



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Génie Des Matériaux

### MEMOIRE DE MASTER

#### Thème

*Etude du comportement mécanique de flexion des poutres en  
Composite à matrice polymère*

Présenté par :

DAHINI HOCINE

ATTIA ANFAL

Encadre Par :

Pr. YOUSFI AHMED

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. GUERIBIZ DJELOUL		Présidente
Dr. BOURENANE HOCINE		Examineur
Pr. YOUSFI AHMED		Promoteur

Promotion : 2021/2022

# *Dédicace*



*J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :*

*Ma très chère mère*

*Mon très cher père  
Et Ma fiancée Hanaa*

*Mes très chers frères et sœurs*

*Toute ma famille*

*A tous mes camarades*

*A tous mes professeurs qui ont supervisé mes études*

*A tout mes amis que j'ai connus dans ma vie*

*Dahini Hocin*

# *Dédicace*



*J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :*

*Ma très chère mère*

*Mon très cher père*

*A Mon très cher frère  
Younes et Sayaf et Mes  
Sœurs, Roufida, Kaouther  
Ghoufrane vous avez  
Toujour été Présentent  
Pour moi.*

*Mes chers oncles*

*Toute ma famille  
A toute mes amis  
Kalthoum, Imane, Djahida, Fatima*

*A tous mes professeurs qui ont supervisé mes études*

*A tout mes amis que j'ai connus dans ma vie*

*Attia Anfal*

# ***Remerciements***

*Nous ne pouvons pas commencer ce travail sans penser à ceux Qui ont contribués, de près ou loin a ce travail.*

*Nous remercions en premier lieu **ALLAH** qui seul nous a Guidé dans le sens au cours de notre vie et qui nous a aidé à faire ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur **Pr. Yousfi Ahmed** pour nous avoir permis de faire ce travail et pour son aide, son accueil et sa disponibilité.*

*On associe également toutes le personnel du Département de génie mécanique*

## Sommaire

Introduction générales.....	11
I. 1. Les composites.....	13
I.1.1 Définition .....	13
I.1.2. Intérêt des matériaux composites : [1].....	13
I.1.3. Différents types de matériaux composites : [1].....	14
I.1.3.1. Matériaux composites de grande diffusion.....	14
I.1.3.2 Matériaux composites de hautes performances .....	14
I.1.4. Composition des composites .....	14
I.1.5. Les éléments constituant les matériaux composites en résines et fibre de verre .....	14
Les matrices en résine.....	14
I.1.6. Les renforts en fibres .....	16
I.1.6.1. Différentes natures de renfort:[1] .....	16
I.1.6.2. Différents types de renfort : [1] .....	17
I.2. Architecture des matériaux composites .....	19
I.2.1. Définitions .....	19
I.2.2. Stratifiés.....	21
I.3. Elaboration du matériau composite .....	21
I.3.1. Modèle de moulage utilisé durant l'élaboration de notre matériau .....	21
I.3.2. Elaboration de matériau composite en polyester fibre de verre E .....	22
I.4. Modèles de formation de l'interphase.....	23
II.1. Détermination des constantes élastiques relatives au comportement du composite étudié .....	26
II.1. 1. Structures composites stratifiées .....	26
II.1. 2. Définition de la matrice de souplasse .....	27
II.1. 3. Méthode de calcul des éléments de composite .....	30
II.1. 3.1. La loi des mélanges .....	30
II.1. 3.2. Rapprochement unidirectionnel Akkerman [12].....	31
III.1. Essai de flexion 3 point sur un composite.....	35

III.1. 2.Résultats des essais de flexion 3 points sur le composite .....	35
III.2. Simulation numérique de l'essai de flexion 3 points de notre matériau composite polyester / fibre de verre .....	36
III.2.1. Création du model numérique (Part).....	37
III.2.2. Création des propriétés du matériau (Property).....	37
III.2.3. Assemblage (Assembly ).....	38
III.2.4. Step.....	39
III.2.5. Interaction .....	39
III.2.6. load.....	39
III.2.7. Mesh.....	40
III.2.8. Job .....	41
IV-1.Résultats pour composite à direction des fibre 0/45/-45/60/90.....	43
IV-2.Résultats pour composite à direction des fibre 0/90/0/90/0.....	45
IV-3.Résultats pour composite à direction des fibre 0/45/-45/90/45.....	47
IV-4.Comparaison des résultats des différentes composites étudier .....	50
Conclusion générale .....	51

## Liste des figures

Figure 1:Les constituants d'un composite.....	13
Figure 2: principaux matériaux de renforts [2].....	17
Figure 3:les différentes formes des renforts fibres de verre.....	19
Figure 4: la texture d'une nappe de fibres UD [4].....	20
Figure 5: L'architecture des renforts fibres de verre tissus unidirectionnels [5].....	20
Figure 6: schématise un stratifié [2].....	21
Figure 7: Le principe de moulage au contact [4].....	22
Figure 8: Les éléments à préparer pour l'élaboration de notre composite: pesage du durcisseur, le moule pain par le gel-coat, la fibre de verre.[3].....	23
Figure 9 : Matériau composite verre /UP de l'étude. [3].....	23
Figure 10: Mécanismes de liaisons inter faciales : a) adhésion mécanique, b) interactions électrostatiques, c) liaisons chimiques, d) interpénétration, e) couche inter faciale formée par inter diffusion [6].....	24
Figure 11: Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	26
Figure 12 : Couche d'un matériau orthotrope [7].....	28
Figure 13: Eprouvette de flexion 3 points pour le composite avec h=10 mm.....	35
Figure 14: Réponse type du composite soumis à la flexion 3 points.....	36
Figure 15: Poicent et éprouvette de flexion 3 points.....	37
Figure 16: direction des fibres dans les plis.....	38
Figure 17: L'assemblage des éléments de la simulation.....	38
Figure 18: Création des interactions entre les éléments de l'essai.....	39
Figure 19: Les paramètres de force et déplacement du modèle.....	40
Figure 20: Le maillage et type de maillage de l'éprouvette.....	41
Figure 21: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90 ...	43
Figure 22: Déplacement d la flèche U2 pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90.....	43
Figure 23: Déplacement d la flèche U2 vis-à-vis le temps de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90.....	44
Figure 24: La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal du l'éprouvette du composite à direction 0/45/-45/60/90.....	45
Figure 25: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/90/0/90/0.....	45
Figure 26: Déplacement d la flèche U2 pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90.....	46
Figure 27: Déplacement d la flèche U2 vis-à-vis le temps de la flexion 3 points du composite à direction 0/90/0/90/0.....	46
Figure 28: La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal du l'éprouvette du composite à direction 0/90/0/90/0°.....	47
Figure 29: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/90/45 ...	48
Figure 30: Déplacement d la flèche U2 pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/90/45.....	48
Figure 31: La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal de l'éprouvette du composite à direction 0/45°/-45/90/45.....	49
Figure 32 : La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal de l'éprouvette du composite à différentes directions des fibres.....	50

## Liste des tableaux

Tableau 1: Principales différences entre matrices TP et TD [2].....	15
Tableau 2: Caractéristiques des résines thermodurcissables [2].....	16
Tableau 3: Quelques compositions de fibres de verre E ,D , R [4] .....	18
Tableau 4: Propriétés mécaniques des constituants du composite polyester fibre de verre .....	32
Tableau 5: Propriétés mécaniques du composite polyester fibre de verre de plis $0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/60^{\circ}/90^{\circ}$ , avec la méthode de la loi des mélanges.....	32
Tableau 6: Propriétés mécaniques du composite polyester fibre de verre de plis $0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/60^{\circ}/90^{\circ}$ , avec la méthode de Akkerman .....	32

### Liste des notations et symboles :

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
P	Masse volumique du matériau composite	[g/mm <sup>3</sup> ]
M <sub>f</sub> , M <sub>m</sub>	Fraction massique des fibres et de la matrice en	[%]
V <sub>f</sub> , V <sub>m</sub>	Fraction volumique des fibres et Matrice	[mm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>f</sub> , ρ <sub>m</sub>	Masse volumique du renfort et de la matrice	[g/mm <sup>3</sup> ]
E	Module d'élasticité	[MPa]
G	Module de cisaillement	[MPa]
E <sub>f</sub> , E <sub>m</sub>	Modules de Young des fibres et de matrice respectivement	[MPa]
E <sub>t</sub>	Module de Young dans le sens transversal des fibres	[MPa]
E <sub>l</sub>	Module de Young dans le sens Longitudinal des fibres	[MPa]
Σ <sub>r</sub>	Résistante à la traction	[MPa]
E	Déformation	
N	Coefficient de Poisson	
St	Éprouvette prise dans le sens transversal des fibres	
Sl	Éprouvette prise dans le sens des fibres	

## Résumé

L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les phénomènes relatifs à la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux composite à base de fibre de verre et matrice polyester. Les essais mécaniques sur les stratifiés ont montré que les paramètres de mise en œuvre d'un composite ont un effet significatif sur les paramètres de flexion de tels matériaux, d'où on a utilisé la simulation et la modélisation numérique avec le logiciel Abaqus d'un essai de flexion 3 points pour comprendre le comportement à la flexion de ce type des matériaux.

## Abstract

The main objective of this project is to better understand the phenomena relating to the implementation and use of composite materials based on fiberglass and polyester matrix. Mechanical tests on the laminates have shown that the processing parameters of a composite have a significant effect on the bending parameters of such material, hence simulation and numerical modeling with the Abaqus software from a 3-point bending test to understand the bending behavior of this type of materials.

## الملخص:

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو فهم أفضل للظواهر المتعلقة بتنفيذ واستخدام المواد المركبة على أساس مصفوفة الألياف الزجاجية والبوليستر. أظهرت الاختبارات الميكانيكية على الصفائح أن معاملات التنفيذ للمركب لها تأثير كبير على معاملات الانحناء لهذه المواد، وبالتالي المحاكاة النمذجة الرقمية باستخدام برنامج Abaqus من اختبار الإنحناء من 3 نقاط لفهم سلوك الإنحناء لهذا النوع من المواد.

## **Introduction générale**

Depuis une trentaine d'années des efforts ont été déployés pour la fabrication et la caractérisation des matériaux composites. Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécaniques, qui peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur, de manière à obtenir les propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants. Ainsi, la possibilité de façonner à la carte.

Les matériaux composites en polyester renforcés en fibre de verre ont des applications importantes et diverses dans les domaines de la construction, du génie civil en générale, de l'automobile, de l'aéronautique, de l'industrie mécanique et biomécanique. Leurs propriétés sont comparables à ceux d'autres matériaux, et ils sont parfois utilisés de manière exclusive dans certains domaines d'application en raison de leur facilité de transformation en produits finis et leur poids plus léger comparativement à des matériaux traditionnels tels que l'acier ou la céramique. [1].

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. La maintenance préventive prévoit les comportements mécaniques des métaux, d'où les essais mécaniques sur les composites, qui est une forme de prévoir la limite des propriétés du matériau qui ne doit pas être dépassé.

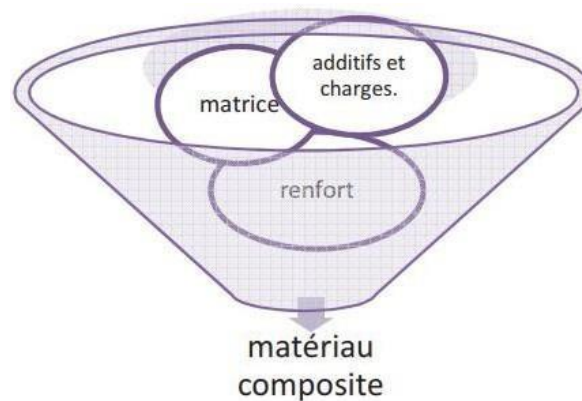
On débutera avec une bibliographie sur les matériaux composites et leurs comportement mécanique, après des calculs des différents paramètres du composite avec les lois de mélange et l'approche d'Akrman , ensuite une simulation numérique d'un essai de flexion 3 points d'un composite orthotrope , et enfin les résultats et interprétations .

Chapitre 1  
Etude bibliographique sur les  
composites

## I. 1. Les composites :

### I.1.1 Définition :

Les matériaux composites sont, comme leur nom l'indique, constitués d'au moins deux composants non miscibles. Une résine composite (RC) est un matériau constitué d'une matrice «organique», à laquelle on incorpore des «charges» destinées à augmenter sa dureté. L'ensemble est lié par un agent de couplage, en général d'origine «minérale». Les composites «Bulkfill» (CBF) littéralement «placement en masse» sont des composites de remplissage pouvant être polymérisés par incrément de 4mm, à la différence des autres composites, tout en conservant les propriétés mécaniques d'un composite dentaire.



**Figure 1: Les constituants d'un composite**

### I.1.2. Intérêt des matériaux composites : [1]

L'utilisation des matériaux composites est générée par leurs principales caractéristiques :

- L'allégement des structures,
- La bonne tenue en fatigue,
- La résistance à la corrosion, L'insensibilité aux produits chimiques couramment utilisés dans la mécanique.
- Une meilleure tenue au feu,

Par contre, les matériaux composites vieillissent sous l'action des agents extérieurs tels que l'humidité et la chaleur, et ont une tenue moyenne aux chocs et aux impacts.

### **I.1.3. Différents types de matériaux composites : [1]**

On distingue deux types de composites: les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances.

#### **I.1.3.1. Matériaux composites de grande diffusion:**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

#### **I.1.3.2 Matériaux composites de hautes performances:**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduit des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- Beaucoup de procédés encore manuels.
- MM, CMC.

### **I.1.4. Composition des composites :**

-D'une phase organique qui constitue entre 15% à 40% du poids du composite. Elle inclut une résine matricielle, des abaisseurs de viscosité, un système de polymérisation et des additifs (11). La différence notable pour les composites bulks par rapport à leurs homologues classiques est la présence d'un relaxant de tension pour diminuer la contraction de prise [1, 2], et d'une nouvelle photo sensibilisatrice plus réactive pour permettre une polymérisation plus en profondeur [2]

-D'une phase inorganique constituée de charges qui améliorent les propriétés mécaniques du matériau et diminuent les contraintes dues au retrait de polymérisation. Elles sont liées à la matrice par l'intermédiaire d'un silane.

### **I.1.5. Les éléments constituant les matériaux composites en résines et fibre de verre :**

#### **Les matrices en résine**

La matrice a pour rôle de contenir les fibres et renforts, de répartir les contraintes encaissées, d'apporter la résistance chimique de la structure, d'alléger la pièce finale, et donner la forme désirée au produit.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se ramollissent), les refroidir pour les figer (les chaînes se raidissent). Cette opération est réversible.

- la structure TD thermodurcissable fait intervenir une polymérisation, qui est irréversible et conduit à un produit fini solide, généralement rigide. Ce dernier est infusible donc non transformable, ce qui empêche son recyclage. Elle est constituée de chaînes linéaires réticulées entre-elles. Les chaînes sont liées dans l'espace par des liaisons fortes de type covalent.

Dans le tableau -1, nous reportons les principales différences entre les matrices TP et TD.

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

**Tableau 1: Principales différences entre matrices TP et TD [2].**

Les résines thermodurcissables sont obtenues à partir de monomères polyfonctionnels par polycondensation ou polyaddition. Les monomères réagissent entre eux ou avec de petites molécules servant de liant. Ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé

en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau -2.

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r^R(\%)$	$\sigma_t^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

**Tableau 2: Caractéristiques des résines thermodurcissables [2].**

On donne  $T_f$  température de fusion c'est la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide. Et  $\rho$  la masse volumique.

Les polymères thermodurcissables ou thermo durcis sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules :

- il y a des liaisons fortes dans les macromolécules et entre les macromolécules.
- il y a également des liaisons faibles entre les molécules

La résine Polyester est obtenue par polycondensation d'un ou plusieurs diacides avec un ou plusieurs glycols. Le polyester formé est mis en solution dans un solvant copolymérisable, généralement du styrène.

### **I.1.6. Les renforts en fibres :**

#### **I.1.6.1. Différentes natures de renfort:[1]**

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur la figure (2) qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

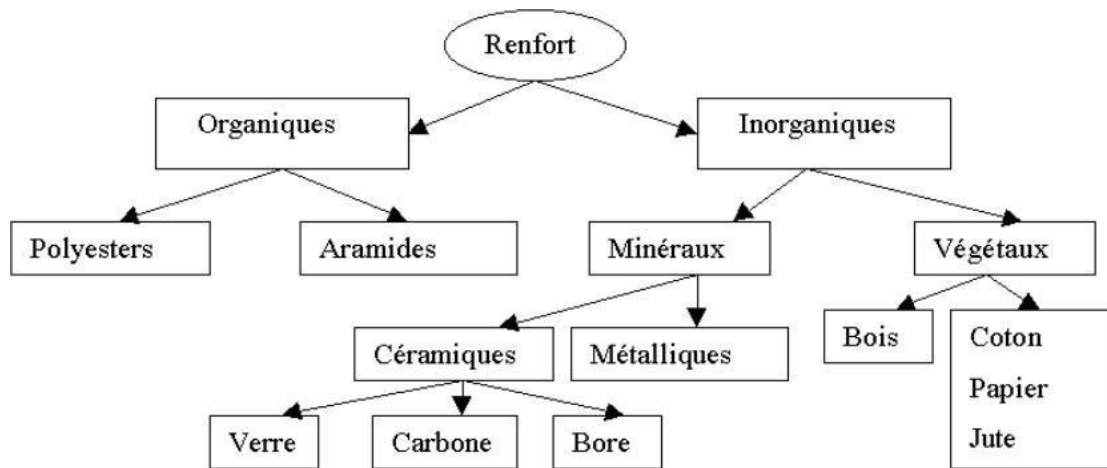


Figure 2: principaux matériaux de renforts [2]

La forme la plus utilisée pour les renforts est la forme fibreuse dont les fibres de verre et de Carbone, grâce à leurs propriétés, ont connues une très grande exploitation dans l'industrie.

### I.1.6.2. Différents types de renfort : [1]

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m<sup>2</sup>.

#### Les fibres de verre

Les fibres de verre constituent le renfort le plus utilisé actuellement pour les composites (dans plus de 95%). Elles offrent pour un prix raisonnable une bonne adhérence, de bonnes propriétés mécaniques (mais inférieures à celles de la fibre carbone) et des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications. Cependant, leurs faibles modules d'élasticité (et leurs densités qui sont supérieure à celle des fibres de carbone) limitent leurs utilisations pour la fabrication des pièces structurales (en aéronautique par exemple).

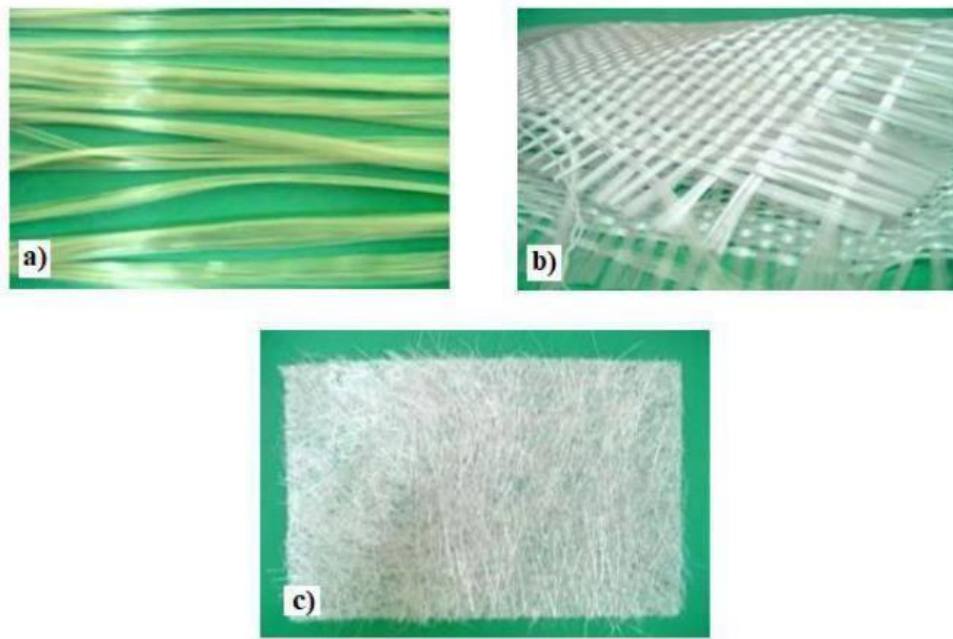
Les fibres de verre sont obtenues à partir de l'oxyde minéral (Silice, Alumine, Chaux, Magnésie, Oxyde de bore,...). On distingue plusieurs types:

- \_ Verre E : à usage général avec de bonnes propriétés électriques.
  - \_ Verre D : il a de bonnes propriétés diélectriques pour l'utilisation en électronique (circuit imprimé).
  - \_ Verre C : il a une bonne résistance chimique, pour les couches superficielles des structures sur le plan chimique.
  - \_ Verre R et S : ont une haute résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales.
- Les fibres de verre E sont les plus utilisées, le tableau suivant représente quelque composition de verre E, D et R :

Constituants		Composition en masse %		
		E	D	R
<b>Silice</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	53 – 54	73 – 74	60
<b>Alumine</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14 – 15,5	-	25
<b>Chaux</b>	<b>CaO</b>	20 – 24	0,5 – 0,6	9
<b>Magnésie</b>	<b>Mg</b>	20 – 24	0,5 – 0,6	6
<b>Oxyde de bore</b>	<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,5 - 9	22 – 23	-
<b>Fluor</b>	<b>F</b>	0 – 0,7		
<b>Oxyde de fer</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	< 1	0,1- 0,2	-
<b>Oxyde de titane</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	< 1	0,1- 0,2	
<b>Oxyde de sodium</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	< 1	1,3	
<b>Oxyde de potassium</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	< 1	1,5	

**Tableau 3: Quelques compositions de fibres de verre E ,D , R [4]**

Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



**Figure 3: les différentes formes des renforts fibres de verre**  
a) Roving de verre b) Tissu de verre c) Mat de verre

## **I.2. Architecture des matériaux composites :**

### **I.2.1. Définitions :**

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Parmi les géométries des renforts en fibre de verre, on présente la plus utilisée, et surtout la texture utilisée lors de la fabrication de notre matériau d'étude (UD Teffetas), on les appelle les **unidirectionnels**.

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère, ce qui crée un taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise (Figure 4). On donne les 3 catégories listées ci-dessous :

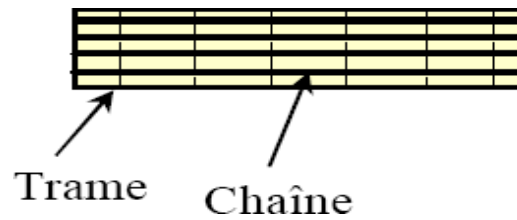


Figure 4: la texture d'une nappe de fibres UD [4]

**a) renfort unidirectionnel :**

Fibres de renforcement disposées dans une seule direction (sauf indication contraire, le renfort supposé continu)

**b) tissus :**

**Serge :** Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessous de (m) fils de chaîne. C'est une armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. (Figure 5) un sergé 2/2.

**Toile ou taffetas :**

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

**Satin :**

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

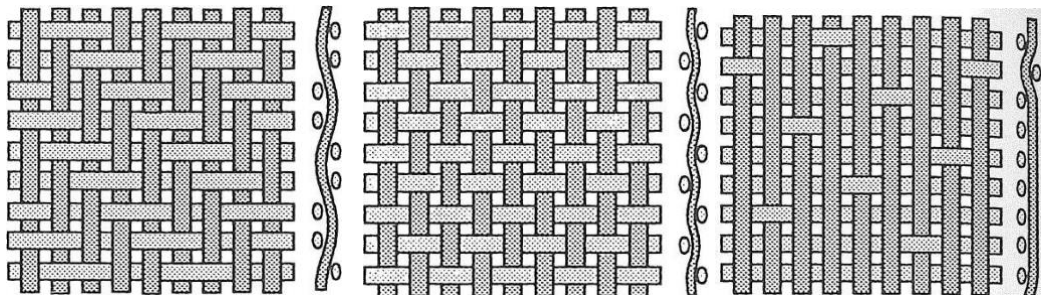


Figure 5: L'architecture des renforts fibres de verre tissés unidirectionnels [5].

**c) mats :**

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle, maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines.

**d) pli :**

Nappe élémentaire dans la constitution d'un stratifié.

**I.2.2. Stratifiés :**

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié [8].

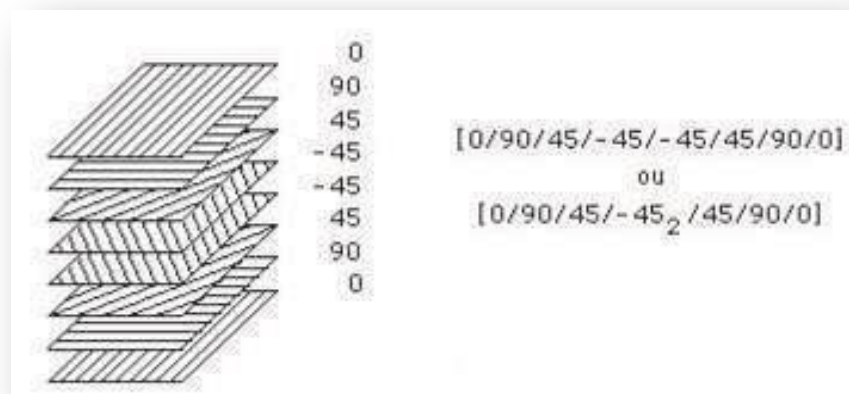
Chaque stratifié est codé de la manière suivante :

On doit repérer chaque pli par son orientation (ex 30°, 45°....)

On sépare les plis par slache (/)

Si on a plusieurs plis successifs de même direction, on met la direction avec un chiffre en indice qui indique le nombre des plis identiques.

Exemple d'un stratifié code [0/90/45/-45/-45/45/90/0] dans la figure .6



**Figure 6: schématise un stratifié [2]**

**I.3. Elaboration du matériau composite :****I.3.1. Modèle de moulage utilisé durant l'élaboration de notre matériau :**

Le moulage au contact (Figure.7) est le plus simple procédé auquel nous allons nous intéresser. Le renfort est manuellement placé dans un moule puis la résine est ajoutée. Ensuite, un opérateur fait pénétrer la résine dans le renfort et compacte l'ensemble à l'aide

d'un rouleau afin de chasser les bulles d'air. Ce type de procédé permettant de traiter de très petites séries de pièces de grandes dimensions est fortement dépendant de l'opérateur. En effet, la manière dont celui-ci dépose le renfort dans le moule et la pression qu'il exerce sur le rouleau lors de la compaction de l'ensemble influent grandement sur les propriétés finales de la pièce.

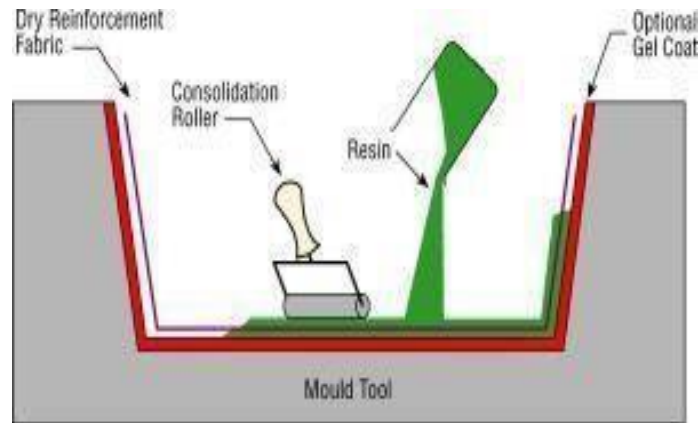


Figure 7: Le principe de moulage au contact [4].

### I.3.2. Elaboration de matériau composite en polyester fibre de verre E :

Les composites unidirectionnels à plis croisés ont été élaborés par moulage au contact. Des feuilles de fibres pré-imprégnées sont mises dans un moule après avoir mis du gel coat sur le moule afin d'enlever facilement le composite après séchage. Le durcissement se fait à température ambiante. On a choisie (après calcul) un pourcentage de fibres et de résine de telle sorte qu'on trouve un équilibre dans notre matériau Composite : **40% volume de fibres de verre (E=73 GPa), 60% volume de résine (E=3.53 GPa).**

Les faces du moule sont enduites d'un démoulant gel coat MOLD-WIZ F57 NC, elles sont en aluminium mesurent 500\*500 mm<sup>2</sup> (figure .8). Six feuilles de fibres 380 x 250 mm<sup>2</sup> sont prédécoupées dans un rouleau pour chaque plaque à élaborer. La méthode de moulage consiste à déposer successivement sur une face du moule une couche de résine, puis une couche de renfort sous forme de couche de fibre. On réalise l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau à roues dentées en acier et d'une brosse (dé bullage et roulage) afin d'éliminer les plus grosses bulles [3].

Cette opération est répétée autant de fois qu'il y a de couches de renfort afin d'obtenir l'épaisseur de plaque désirée. Dans notre cas 6 plis de 2 matériaux (de 0°/ 90° et 0°/45°/90°/-45°/0°/90° pour les directions des fibres) ont été ainsi superposés. Le contre-moule est mis en place après la pose de ces plis à l'autre face, sans aucun serrage.



**Figure 8: Les éléments à préparer pour l'élaboration de notre composite: pesage du durcisseur, le moule pain par le gel-coat, la fibre de verre.[3]**

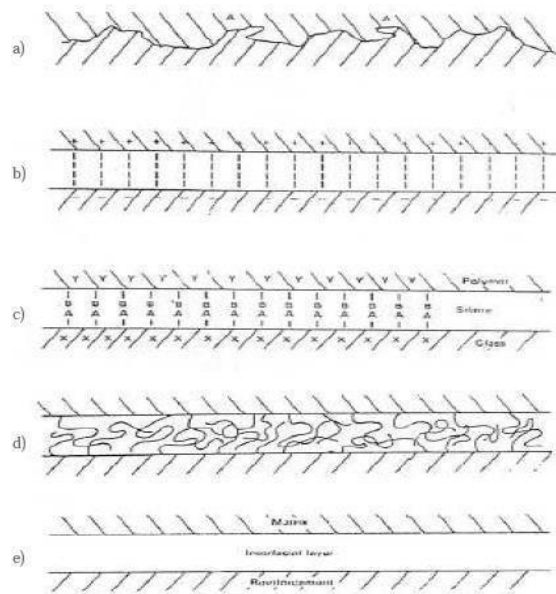
Après le décollage du matériau élaboré du moule, on le laisse sécher soit par air naturel ou de préférence par des étuves à 40° pendant 2 heures, le matériau élaboré pour cette étude est présenté sur la figure .9



**Figure 9 : Matériau composite verre /UP de l'étude. [3]**

#### **I.4. Modèles de formation de l'interphase :**

Le mouillage est un des phénomènes importants intervenant lors de la première étape de mise en œuvre de notre composite verre /UP. Cela est obtenu seulement si la résine n'est pas trop visqueuse, mouillant la surface du renfort et provoquant une diminution de l'énergie libre de surface du système. Une fois le renfort mouillé par la matrice, la liaison peut se faire. Le type d'adhésion varie d'un système à l'autre, il est souvent la somme de plusieurs mécanismes opérant en même temps. Le mécanisme d'adhésion est basé sur les cinq théories différentes de l'adhésion généralement rencontrées [6]. Les différents types de liaisons décrites sont présentés sous forme de schéma (Figure .10).



**Figure 10: Mécanismes de liaisons inter faciales : a) adhésion mécanique, b) interactions électrostatiques, c) liaisons chimiques, d) interpénétration, e) couche inter faciale formée par inter diffusion [6].**

D'après la théorie de la liaison chimique, la structure de l'interphase est liée au mode d'action de l'agent de pontage organosilicié  $\text{RSi(X)}_3$  di fonctionnel, utilisé dans les ensimages. Les molécules d'organosilanes possèdent donc deux sites réactionnels. D'une part, le groupement alkoxy hydrolysable X est capable de réagir avec la surface minérale et ainsi lors de l'hydrolyse, former des silanols qui peuvent créer des liaisons siloxanes Si-O-Si (liaisons covalentes) ou hydrogène avec les silanols de la surface du verre. D'autre part, le groupement fonctionnel organique R compatible avec la résine, favorise la création de liaisons avec la matrice par réactions chimiques ou par la formation d'un réseau interpénétré.

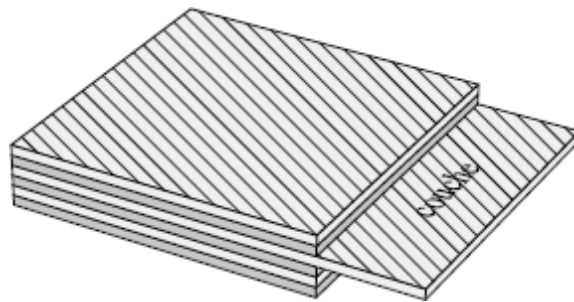
## Chapitre 2

# Calcul des différentes caractéristiques d'un composite

## II.1. Détermination des constantes élastique relatives au comportement du composite étudié :

### II.1. 1. Structures composites stratifiées :

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines, les couches sont également nommées plis ou nappes. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine (figure.11). Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de plis en optimisant les directions des nappes en fonction des charges qu'elles doivent subir.



**Figure 11: Stratifié constitué de couches parfaitement liées.**

L'objectif de la partie *Comportement du matériau* est d'obtenir une loi de comportement macroscopique du matériau composite après procédé de fabrication et prenant en compte les effets liés à l'endommagement du matériau, afin de l'utiliser dans un code de calcul par éléments finis (simulation EF) à échelle réelle. En effet, bien qu'il existe des techniques de modélisation multi échelles directes dans un calcul de structure. La taille et la complexité des modèles microscopiques imposent l'utilisation d'un modèle d'endommagement macroscopique afin de palier les coûts de calcul excessifs intervenant si l'on effectue directement le passage de l'échelle microscopique à l'échelle de la structure.

Cependant, la plupart de ces modèles d'endommagement macroscopiques restent phénoménologiques et reposent sur une description des effets de mécanismes physiques observés expérimentalement (anisotropie initiale du matériau, anisotropie de l'endommagement, viscosité). Ainsi les approches multi échelles peuvent servir de plateforme d'essais virtuels dans le but de déterminer la valeur de certains paramètres de couplage, ou

encore pour enrichir les modèles en rendant compte de phénomènes difficilement quantifiables expérimentalement (propriétés mécaniques ou effet de l'endommagement hors-plan).

L'hypothèse de Kirchhoff pour le cintrage de plaques plus au moins minces est valide et par conséquent, pour lequel la théorie classique des stratifiés (CLT) est une description appropriée. Une couche de tissu tissé orthogonale renforcés peut être généralement caractérisée au niveau macroscopique comme matériau orthotrope avec neuf constantes élastiques indépendantes ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ ). Cela peut être généralisée à d'autres types d'armature textile comme en trois dimensions tissus et non-sertir tissus.

Dans cette sous-partie, nous utilisons la matrice de souplesse définie par Berthelot. Afin d'écrire le module d'Young en fonction de l'angle de sollicitation  $\theta$ ,  $E = f(\theta)$ . Rappelons que le matériau étant un composite Orthotrope de fibres de verre tissées  $0^\circ/90^\circ$  dans une matrice de résine Polyester. S'il est sollicité dans la direction  $0^\circ/90^\circ$ , la réponse est identique mais elle diffère entre les deux angles de sollicitations [7].

Nous commençons par déterminer les termes de matrice de souplesse. Ensuite, nous appliquons la transformation mathématique permettant de passer d'une matrice dans l'axe (i.e. direction de sollicitation  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ) à une matrice hors axe. Enfin, nous analysons le modèle obtenu et ses limites.

### II.1. 2. Définition de la matrice de souplesse

Dans notre étude, trois cas sont présentés : le premier matériau de directions des fibres par plis ( $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$ ), et le deuxième matériau de direction des fibres plis ( $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ ) Troisième cas directions des fibres ( $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ$ ).

#### Cas d'une sollicitation dans son axe : [7,10]

Considérons un matériau composite orthotrope dont une couche est représentée sur la figure 12. Les axes 1 (ou L) et 2 (ou T) correspondent respectivement aux angles  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$ . La figure présente un pli de fibre de verre tissu tissé en taffetas.

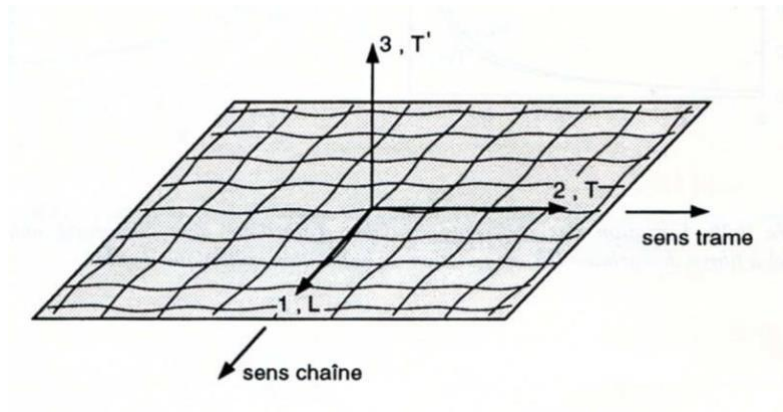


Figure 12 : Couche d'un matériau orthotrope [7].

D'après Berthelot, le comportement élastique reliant déformation et contrainte d'un matériau orthotrope est décrit avec les constantes de souplesse  $S_{ij}$  :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Les constantes de souplesse sont définies pour un matériau composite orthotrope sollicité dans son axe, la matrice de souplesse s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Le comportement élastique d'un matériau orthotrope peut alors être décrit par 9 constantes indépendantes [36] :

- 3 modules d'Young :  $E_1, E_2, E_3$  ou  $E_L, E_T, E_{LT}$ ,
- 3 coefficients de Poisson :  $\nu_{12}; \nu_{13}; \nu_{23}$  ou  $\nu_{LT}; \nu_{LT'}; \nu_{TT}$
- 3 modules de cisaillement :  $G_{12}, G_{13}, G_{23}$  ou  $G_{LT}, G_{LT'}, G_{TT}$

Les résultats accessibles par les essais de traction déjà réalisés sont :

Les essais permettent de déterminer les propriétés  $E_L, \nu_{LT}, E_T$  et  $\sigma_{\max}$ .  $E_L$  et  $E_T$  sont les modules d'Young respectivement sollicité dans le sens longitudinal et transversal.  $\nu_{LT}$  est le coefficient de Poisson.  $\sigma_E$  la contrainte à la limite d'élasticité et  $\sigma_{\max}$  la contrainte maximale.

### **Les modules d'Young :**

- $E_1$  ( $E_L$ ) est calculable en effectuant un essai de traction dans la direction L ( $0^\circ$ ) : on mesure la contrainte  $\sigma_1$  et la déformation  $\varepsilon_1$  dans cette direction. Ces valeurs sont reportées dans les tableaux. On peut alors directement calculer  $S_{11}$  avec  $S_{11} = \frac{1}{E_L}$ .
- $E_2$  ( $E_T$ ) est calculable en effectuant un essai de traction dans la direction T ( $90^\circ$ ) : on mesure la contrainte  $\sigma_1$  et la déformation  $\varepsilon_1$  dans cette direction. Nous ne l'avons pas fait car le matériau est symétrique par rapport à  $\theta = 45^\circ$ . Par conséquent On peut alors directement donner  $S_{22}$  avec  $S_{22} = S_{11} = \frac{1}{E_{11}} = \frac{1}{E_{22}}$ .

### **Le coefficient de Poisson :**

- $\nu_{12}$  ( $\nu_{LT}$ ) est calculable en effectuant un essai de traction dans la direction L ( $0^\circ$ ) : on mesure la contrainte  $\sigma_1$  et les déformations  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ . ceci a été réalisé avec les jauges d'extensomètres. On peut ainsi accéder à :  $S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$  ou  $\nu_{LT}$   

$$= \nu_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}}$$

### **Le module de cisaillement :**

- Le module d'élasticité  $G_{12}$  peut être calculé à l'aide des essais hors axe (ou de cisaillement) avec :  $G_{12} = 1/S_{66}$ .

### II.1. 3.Méthode de calcul des éléments de composite :

#### II.1. 3.1. La loi des mélanges :

Les propriétés élastiques du matériau stratifié sont déterminées par la loi des mélanges. Ces propriétés de ces éprouvettes sont le module d'Young ( $E_1$  - dans la direction 1,  $E_2$  - dans le sens 2,  $E_3$  - dans le sens 3), des coefficients de Poisson ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ , et  $\nu_{23}$ ), en plan le module de cisaillement ( $G_{12}$ ) et modules de cisaillement transversaux ( $G_{13}$  et  $G_{23}$ ) . Les constantes élastiques du composite unidirectionnel laminé sont calculées en utilisant la loi des mélanges par les relations de l'équation (II- 3).

Module d'Young : Fibre  $E_f$  , matrice  $E_m$

Coefficients de poisson : Fibre  $\nu_f$  , Matrice  $\nu_m$

$$\begin{aligned}
 E_2 &= E_m \left[ \frac{E_f + E_m + (E_f - E_m)V_f}{E_f + E_m - (E_f - E_m)V_f} \right] \\
 \nu_{12} &= \nu_f V_f + \nu_m V_m \\
 \nu_{23} &= \nu_f V_f + \nu_m V_m \left[ \frac{1 + \nu_m - \nu_{12} \frac{E_m}{E_1}}{1 - \nu_m^2 + \nu_m \nu_{12} \frac{E_m}{E_1}} \right] \\
 G_{12} &= G_m \left[ \frac{G_f + G_m + (G_f - G_m)V_f}{G_f + G_m - (G_f - G_m)V_f} \right] \\
 G_{23} &= \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}
 \end{aligned} \tag{II.3}$$

**II.1. 3.2. Rapprochement unidirectionnel Akkerman [12] :**

Comme point de départ, il est utile d'examiner s'il est vraiment nécessaire d'utiliser les mécanismes de stratifié de tissu présentée ici WF (plis tissés renforcés). Serait-il pas plus facile à utiliser l'équivalent plie à directions unidirectionnelles (UD) pour atteindre les mêmes résultats avec l'approche CLT existant. Pour ce faire, l'équivalente propriété unidirectionnelle doit être déterminée en premier.

L'approximation la plus simple est un ensemble de propriétés élastiques  $\{E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}\}$  utilisé pour qui utilise les formules suivantes :

$$\begin{aligned} E_1^{UD} &= E_2^{UD} = E_1^{WF} \\ G_{12}^{UD} &= G_{12}^{WF} \\ \nu_{12}^{UD} &= \nu_{12}^{WF} \end{aligned} \quad (\text{II. 4})$$

On n'entrera pas dans les détails de la détermination de toutes les propriétés. On peut simplement mettre en évidence les essais destinés à caractériser ces propriétés qui sont assez proches des essais présentés pour caractériser les plis UD. Cet ensemble a des raideurs de la membrane identique à l'original des plis tissé renforcé WF [12-16]. Les calculs de cette méthode ont été faites suivants le composite à direction des fibres de  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$ , les raideurs de flexion des nappes WF qui présentent le stratifié tissé, sont convertie en plis UD, par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{E_1}\right)^{WF} &= \left(\frac{2 E_1 (E_1 + (1 - \nu_{12}^2) E_2) - \nu_{12}^2 E_2^2}{E_1 E_1 (E_1 + 2E_2) + (1 + 2\nu_{12}^2) E_2^2}\right)^{UD} \\ \left(\frac{\nu_{12}}{E_1}\right)^{WF} &= \left(\frac{4 \nu_{12} E_2 (E_1 - \nu_{12}^2 E_2)}{E_1 E_1 (E_1 + 2E_2) + (1 + 2\nu_{12}^2) E_2^2}\right)^{UD} \\ \left(\frac{\nu_{13}}{E_1}\right)^{WF} &= \left(\frac{1 E_1 (\nu_{12} + \nu_{23} + \nu_{12} \nu_{23}) + \nu_{12}^2 E_2}{E_1 + (1 + 2\nu_{12}^2) E_2}\right)^{UD} \\ \left(\frac{1}{E_3}\right)^{WF} &= \left(\frac{(1 - \nu_{23}^2) E_1^2 + (1 + 2\nu_{12} + 2\nu_{12} \nu_{23}) E_1 E_2 - \nu_{12}^2 E_2^2}{E_1 E_2 (E_1 + (1 + 2\nu_{12}^2) E_2)}\right)^{UD} \\ \left(\frac{1}{G_{12}}\right)^{WF} &= \left(\frac{1}{G_{12}}\right)^{UD} \\ \left(\frac{1}{G_{13}}\right)^{WF} &= \left(\frac{1 + \nu_{23}}{E_2} + \frac{1}{2G_{12}}\right)^{UD} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

On donne les fractions volumiques des constituant 40% volume de fibres de verre ( $E=73$  GPa), 60% volume de résine ( $E=3.54$  GPa).

Le tableau II-3 nous présente après calcul les propriétés du renfort fibre de verre et résine polyester insaturé utilisées pour l'élaboration de notre matériau.

	Fibre de verre E	polyester
Fraction volumique (%)	40	60
Module d'Young $E$ (GPa)	73	3.54
Coefficient de poisson $\nu$	0.24	0.34
Module de cisaillement $G$ (GPa)	29	1.15

**Tableau 4: Propriétés mécaniques des constituants du composite polyester fibre de verre.**

Propriétés du composite	Loi des mélanges
$E_1 = E_2$ (GPa)	152
$E_3$ (GPa)	10
$G_{12}$ (GPa)	4.5
$G_{13} = G_{23}$ (GPa)	5
$\nu_{12}$	0.05
$\nu_{13} = \nu_{23}$	0.5

**Tableau 5: Propriétés mécaniques du composite polyester fibre de verre de plis  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$ , avec la méthode de la loi des mélanges**

Propriétés du composite	Rapproche UD (Akkerman)
$E_1 = E_2$ (GPa)	173
$E_3$ (GPa)	8.6
$G_{13} = G_{12}$ (GPa)	4.5
$G_{23}$ (GPa)	5
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.366
$\nu_{23}$	0.487

**Tableau 6: Propriétés mécaniques du composite polyester fibre de verre de plis  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$ , avec la méthode de Akkerman**

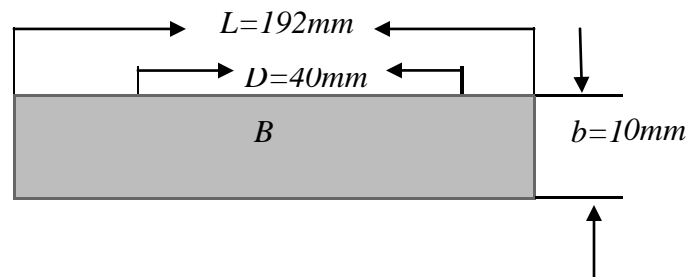
## Chapitre 3

# Etude d'un modèle numérique pour la simulation de la flexion à 3 points

### III.1. Etude de la flexion à 3 points sur un composite :

Avant de faire les essais ou la simulation, il faut choisir une norme de l'éprouvette qui est compacte avec le type du matériau.

Les éprouvettes de notre matériau composite sont découpées à partir des plaques élaborées à l'aide d'un disque diamanté sous un jet d'eau selon les dimensions préconisées par la norme ASTM D790 pour la flexion 3 points pour les matériaux composites orthotrope. La figure 13 illustre les dimensions des éprouvettes de flexion 3 points de notre étude.

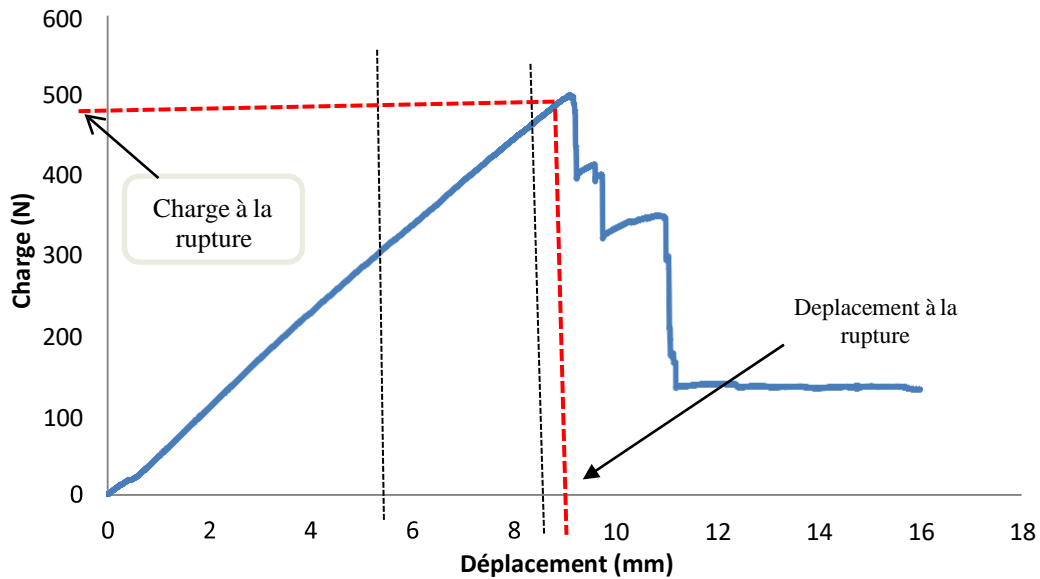


**Figure 13: Epreuve de flexion 3 points pour le composite avec  $h=10$  mm.**

#### III.1. 2. Description des essais de flexion 3 points sur le composite :

L'allure des courbes charge / déplacement présente une forte similitude entre le comportement des composites. Un exemple de courbe charge / déplacement en flexion 3 points d'un composite est illustré par la Figure 14, cette courbe se compose de trois phases différentes I, II, et III [17]:

- La phase I traduit le comportement non linéaire élastique et réversible du matériau au début de la sollicitation.
- La phase II correspond à un comportement linéaire, radieuses la rupture progressive des 6 plis.
- La phase III située au-delà du sommet de la courbe, correspond à une ruine en forme d'escalier (chute brutale de la charge), c'est la rupture des 1 ères roving, il reste des ponts de fibres, qui vont constituer une certaine résistance traduite par un palier après la rupture des plis restants.



**Figure 14: Réponse du composite soumis à la flexion 3 points.**

Pour la présente simulation, on choisit toujours un composite polyester fibre de verre à 2% de catalyseur, 5 plis les directions des fibres sont  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$ .

La géométrie des matériaux étudiés impose la définition de conditions de périodicité sur les contours du VER [18 ; 20]. Celles-ci sont ici appliquées sur ABAQUS telles quelles sont décrites par hallal et al. , neuf constantes doivent être imposées entre toutes les paires de nœuds périodiques des différentes faces du VER (sauf sur les arêtes et les sommets).

Dans les deux cas considérés ici, le composite est supposé orthotrope, son tenseur desouplasse  $S$  s'écrit à partir de  $E_{ij}$ ,  $\nu_{ij}$  et  $G_{ij}$  qui sont les constantes élastiques du matériau orthotrope, soient respectivement les modules d'Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement dans les directions  $i$  et  $j$  considérées. Les résultats trouvés et utilisés lors de la simulation sont présentés dans les tableaux 5 et 6.

### **III.2.Simulation numérique de l'essai de flexion à 3 points de notre matériau composite (polyester / fibre de verre) :**

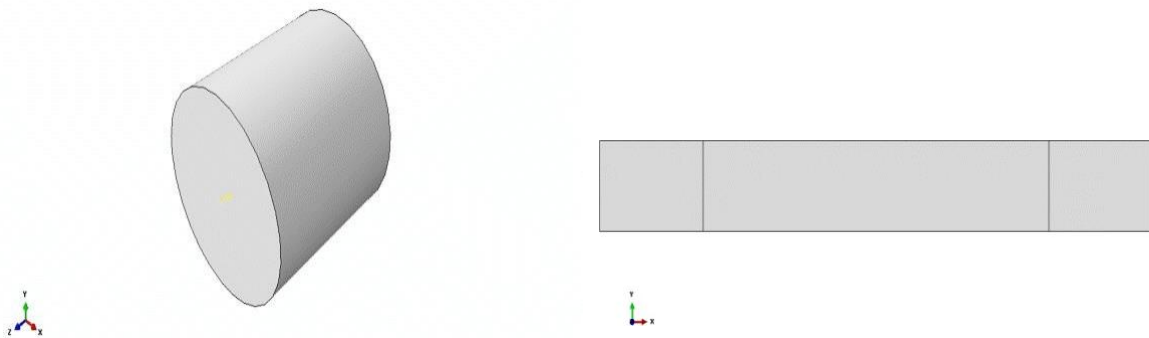
Dans ce travail , nous allons tenter une approche numérique en utilisant le logiciel de simulation numérique ABAQUS [19] ,pour décrire la flexion du composite au premier lieu , et de contraintes et de déformations pour l'essai de flexion 3 points , et la charge et le déplacement pour l'essai de flexion 3 points pour les 3 différentes composites Verre/ UP à 2% de catalyseur et de direction des fibres de  $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ$  , et aussi  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$  aussi  $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0$ .

Les propriétés du matériau ont été déterminées dans le paragraphe précédent, et on utilise les deux simulations avec deux propriétés différentes (Loi des mélanges et l'approche de Akkerman), et on introduit ces propriétés dans le modèle créé sur le logiciel Abaqus afin de simuler l'essai de flexion à 3 points d'un composite à 2% de catalyseur.

### III.2.1. Création du modèle numérique (Part) :

Pour cela on a choisi les dimensions de l'éprouvette de flexion 3 points (figure 15), et un mobile qui se propage selon un déplacement donné.

- En appuyant sur (creat part) et nommez le composite (specment), on choisit le type (déformable) et nous définissons (base shape shell).
- En appuyant sur (Partition face sketch) et en sélectionnant le cas sur le côté droit et gauche du rectangle
- En appuyant sur (creat part) qui la dimension du pioncent (part 2) et choisie le comme type (discrete rigid) et nous définissons (base shape solid)
- (creat circle) et précisez ses dimensions
- (creat shell from solid)



**Figure 15 : Poinçon et éprouvette de flexion 3 points**

### III.2.2. Création des propriétés du matériau (Property) :

- (creat material) ) et nommez le matériau composite comme ( lamina)
- mechanical elasticity elastic
- type Orthogonal
- Remplissez les données du tableau module d'Young
- Spécifier part (specment)

- Nous avons entré les dimensions 0.1 en épaisseur du pli (thickness)
- Nous déterminons direction des fibres pour chaque plis (0.45.-45.60.90)
- composite layup manager ( Make calculated sections symmetric)
- Cliquez view et nos yeux part display et options et apply afin de voir la symétrie des plis dans la simulation.

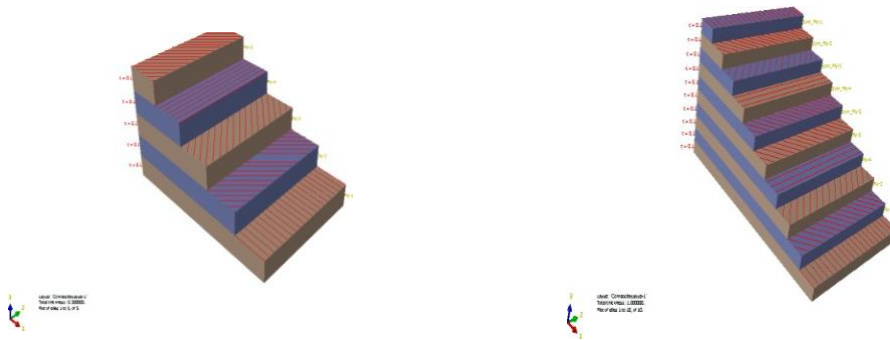


Figure 16: direction des fibres dans les plis

### III.2.3. Assemblage (Assembly) :

- creat instance Et nous avons (part-2 et specment)
- rotate instance , pour crée les 2 parts fixe encastré et un part mobile avec déplacement égale à -10 mm
- create datum point offset from point

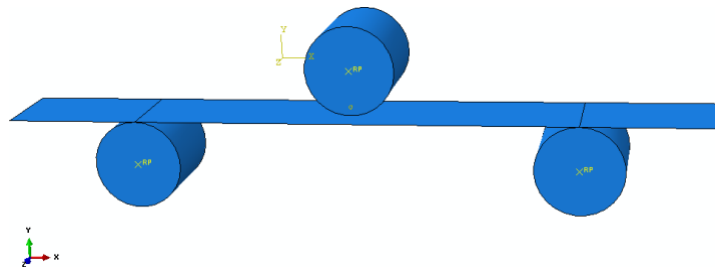


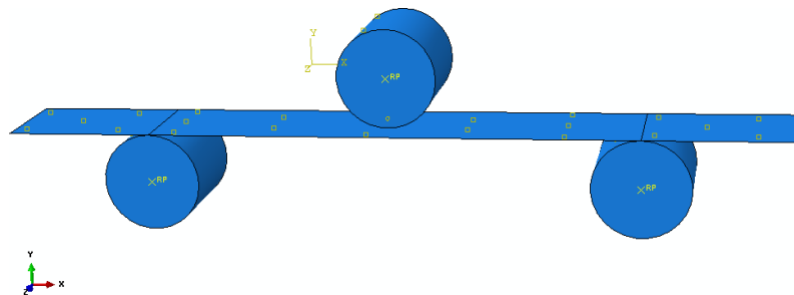
Figure 17: L'assemblage des éléments de la simulation

### III.2.4. Step:

- step : statique gèneral
- (step manager) et (create step-1)
- (incrementation )
- nous déterminons increment size initial 0.25 minimum 1E-005 maximum 1

### III.2.5. Interaction :

- (find contact pairs CP-1 part)
- Nous avons cliqué sur le symbole de rayon (x y z)
- (find contact pairs CP-1 part2)
- Nous déterminons include pairs within separation tolerance 0.1 Et nous avons cliqué (find contact pairs)
- (creat interaction property intprop-1)
- on clique sur l'option mechanical tangential behavior Et nous avons choisi friction formulation penalty et friction coeff 0.15



**Figure 18: Création des interactions entre les éléments de l'essai**

### III.2.6. load:

- Create boundary condition (BC-1)
- Pressage RP1 et RP2 et nous déterminons encastre ( $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ )
- (Create boundary condition) Et nous déterminons step initial et type for selected step displacement /rotation, avec l'élimination de tous les déplacement et rotation sauf U2 (selon la direction Y)

- (Boundary condition manager)
- (Create boundary condition step-1)
- En appuyant sur part RP  $U_2 = -10$  , on choisit un déplacement égale -10 mm de la flèche .

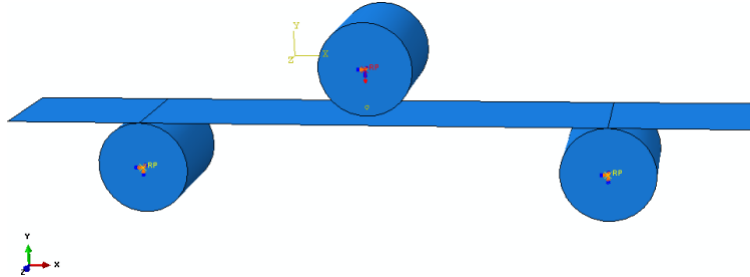


Figure 19: Les paramètres de force et déplacement du modèle

### III.2.7. Mesh :

- (part specment)
- (seed part) Et nous déterminons approximate global size 1
- (mesh part) et pour choisir les éléments de maillage
- (assign element type)

Dans ce type de matériau on choisie le type de Maillage : *Standart , lineiare , S3: A 3-node triangular general-purpose shell, finite membrane strains.*

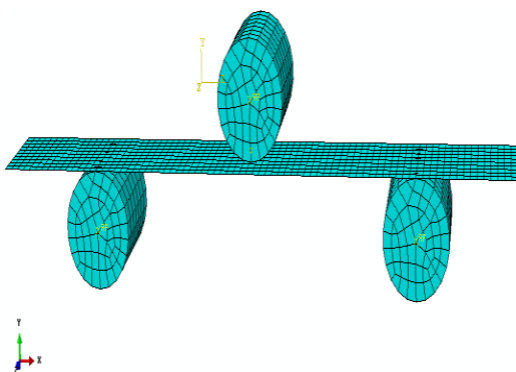


Figure 20: Le maillage et type de maillage de l'éprouvette

**III.2.8. Job :**

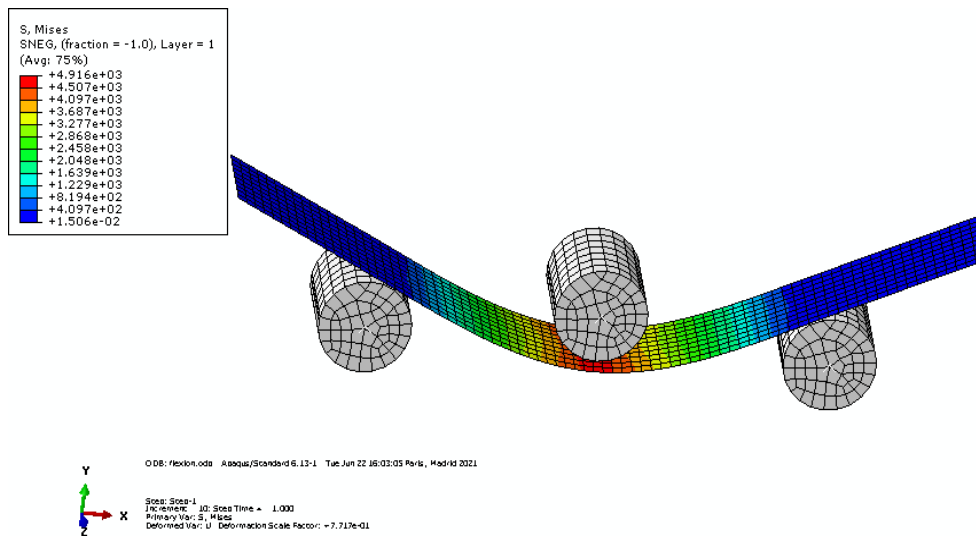
C'est la dernière étape avant la simulation, on a choisi le nom du fichier résultats et différents éléments relatifs à la vitesse de la simulation et la vérification de la justesse du modèle numérique.

# Chapitre 4

## Résultats et interprétation

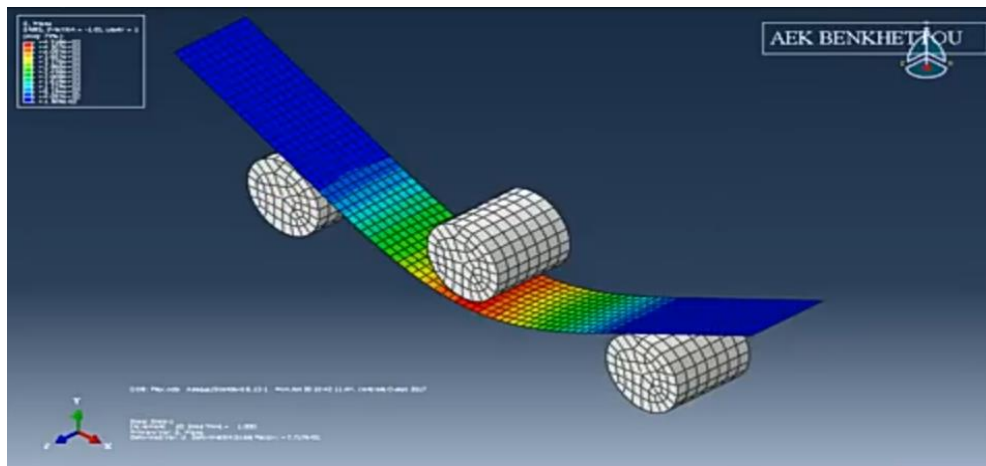
#### IV-1. Résultats pour composite à direction des fibre 0/45/-45/60/90 :

Les résultats de la simulation présenter par les contraintes de Van Mises sur la figure IV-1.

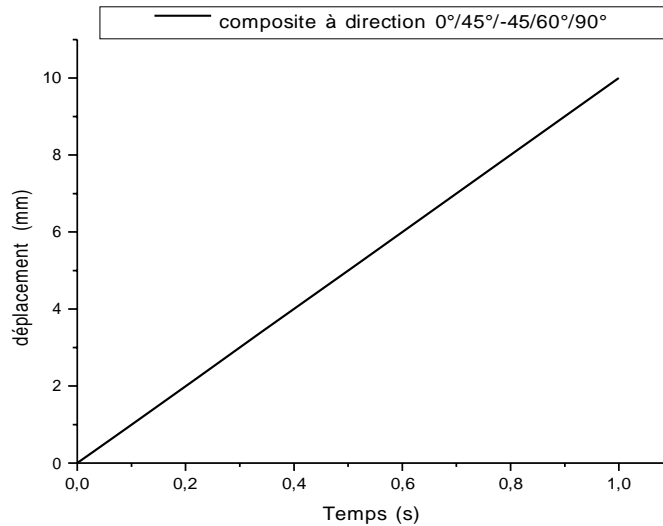


**Figure 21: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90**

On remarque que la partie sollicitée à une rupture se trouve dans l'axe du poinçon, ou on trouve des contraintes équivalentes à 4.91 MPa, d'où une contrainte considérable atteinte par ce type de matériau. La figure IV-2 nous présente l'avancement du déplacement  $U_2$  durant le temps de la simulation de la flexion.



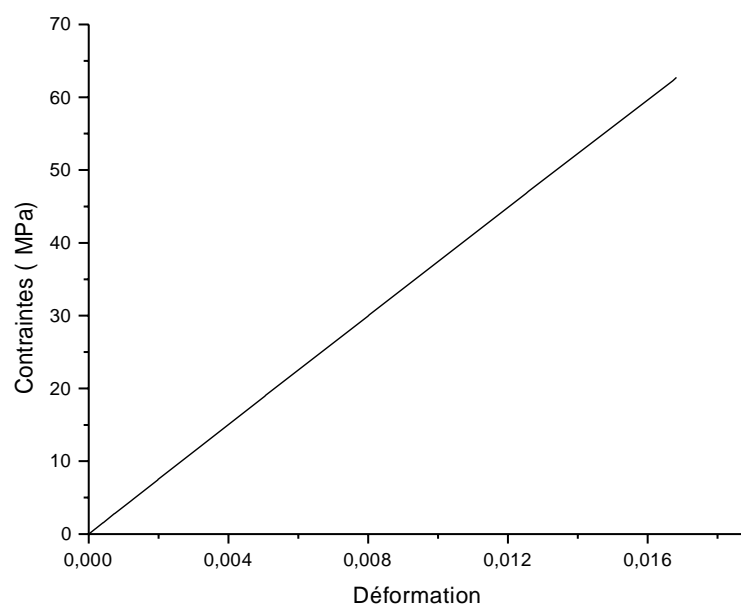
**Figure 22: Déplacement de la flèche  $U_2$  pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90**



**Figure 23: Déplacement d la flèche U2 vis-à-vis le temps de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90**

-Nous avons étudié le point de contact à la courbure maximale

On a trouvé une courbe linéaire du propagation de la flèche par rapport au temps de l'essai , ce qui est normale vu le comportement mécanique des composite , qui n'ont pas ( dans la plus part des cas ) le domaine plastique , d'où une courbe uniforme linéaire .la figure 24 nous présente la variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal de l'éprouvette .

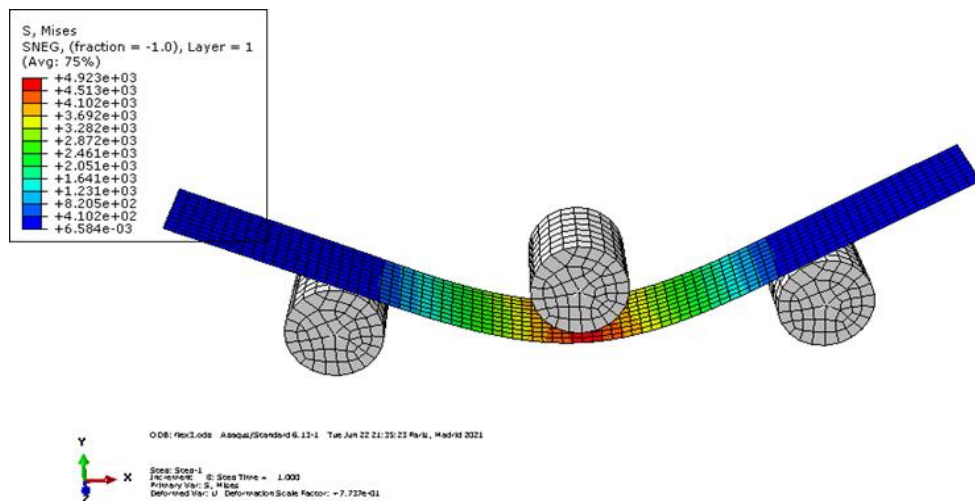


**Figure 24: La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal du l'éprouvette du composite à direction 0/45/-45/60/90**

On remarque aussi une courbe linéaire, qui finit sur une valeur de contrainte de 65 GPa , et une déformation de 0.016 , ce qui n'est pas le cas dans les résultats des autre composite .

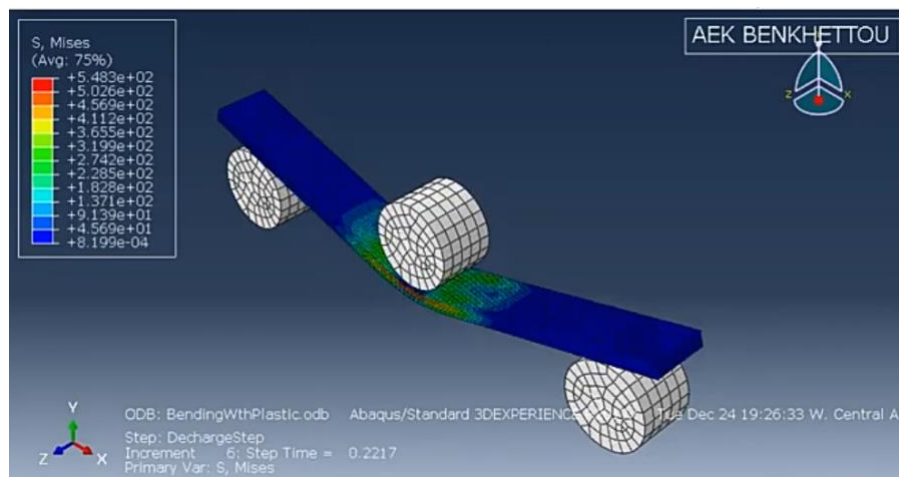
**IV-2. Résultats pour composite à direction des fibre 0/90/0/90/0 :**

Les résultats de la simulation pour ce composite présenter par les contraintes de Van Mises sur la figure 25.

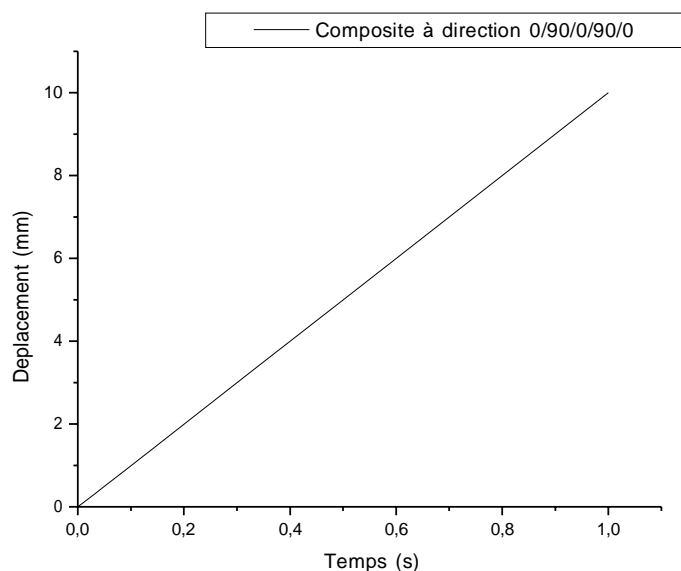


**Figure 25: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/90/0/90/0**

On remarque que la partie sollicitée à une rupture se trouve dans l'axe du pioncent, ou on trouve des contrainte équivalente à 0.566 GPa, d'où une contrainte moins que le premier composite, d'où une forte diminution à la résistance à la force de flexion. La figure 26 nous présente l'avancement du déplacement U2 durant le temps de la simulation de la flexion.



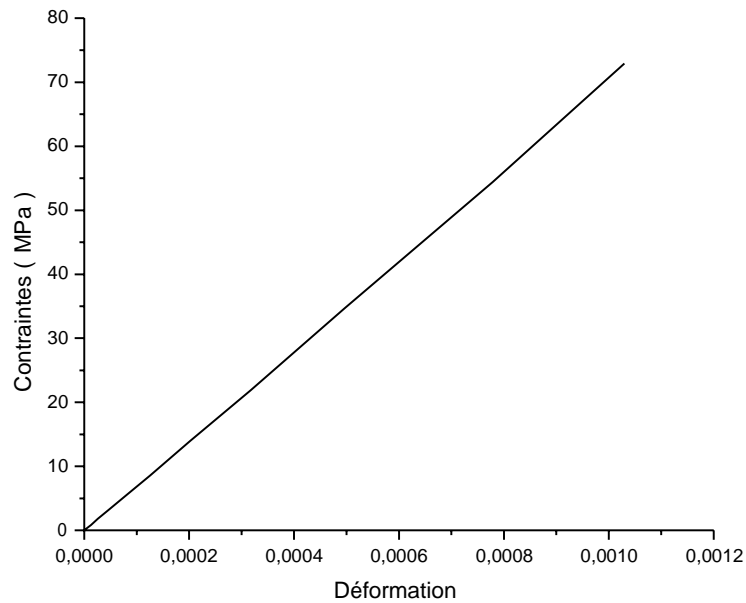
**Figure 26: Déplacement d la flèche U2 pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/60/90**



**Figure 27: Déplacement d la flèche U2 vis-à-vis le temps de la flexion 3 points du composite à direction 0/90/0/90/0**

La figure 27 nous présente la variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversale de l'éprouvette.

On remarque aussi une courbe linéaire, qui finit sur une valeur de contrainte de 65 GPa , et une déformation de 0.016 , ce qui n'est pas le cas dans les résultats des autre composite .

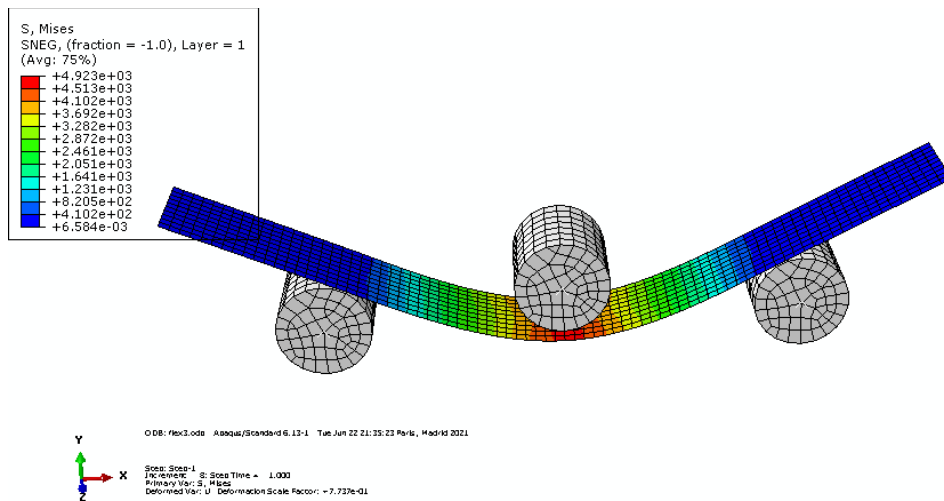


**Figure 28 : La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversale  
dul'éprouvette du composite à direction 0/90/0/90/0°**

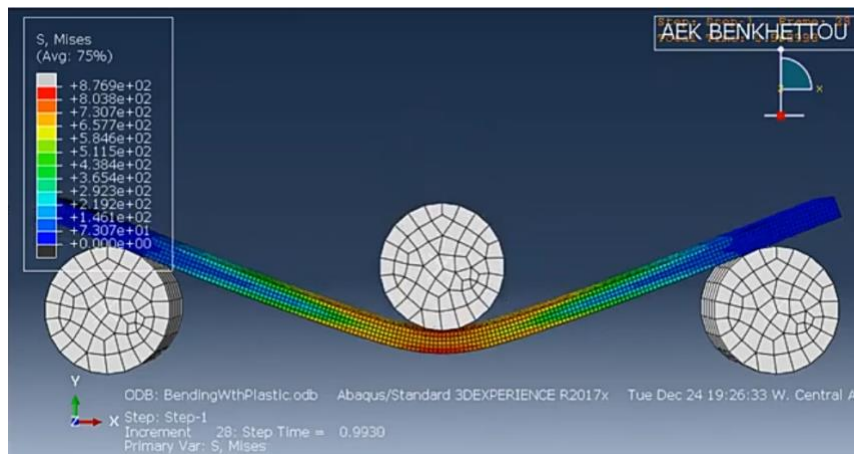
On remarque aussi une courbe linéaire, qui se termine sur une valeur de contrainte égale à 75 MPa , et une déformation de 0.0011 , d'où une augmentation de la résistance au contraintes mais diminution conséquente de la déformation de l'éprouvette , donc le matériau devient plus rigide que le premier mais plus résistant .

#### **IV-3. Résultats pour composite à direction des fibre 0/45/-45/90/45 :**

Les résultats de la simulation pour ce composite présenter par les contraintes de Van Mises sur la figure 29.

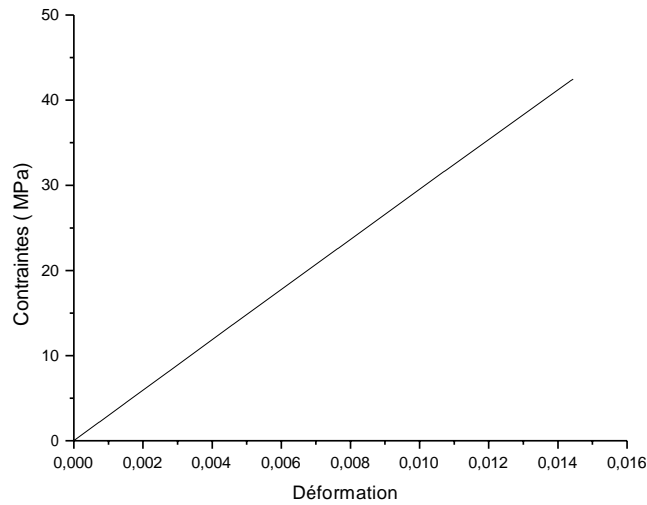


**Figure 29: Contrainte de Van Mises de la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/90/45**



**Figure 30 : Déplacement d la flèche U2 pour la flexion 3 points du composite à direction 0/45/-45/90/45**

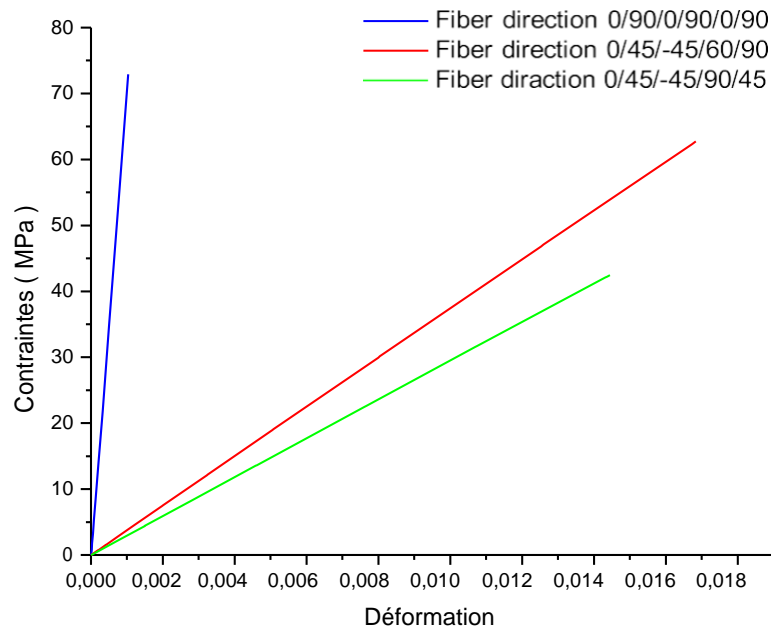
La figure 30, présente la variation des contraintes sur un point dans la région de rupture, vis-à-vis la déformation transversale de l'éprouvette.



**Figure 31: La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversal de l'éprouvette du composite à direction 0/45°/-45/90/45**

On remarque un léger changement du comportement par rapport au composite de direction 0/45/-45/60/90 , d'où le comportement ne varie pas beaucoup .

La figure 31 présente la variation des différentes caractéristiques mécaniques tel que la déformation et la contrainte dans un point choisi dans l'éprouvette lors de la simulation, par rapport au changement des directions des fibres dans les plis des composites.

**IV-4. Comparaison des résultats des différents composites étudiés :**

**Figure 32 : La variation des contraintes vis-à-vis la déformation transversale de l'éprouvette du composite à différentes directions des fibres**

On remarque un changement du comportement mécanique des composites, lors du changement des directions des fibres, dont les contraintes trouvées diffèrent de 40 MPa jusqu'à 75 MPa, aussi un changement de la déformation qui varie entre 0,0016 jusqu'à 0,016, donc une variation énorme. Donc les directions 0/45/-45/60/90 et 0/45/-45/90/45 ont des déformations plus importantes, d'où un domaine élastique plus large, mais subissent des contraintes moins que le composite à direction 0/90/0/90/0, ce qui signifie que la direction des fibres est importante sur le plan comportement en flexion des composites.

## Conclusion générale :

Ce projet de mémoire a pour objectif l'étude des comportements en flexion des matériaux composites par une simulation de la flexion 3 points des stratifiés à différents empilements et différentes orientations des fibres. Cette étude a mis en évidence la variation des propriétés élastique en fonction de taille de maillage ainsi que l'effet du changement des directions des fibres dans les plis sur le comportement mécaniques en flexion des composites, celle-ci doit tenir compte de plusieurs paramètres comme : le nombre de plis, la fraction volumique, le type des propriétés et la morphologie des fibres. Cette étude a mis en évidence l'intérêt de l'utilisation des critères de calcul des stratifiés tel que la méthode de Akreman et la loi de mélange, pour calculer les différentes propriétés mécaniques du matériau composite élaboré à partir de résine polyester et fibre de verre.

L'analyse des propriétés mécanique et l'identification des Modules des composite à partir des propriétés de la matrice et du renfort, ont permis d'avoir des modules introduits dans le logiciel Abaqus, et les résultats ont permis de mettre en évidence après simulation de la flexion du composite que le comportement mécanique en flexion des éprouvettes à  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/60^\circ/90^\circ$  et  $0/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ$  est assez semblable. En fait, la distinction des deux sens a été basée sur des différences dans le comportement en flexion. Cependant, ces différences sur le matériau à direction  $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$  semblent influencer énormément leur comportement qui est assez éloigné. La direction des fibres est très importante dans la fabrication des composites, et nécessite un bon emplacement des directions dans les plis, avec des calculs préventifs, afin de ne pas avoir des endommagements rapides liés aux sollicitations mécaniques lors du service de ces matériaux.

### Bibliographie

[1] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4<sup>ème</sup> Edition, Lavoisier 2005.

[2] Pierre Jaquinet, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, Paris, 1991..

[3] Salim Belaid , « Etude de l'effet du vieillissement sur le comportement mécanique d'une résine en polyester renforcé à la fibre de verre », Université de Laghouat , 2016

[4] Guide de Rédaction de SME de COV, Secteur des Composites (Plasturgie), 2004, p89-95.

Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4<sup>ème</sup> Edition, Lavoisier 2005.

[4] Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, Des Matériaux ,3<sup>ème</sup> Edition, Ecole de Montréal, 2000.

[5] Daniel Gay, Matériaux Composites 4<sup>ème</sup> Edition, Hermès 2009.

[6] Maurice Reyne Technologie des composites Edition HERMES, Paris, 1990.

[7] Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010.

[8] site : <http://www.utc.fr/tomas/Themes/Unités/>.

[9] Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites. International Journal of Fatigue, 29(3), pp.457–470.

[10] Vetrotex, Saint-Gobain. Fiche de données de sécurité, 2003: p. 1-13.

- [11] D. GAY «Matériaux composites», HERMES, Paris, 1997, 672P.
- [12] Akkerman R., *J.Composites.Part B*, 37 (2006) 108.
- [13] Le plastique armé: application au matériel tubulaire. Techniped. 1986: Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel.
- [14] Barrère-Tricca, C., Relation entre les propriétés de la résine et le phénomène de perlage de tubes composites verre - époxy. Thèse de doctorat (*Chimie et physico-chimie des polymères*) Soutenue à Paris VI, 1998.
- [15] M.GEIER, D.DUEDAL «Guide pratique des matériaux composites», TEC & DOC (Lavoisier), Paris, 1985, 349P.
- [16] J.WEISS, C. BORD «*Les matériaux composites, Tome I: Structure, constituants, fabrication*», Ed. l'Usine nouvelle, Paris, 1983, Partie: A-B-C.
- [17] R. Polansky', V. Mentlik, P. Prosr, J. Susir, *Influence of thermal treatment on the glass transition temperature of thermosetting epoxy laminate*, Polymer Testing, vol. 28, p. 428–436, Elsevier, 2009.
- [18] Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V., Jeulin, D. “Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 3647–3679, 2003.
- [19] User's Guide Abaqus 6.14 Documentation Collection, Abaqus/CAE User's Guide, Abaqus Analysis, Abaqus Example Problems Guide · Abaqus Benchmarks ....
- [20] Friedman HL. *Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry: Application to a phenolic plastic*. J Polym Sci Part C 1965;6:183–9