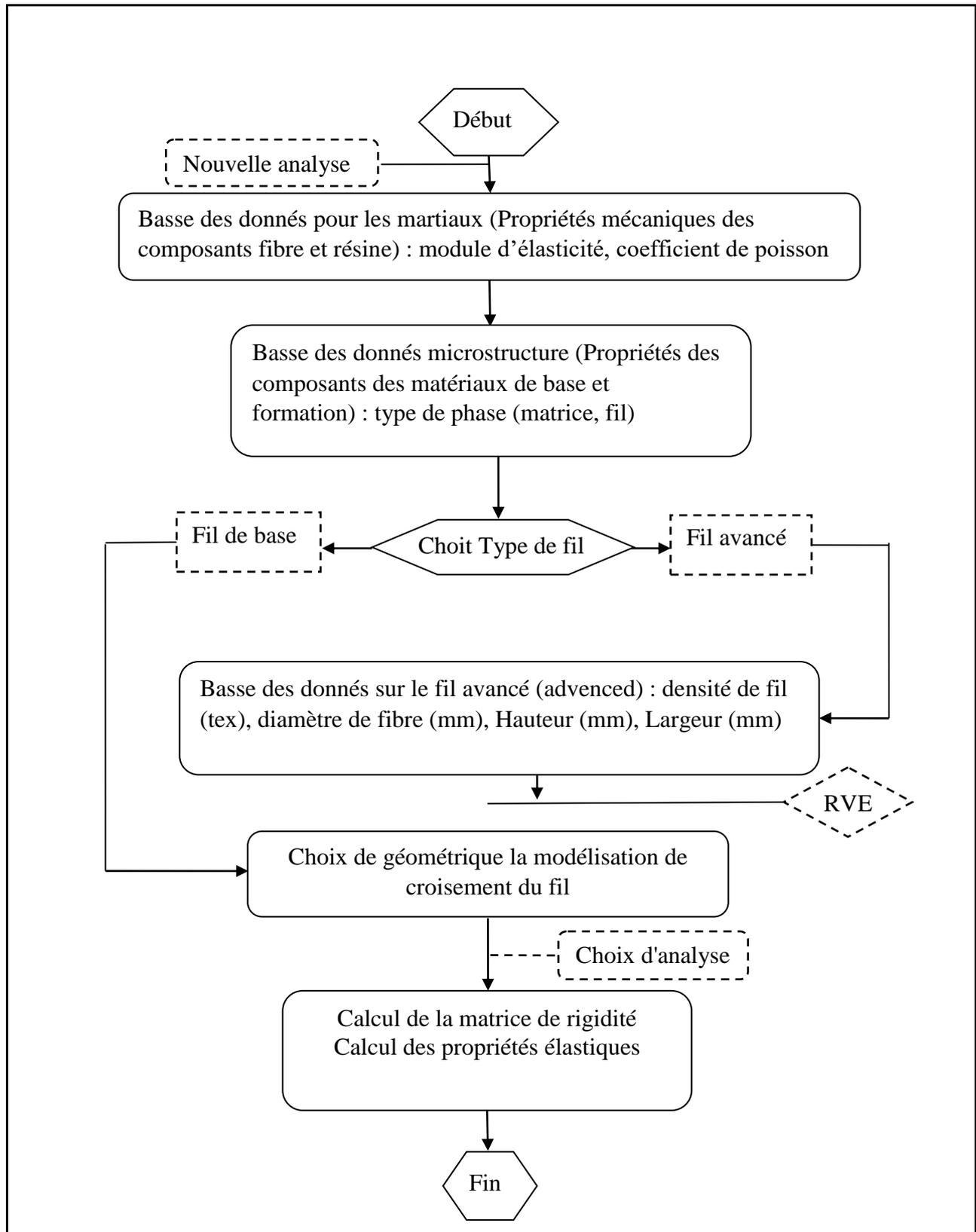
*Digimat* -MF est un logiciel basé sur l'homogénéisation des champs moyens qui vise à prédire le comportement linéaire et non linéaire des matériaux multiphasiques en se basant les propriétés constitutives des matériaux de base telles que la morphologie, le contenu de remplissage, la longueur et le rapport hauteur/largeur et l'orientation. *Digimat* -MF est précis, efficace et très facile à apprendre et à utiliser.

*Digimat*-FE génère des éléments de volume représentatifs (RVE) réalistes (stochastiques) pour une grande variété de microstructures de matériaux (plastiques, caoutchoucs, métaux, graphite, ...etc). Basé sur l'entrée de matériau et la définition de la microstructure. *Digimat*--FE est le module d'homogénéisation par éléments finis[24].

**IV.3. Calcul des propriétés élastiques d'un VER composite à renfort tissu par la méthode des champs moyens (FM) :**

**IV.3.1. Calcul par la méthode Modèle de Moritanaka (*Digmat*MF) :**

Le détail de la modélisation en *Digmat* MF est représenté dans la figure suivante :



**Figure IV. 33. La méthode de modélisation.**

La simulation numérique est réalisée à l'aide de logiciel "Digimat ", Les matériaux qui ont été prélevés étaient du polypropylène sous forme de matrice et de tissu de verre sous forme

## **Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

---

de renfort. Le tableau suivant présente les données sur les matériaux à saisir dans logiciel (la densité, le module de Yong, le coefficient de poisson).

Pour le renfort	Pour la matrice
La densité $d = 2.6$	La densité $d = 0.9$
Le module de Yong $E = 15191.5146$ (Mpa)	Le module de Yong $E = 1613.78941$ (Mpa)
Le coefficient de poisson $\nu = 0.3$	Le coefficient de poisson $\nu = 0.4$

**Tableau IV.10. Pour les propriétés de matrice et fibre.**

➤ **Pour la fonction fil avancé (advanced) :**

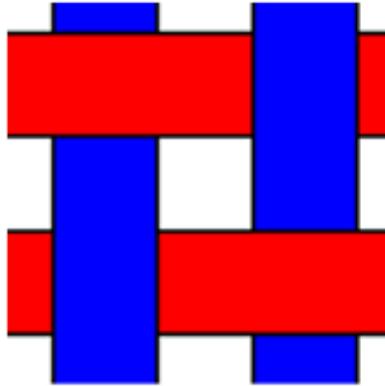
Être passé de la définition des matériaux, On définit la partie de la microstructure, dans notre cas, nous avons utilisé la fonctionnalité fil avancé (ce cas est basé sur la stratégie de calcul géométrie des différents fils du tissu tissé, afin de prendre en compte l'effet des ondulations).

Le tableau suivant IV.12 représente les données à introduire qui correspondent le fil dans la partie microstructure (densité de fil (tex), diamètre de fibre (mm), hauteur (mm), largeur (mm)).

densité de fil (tex)	<b>d=1400</b>
diamètre de fibre (mm)	<b>D=0.003</b>
Hauteur (mm)	<b>H=0.58</b>
Largeur (mm)	<b>L=4.19</b>

**Tableau IV. 11. Propriétés géométriques du fil de verre.**

Lors du choix la microstructure de fil avancé, on doit sélectionner le croisement de fil. Pour définir une tissée en faisant un clic droit sur l'item "RVE" dans l'arbre *Digimat*, puis en sélectionnant l'option "Ajouter tissé", voir la figure (IV.34). Un choix de VER a été adopté afin d'imiter le comportement en traction de composite.



**Figure IV. 34. Motif de tissage.**

Avant de lancer les calculs de simulation sur le logiciel *Digimat*, on doit imposer des conditions aux limites. Dans notre cas, une déformation de ( $\varepsilon = 0.01$ ) est appliquée. Nous obtenons les modules d'ingénieur suivant :

<b>Module de Yong <math>E_1</math> (Gpa)</b>	$E_1 = 3.58 \times 10^3$
<b>Module de Yong <math>E_2</math> (Gpa)</b>	$E_2 = 3.58 \times 10^3$
<b>Module de Yong <math>E_3</math> (Gpa)</b>	$E_3 = 2.48 \times 10^3$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{12}</math></b>	$\nu_{12} = 3.24 \times 10^{-1}$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{23}</math></b>	$\nu_{23} = 4.65 \times 10^{-1}$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{13}</math></b>	$\nu_{13} = 4.65 \times 10^{-1}$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{12}</math></b>	$G_{12} = 8.63 \times 10^2$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{13}</math></b>	$G_{13} = 9.03 \times 10^2$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{23}</math></b>	$G_{23} = 9.03 \times 10^2$

**Tableau IV.12. Les modules d'ingénieur du fil avancé.**

Pour calculer la matrice de souplesse on a été appliquées les formules suivantes :

$$E_{ch} = E_1 = \frac{1}{S_{11}} \Rightarrow S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad \text{IV.1}$$

$$E_{tr} = E_2 = \frac{1}{S_{22}} \Rightarrow S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad \text{IV.2}$$

$$E_3 = \frac{1}{S_{33}} \Rightarrow S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad \text{IV.3}$$

**Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

---

$$\mathbf{v}_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}} \Rightarrow \mathbf{S}_{12} = -(\mathbf{v}_{12}\mathbf{S}_{11}) \quad \text{IV.4}$$

$$\mathbf{v}_{13} = -\frac{S_{13}}{S_{11}} \Rightarrow \mathbf{S}_{13} = -(\mathbf{v}_{13}\mathbf{S}_{11}) \quad \text{IV.5}$$

$$\mathbf{v}_{23} = -\frac{S_{23}}{S_{22}} \Rightarrow \mathbf{S}_{23} = -(\mathbf{v}_{23}\mathbf{S}_{22}) \quad \text{IV.6}$$

$$\mathbf{G}_{23} = \frac{1}{S_{44}} \Rightarrow \mathbf{S}_{44} = \frac{1}{G_{23}} \quad \text{IV.7}$$

$$\mathbf{G}_{13} = \frac{1}{S_{55}} \Rightarrow \mathbf{S}_{55} = \frac{1}{G_{13}} \quad \text{IV.8}$$

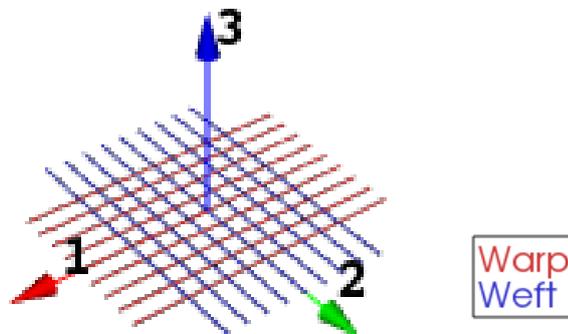
$$\mathbf{G}_{12} = \frac{1}{S_{66}} \Rightarrow \mathbf{S}_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad \text{IV.9}$$

La matrice de souplesse:

$$S = \begin{bmatrix} 2.79 \times 10^{-4} & -9.05 \times 10^{-5} & -1.29 \times 10^{-4} & 5.28 \times 10^{-21} & 1.04 \times 10^{-20} & -1.82 \times 10^{-20} \\ -9.05 \times 10^{-5} & 2.79 \times 10^{-4} & -1.29 \times 10^{-4} & -2.03 \times 10^{-20} & -1.39 \times 10^{-20} & 7.45 \times 10^{-20} \\ -1.29 \times 10^{-4} & -1.29 \times 10^{-4} & 4.02 \times 10^{-4} & 3.81 \times 10^{-21} & -1.45 \times 10^{-20} & -1.22 \times 10^{-20} \\ 5.28 \times 10^{-21} & -2.03 \times 10^{-20} & 3.81 \times 10^{-21} & 1.15 \times 10^{-3} & 2.51 \times 10^{-21} & 2.02 \times 10^{-21} \\ 1.04 \times 10^{-20} & -1.39 \times 10^{-20} & -1.45 \times 10^{-20} & 2.51 \times 10^{-21} & 1.10 \times 10^{-3} & -9.02 \times 10^{-22} \\ -1.82 \times 10^{-20} & 7.45 \times 10^{-21} & -1.22 \times 10^{-20} & 2.02 \times 10^{-21} & -9.02 \times 10^{-22} & 1.10 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

➤ **Microstructure fil de base (basic) :**

Nous suivons les mêmes étapes du premier cas, seule différence réside dans le choix de type de fil. Nous avons choisi les fils de base (basic) : dans ce cas, la modélisation de texture la plus simple sera utilisée, qui ne prend pas en compte les ondulations). La valeur qui doit être saisie ci est la fraction volumique ( $v=0.28\%$ ). La présente microstructure est semblable à celle dont le renfort est réparti en deux phases avec deux orientations perpendiculaires ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ).



**Figure IV.35. Géométrie les fils de base.**

## **Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

Les mêmes conditions aux limites que le premier cas sont appliquées. Le tableau suivant (IV.14) récapitule les résultats obtenus.

<b>Module de Yong <math>E_1</math> (Gpa)</b>	$E_1 = 4.0816$
<b>Module de Yong <math>E_2</math> (Gpa)</b>	$E_2 = 4.0816$
<b>Module de Yong <math>E_3</math> (Gpa)</b>	$E_3 = 2.8457$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{12}</math></b>	$\nu_{12} = 2.4358 \times 10^{-1}$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{23}</math></b>	$\nu_{23} = 4.46389 \times 10^{-1}$
<b>Le coefficient de poisson <math>\nu_{13}</math></b>	$\nu_{13} = 4.46389 \times 10^{-1}$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{12}</math></b>	$G_{12} = 9.2012 \times 10^{-1}$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{13}</math></b>	$G_{13} = 9.0065 \times 10^{-1}$
<b>Le module de cisaillement <math>G_{23}</math></b>	$G_{23} = 9.0065 \times 10^{-1}$

**Tableau IV.13. Les modules d'ingénieur du fil de base.**

D'où, la matrice de souplesse est donnée ainsi :

$$S = \begin{bmatrix} 2.45 \times 10^{-1} & -5.97 \times 10^{-2} & -1.14 \times 10^{-1} & 5.54 \times 10^{-18} & 6.61 \times 10^{-18} & -2.41 \times 10^{-17} \\ -5.97 \times 10^{-2} & 2.45 \times 10^{-1} & -1.14 \times 10^{-1} & -2.37 \times 10^{-17} & -2.41 \times 10^{-17} & 6.61 \times 10^{-18} \\ -1.14 \times 10^{-1} & -1.14 \times 10^{-1} & 3.51 \times 10^{-1} & 1.20 \times 10^{-17} & 1.10 \times 10^{-17} & 1.10 \times 10^{-17} \\ 5.54 \times 10^{-18} & -2.37 \times 10^{-17} & 1.20 \times 10^{-17} & 1.09 & -1.44 \times 10^{-18} & -1.44 \times 10^{-18} \\ 6.61 \times 10^{-18} & -2.41 \times 10^{-17} & 1.10 \times 10^{-17} & -1.44 \times 10^{-18} & 1.11 & -1.47 \times 10^{-18} \\ -2.41 \times 10^{-17} & 6.61 \times 10^{-18} & 1.10 \times 10^{-17} & -1.44 \times 10^{-18} & -1.47 \times 10^{-18} & 1.11 \end{bmatrix}$$

### **IV.3.2. Calcul des propriétés élastiques d'un VER composite à renfort tissu par la méthode des éléments finis (FE) :**

Avant d'entamer la nouvelle analyse FE, le choix de solveur doit être défini au préalable. Pour des contraintes liées au matériel informatique, on se contente par le solveur de *Digimat* FE. La démarche de la simulation du comportement élastique en traction se résume ainsi :

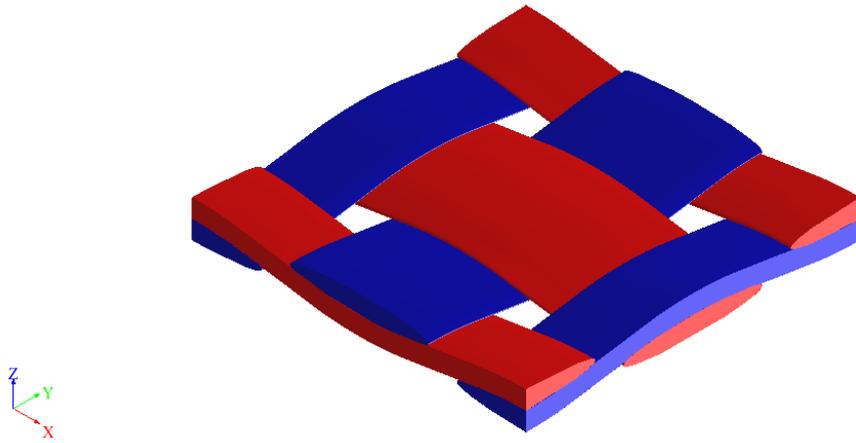
1. Choisir les types des matériaux et leur comportement (choisissant le comportement élastique de deux constituants de composite). Les propriétés des matériaux déjà obtenues dans la partie expérimentale sont introduites, tableau (IV.15).

**Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

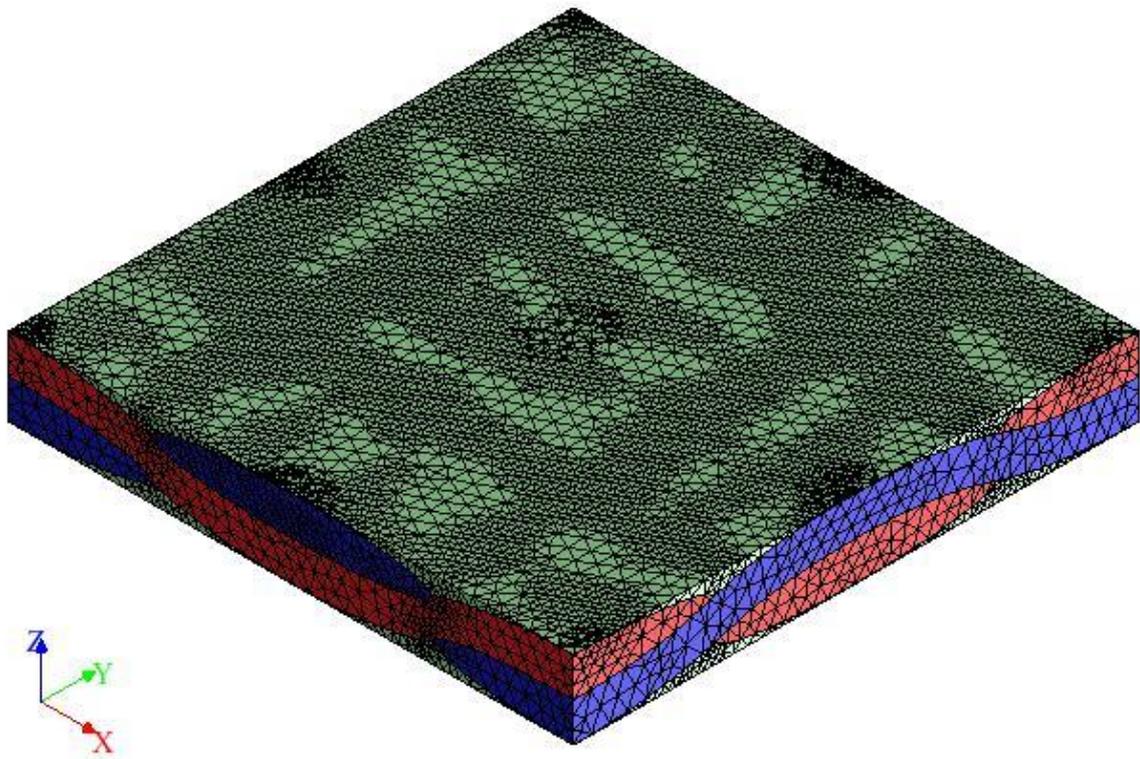
Pour le renfort	Pour la matrice
La densité $d = 2.6$	La densité $d = 0.9$
Le module de Yong $E = 15191.5146$ (Mpa)	Le module de Yong $E = 1613.78941$ (Mpa)
Le coefficient de poisson $\nu = 0.3$	Le coefficient de poisson $\nu = 0.4$

**Tableau IV.14. Propriétés physiques et élastiques de constituants de composite.**

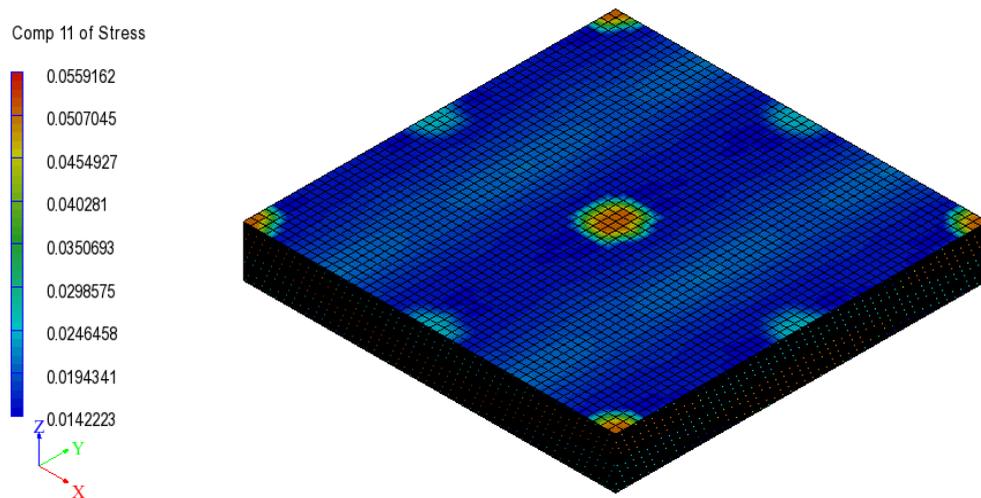
2. Définir une microstructure : elle comporte les deux phases. La première est celle de la matrice, dans laquelle on affecte le matériau de polypropylène. la deuxième est liée au type de fil. dont le matériau est la fibre de verre. Les paramètres intrinsèques de cette phase doit contenir la densité linéaire des fils, le diamètre des fibre, la section de fil (ellipsoïdale,...).
3. L'étape suivante consiste à définir le volume élémentaire représentatif. Ce volume est un monocouche de type tissu (2D). une taille de VER est proposée automatiquement dès que les propriétés géométriques des fils sont identifiées. La géométrie de VER tissé est obtenue en introduisant le nombre des fils par centimètre dans les deux sens de tissu, Figure IV.36.
4. L'étape de la construction de VER s'achève par la génération du maillage, dans cette phase, on doit choisir le type d'élément fini (conforme, non-conforme,...), la taille maximale et minimale des éléments. Le maillage peut être contrôlé facilement selon les la précision désirée et les capacités informatiques disponibles.
5. Pour qu'une analyse soit complètement définie, des conditions aux limites appropriées et le choix de leurs formes doivent être appliqués sur le VER. entre autres : le type de chargement (Dirichlet (déplacement), périodique,...), une forme uni-axiale par exemple a été choisie.



**Figure IV. 36. Génération de microstructure.**



**Figure IV. 37. Maillage de la microstructure.**



**Figure IV.38.** Contraintes longitudinales dans un volume élémentaire représentatif de composite à base de Polypropylène et de fil en verre tissé.

#### **IV.4. Conclusion :**

Nous avons traité dans ce chapitre la modélisation analytique et numériques (par éléments finis) de notre matériau déjà préparé et analysé dans la section expérimentale. Le modèle analytique de Mori-Tanaka, jugé performant par les experts, a été utilisé comme approche de caractérisation. Les résultats obtenus par le modèle de base (basic) ou par le modèle avancé (advanced) sont proches à ceux obtenus expérimentalement. Le modèle de base, qui ne tient pas en compte la forme de tissu (uniquement la fraction volumique de renfort est considérée), nous a fourni des résultats identiques à la loi de mélange. L'approche analytique nous a permis de caractériser le composite en tissu avec une précision satisfaisante et peu de temps de calcul. La modélisation par éléments finis avec un maillage raffiné et un temps d'exécution plus élevé semble également plus pertinente au calcul local des composites à géométrie complexe. La présente méthode offre dans un poste-traitement tous les champs de contraintes ou de déformations nécessaires à n'importe quelle analyse locale de matériau composite. Les propriétés mécaniques homogénéisées auraient été calculées en moyennant les contraintes ou les déformations sur toute la microstructure.

# **Bibliographes**

## **Chapitre IV Modélisation numérique et analytique du comportement du Composite soumis à une charge de traction**

---

### Bibliographes

1. El-Hage, C., *Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel*, 2006, Université de Technologie de Compiègne.
2. Benferdi, S., *Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différentes approches mathématiques*. 2010.
3. Berthelot, J.-M., *Mécanique des Matériaux et Structures Composites* Novembre 2010
4. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites* 2008, France.
5. Kenza, A., *Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie*, in *Génie Mécanique* 18 / 04 /2018, Université Mohamed Khider – Biskra.
6. Tarek, D., *Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à base de fibres de palmier dattier*, in *Génie Mécanique* 14/12/2019, Université Mohamed Khider – Biskra.
7. youcef, d., *etude de la ruption en mode I d'ouverture des matériaux composite*, in *génie mécanique* 2003/2004, universite Mouhamed Khider biskra.
8. Hocine, D., *Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwichs*, in *Génie Mécanique* 08/01/2017, Université Mohamed Khider – Biskra.
9. HA, M.H., *Modélisation des architectures à renforcement tridimensionnel dans les structures composites* in *Mécanique Avancée MA* 19 décembre 2013, Université de Technologie de Compiègne Laboratoire de Mécanique Roberval - UMR 7337
10. El-Hage, C., *Modeling of the damaging and elastic behavior of three-dimensional reinforced composite materials*

*Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel*, 2006, Université de Technologie de Compiègne.

11. Dal Maso, F. and J. Meziere, *Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites*. Revue de l'institut Français du pétrole, 1998. **53**(6): p. 857-870.
12. Badel, P., *Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
13. Florimond, C., *Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l'aide d'un schéma éléments finis implicite*, 2013, Lyon, INSA.
14. division, m.e., *technologie textile generale* 1978.
15. S.BOUCHIKHIA , Y.B., A.EL MALIKIA, O. CHARKAOUIB;, *INVESTIGATION DE COMPOSITES TISSES A BASE DE FIBRES VEGETALES D'ALFA*. 14 Avril 2017.
16. Elouaer, A., *Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales*, 2011, Reims.
17. Browaeys, C., *Chapitre 4 Les matériaux composites à base de fibres*, in *Les enjeux des nouveaux matériaux textiles* 2021, EDP Sciences. p. 85-118.
18. Moussaddy, H., M. Lévesque, and D. Therriault. *Évaluation des performances des modèles d'homogénéisation pour des fibres aléatoirement dispersées ayant des rapports de forme élevés*. in *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*. 2011. Poitiers-Futuroscope, France.
19. Préault, V., *Méthodes d'homogénéisation pour la modélisation électromagnétique de matériaux composites. Application au blindage de boîtiers d'équipement électronique*, 2013, Paris 11.
20. Laribi, M.A., *Caractérisation et Modélisation du comportement micromécanique des matériaux composites SMC sous chargement thermomécanique de type quasi-statique et fatigue*, 2018, Paris, ENSAM.
21. Lemaitre, S., *Modelisation of composite materials with complex microstructures. Study of effective properties with homogenization methods*

*Modélisation des matériaux composites multiphasiques à microstructures complexes. Étude des propriétés effectives par des méthodes d'homogénéisation*, 2017, Université de CAEN Normandie.

22. *Mode d'emploi HAAKE PolyLab QC*.

## **Bibliographes**

---

23. merabet, K., *Etude et réalisation d'une presse hydraulique à chaud pour la mise en oeuvre des polymères*, in *génie mécanique* 166/07/2019, université mohamed khider biskra.
24. engineering, X., *Digimat documentation Release 5.1.1* August 2014.



## **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

Le présent mémoire est réalisé dans le cadre de projet de fin d'étude de la formation de Master en construction mécanique. Le travail est une contribution à l'analyse du comportement mécanique des composites à renfort textile. Le travail consiste à étudier le comportement élastique d'un matériau à base de tissu de verre imprégné de polymère (Polypropylène). La première partie est consacrée à la préparation du matériau et ses constituants. Un protocole expérimental qui définit la démarche de la mise en forme et la caractérisation mécanique a été présenté. (extrusion de polymère; préparation de textile, moulage par compression, essai de traction, essai de flexion....). cette démarche sert à avoir une idée sur le comportement élastique du matériau et à calculer quelques propriétés élastiques jugés utiles pour l'ingénieur.

La deuxième partie est dédié à la simulation du comportement élastique de composite à renfort en textile. En premier lieu, une approche analytique de Mori-Tanka a été adoptée avec deux types de la microstructure : un modèle simple qui considère le renfort comme étant un croisement directe de deux phases orthogonales ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ). D'ailleurs, un modèle évolué qui tient en compte de la courbure des fils au niveau de motif (ondulation) est également pris en considération. On a conclu que les deux modèles fournissent des résultats comparables aux valeurs expérimentales et aident considérablement à l'évaluation des paramètres homogénéisés de l'ingénieur nécessaires aux cahiers de charges et au calcul numériques.

La modélisation de même comportement a été étudiée également par une approche numérique. La méthode des éléments finis est utilisé par pour une meilleure analyse du comportement global et local du matériau composite en textile. Le code de calcul nous a permis de choisir un volume élémentaire spécifique à ce type des structures. Le maillage, les conditions aux limites et le traitement sont faits dans les règles de l'art. L'avantage de la modélisation par éléments finis est qu'elle offre un post-traitement assez puissant. La présentation de l'état de contraintes et éventuellement de déformations peuvent donner une image plus réaliste sur le comportement global de composite, d'une part, et l'interaction local des constituants; d'autre part.

A noter qu'un calcul moyennant les champs inconnus est nécessaire pour l'identification des paramètres d'élasticité homogénéisés.

## الملخص:

يهدف هذا العمل الى التحضير و التشخيص التجريبي لمادة تجمع بين متطلبات الصلابة والخفة، و التي تعتبر عمومًا من متطلبات الصناعيون والمهندسون في مختلف المجالات. يتعلق الأمر بمادة مركب أساسها البولي بروبيلين المدعوم بالخيط الزجاجية المنسوجة. المادة المتحصل عليها تعتبر أرتوتروب. من جهة أخرى، تم إجراء دراستين أخرتين باستخدام المحاكاة بواسطة العناصر المتناهية ونماذج التجانس التحليلية. النتائج العددية والتحليلية التي تم الحصول عليها جد مشجعة و مقارنة مع القيم التجريبية

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة، النسيج، البوليبروبيلان، الاليف الزجاجية، العناصر المتناهية، موري-تانكا

## Résumé :

Le présent travail consiste à l'élaboration et la caractérisation expérimentale d'un matériau qui regroupe les exigences de la rigidité et de la légèreté, généralement réclamées par les industriels et les ingénieurs dans différents domaines. Il s'agit d'un composite à base de polypropylène renforcé par des fils de verre tissu. Le matériau obtenu est orthotrope. D'autre part, deux autres études sont également réalisées en utilisant la modélisation numérique par élément finis et des modèles d'homogénéisation analytiques. Les résultats numériques et analytiques obtenus sont fortement encourageants et sont comparables aux valeurs expérimentales.

**Les mots clé :** matériau composite, tissu, polypropylène, fibre de verre. Eléments Finis, Mori-Tanaka

## Summary:

The present work consists in the development and the experimental characterization of a material which brings together the requirements of rigidity and lightness, generally required by industrialists and engineers in different fields. It is the Polypropylene-based composite reinforced with fabric glass threads. The obtained material is orthotropic. two other studies are also carried out using numerical modeling by finite element and analytical homogenization models. The numerical and analytical results obtained are strongly encouraging and are comparable to the experimental values.

**Keywords:** composite material, fabric, polypropylene, fiberglass. Finite Elements, Mori-Tanaka