

N° Ordre...../DGM/ FSI/UMBB2019

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de L'Ingénieur**  
**Département GénieMécanique**

## **Mémoire de Master**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Maintenance Industrielle

### **THEME**

**COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES**  
**STRATIFIES EN FLEXION :**  
**COUTURE & ENTAILLE**

**Présenté par :**

**Promoteur : Dr. MECHAKRA .H**

- ❖ BOUGUEROUMA SLIMANE
- ❖ KENDIL NOUR EL ISLEM

**Promotion 2018 - 2019**

# *Remerciement*

*Je remercie avant tout Dieu de m'avoir donné la volonté et la santé pour réaliser ce modeste travail. et nous remercions aussi nos parents pour leur sacrifice*

*Ce travail a été mené rénovation des matérielles aéronautique (**aéroport houari Boumediene**) qui se trouvent à **Dar El-Beida**.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Mechakra Hamza**..., professeur à l'**université de Boumerdes** , a encadré mon travail.*

*Le remercie d'avoir accepté mon projet et de m'avoir prodigué tous les conseils Indispensables. Je le remercie aussi d'avoir suivi, guidé soutenu et fait confiance à mon travail..*

*Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière pour mes collègues de la promotion "**maintenance industriel**" sans oublier Monsieur **Chelil** vise doyen de l'université et professeur à l'université de Boumerdes (**INGM**) et Monsieur **Lechheb** de leurs soutien et leurs compassion envers nous pendant cette dernière année. Et pour mes amies de longues dates.*

*Merci pour tout le moment qu'on a passé ensemble.*

*Je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin, dans ce travail, merci Infiniment.*

## *Dédicaces*

*Je dédié ce modeste travail à mes chères parents, "MON PERE" le héros de ma vie, Et "MA MERE" l'étoile qui brille toujours mes jours, les mots ne suffisent pas pour vous remercie assez.*

*Pour mes deux cousine " Hanane et Dounia " et ma grande mère*

*Ainsi que pour tous mes oncles et mes tantes, surtout" Linda, Boualem et Ouafiba "*

*A toutes les familles " BOUGVEROUMA & GUERROUMI"*

*Je dédié aussi, mon binôme " Nour el Islem " qui m'a beaucoup aidé dans ce projet*

*A tous mes fidèles amis et collègues: TAREK, HAKIM, BOUDJEMAA ET AYMEN.*

## *Dédicaces*

*A la mémoire de ma grand-mère " YEMA AICHA ", Allah Yarhamha*

*Je dédié ce modeste travail à mes chères parents, " MON PERE " le héros de ma vie, Et " MA MERE " l'étoile qui brille toujours mes jours, les mots ne suffisent pas pour vous remercie assez.*

*Pour mes deux frères " AYMEN & ADEM ", ainsi que ma sœur " ASMA "*

*Pour tous mes oncles et mes tantes, surtout" AMER, SAID, SAMIRA & FATIMA ZAHRA "*

*A toutes les familles " KENDIL & KHELIFI "*

*Je dédié aussi, mon binôme " SLIMANE " qui m'a beaucoup aidé dans ce projet*

*A tous mes fidèles amis et collègues: TAREK, ILYES, MALEK, HAKIM, BOUDJEMAA.*

## **Résumé**

L'industrie des matériaux composites ne cesse d'évoluer et de croître en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. En substitution des matériaux d'origine fossile que les matériaux d'origine synthétiques commencent à voir le jour. C'est dans ce contexte notre travail de recherche est proposé.

Ce travail consiste en une caractérisation analytique et expérimentale des matériaux composites stratifié en verre/epoxy, préparé par le procédé sous vide et utilisé dans la fabrication des avions. Les propriétés mécaniques de ces stratifiés ont été déterminer par le biais de flexion 3 points à l'aide d'une machine universelle ZWICK Roell effectués sur différents éprouvettes, Elle montre à nous que les caractéristiques mécaniques changent par rapport la quantité et l'état des matériaux (couturé ou non couturé, fissuré ou non fissuré), après l'analyse on constat que les valeurs numériques sont différentes à cause de la présence de la couture, nous avons remarqué qu'elle est une source de faiblesse pour les matériaux composites affectée des valeurs du module de Yong et la contrainte maximale.

## **Abstract**

The composite materials industry continues to evolve and grow by introducing new materials and technologies. As a substitute for materials of fossil origin as materials of synthetics origin. Begin to see the light of day. It is in this context that our research work is proposed.

This work consists of an analytical and experimental characterization of laminated Glass / epoxy, composite materials, prepared by the vacuum process and used in the manufacture of aircraft. The mechanical properties of these laminates were determined by means of 3-point bending using a ZWICK Roell universal machine made on different test pieces. It shows us that the mechanical characteristics change with respect to the quantity and the state of the materials (seamed or not seamed, cracked or not cracked), after the analysis we find that the numerical values are different because of the presence of the seam, we noticed that it is a source of weakness for composite materials affected Yong module values and maximum stress.

## ملخص

إن صناعة المواد المركبة في تطور و نمو دائم، و هذا بوضع مواد أصلية و تكنولوجيات جديدة مع استبدال المواد الأصلية المتبقية بالمواد الأصلية الصناعية التي بدأت بالظهور أو الانتشار.

و في هذا السياق اقترح علينا هذا البحث العلمي.

إن هذا العمل يتمثل في وصف تحليلي و تجريبي لمواد مركبة و مغلفة بزجاج (الإيبوكسي) محضرة عن طريق عملية فراغ و مستعملة في صناعة الطائرات تم تحديد الخواص الميكانيكية لهذه الشرائح أو الرفائق من خلال اثنتاء ثلاث نقاط باستخدام الآلة العالمية Roell ZWick .

أجريت على عينات مختلفة التي بينت لنا أن المواصفات الميكانيكية تتغير بالنسبة لحالة المواد (ملحمة أو غير ملحمة ، متصدعة أو غير متصدعة) .

بعد التحليل استنتجنا أن القيم العددية مختلفة بسبب التلحيم. و لقد لاحظنا أنها مصدر ضعف بالنسبة للمواد المركبة و مؤثرة في قيم وحدة يونغ و الحد الأقصى للضغوطات.

## Sommaire

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

### **CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES**

I.1 Introduction.....	3
I.2. Définition .....	3
I.3. Classification des composites : .....	4
I.4. Eléments constitutifs : .....	6
I.4.1. Le renfort .....	6
I.4.1.1. Différents types de renfort : .....	7
I.4.1.2. Les Principaux Matériaux de Renforts : .....	9
I.4.2. Matrice : .....	12
I.4.2.1 Résines thermoplastiques(TP) .....	13
I.4.2.2. Résines thermodurcissables (TD) .....	14
I.4.3. Les charge : .....	16
I.4.3.1. Charges renforçantes .....	16
I.4.4. Les additifs .....	20
I.4.4.1. Lubrifiants et agents de démoulage .....	20
I.4.4.2. Pigments et colorants.....	20
I.4.4.3. Agents anti-retrait et agents de fluage .....	20
I.4.4.4. Agents anti-ultraviolets.....	21
I.5. Architecture des matériaux composites : .....	21
I.5.1. Monocouches .....	21
I.5.2 Stratifié:.....	21
I.5.2.1 Désignation des structures stratifiées : .....	22
I.5.3. Sandwichs : .....	23
I.6.Conclusion.....	23

### **Chapitre II : mise en œuvre et mécanique de la rupture**

II.1. Introduction .....	27
II.2. Définition du moule .....	27
II.2.1. Mise en œuvre des matériaux composites.....	28
II.2.1.1. Moulages sans pression .....	28
II.2.1.1.1. Moulage au contact .....	28
II.2.1.1.2. Moulage par projection simultanée.....	29
II.2.1.2. Moulage sous vide .....	31
II.2.1.3. Moulage par compression.....	32
II.2.1.3.1. Moulage par injection de résine .....	32
II.2.1.3.2. Moulage à la presse à froid .....	34
II.2.1.3.3. Moulage par injection.....	35
II.2.1.4. Moulage en continu .....	37
II.2.1.5. Moulage par pultrusion.....	38
II.2.1.6. Moulage par centrifugation.....	39

II.2.1.7.	Moulage par enroulement filamentaire.....	41
II.2.1.7.1.	Enroulement circonférentiel .....	41
II.2.1.7.2.	Enroulement hélicoïdal.....	42
II.2.1.7.2.1.	Enroulement discontinu.....	42
II.2.1.7.2.2.	Enroulement continu .....	42
II.2.1.7.3.	Enroulement polaire.....	43
II.3.	Architecteur et mise en œuvre des matériaux composites .....	45
II.3.1.	Description.....	45
II.3.2.	Fibre de verre .....	46
II.3.3.	Mise en œuvre des matériaux composites.....	46
II.3.3.1.	Type de fibres de verre .....	46
II.3.3.2.	Présentation industrielle des renforts en verre textile.....	46
II.3.3.2.1.	Les unidirectionnels (UD).....	47
II.3.3.2.2.	Multidirectionnelle aléatoire .....	48
II.3.3.2.3.	Orientée.....	49
II.4.	Mécanisme d'endommagement et de rupture des matériaux composites .....	52
II.4.1.	Description.....	52
II.4.2.	Définition d'endommagement .....	53
II.4.3.	Utilisation de la mécanique de la rupture en conception .....	53
II.4.4.	Les mécanismes de rupture dans un composites unidirectionnelle.....	54
II.4.5.	Rupture des stratifiés.....	56
II.4.6.	Observation des mécanismes de rupture .....	58
II.4.6.1.	Observation par microscopies.....	58
II.4.6.2.	Visualisation par radiographies .....	59
II.4.6.3.	Analyses par emission acoustique .....	60
II.5.	Comportement mécanique des stratifiés.....	61
II.5.1.	Relation contrainte déformation dans le cas d'un stratifié.....	61
II.5.2.	Forces résultantes et moments résultants .....	62
II.5.3.	Etudes de quelque cas particuliers .....	65
II.5.3.1.	Cas d'une couche isotrope .....	65
II.5.3.2.	Couche orthotrope rapportée à ses axes principaux .....	66
II.5.4.	Stratifiés symétriques .....	67
II.5.4.1.	Empilement de plusieurs couches isotrope (Figure II.45) .....	68
II.5.5.	stratifiés antisymétriques : .....	68
II.6.	Conclusion.....	70

### **Chapitre III : Elaboration des composite stratifié sans et avec couture**

III.1.	Introduction .....	72
III.2.	Matières premières .....	72
III.2.1.	Résine Epoxyde .....	72
III.3.	Elaboration des plaques stratifiées .....	73
III.3.1.	Moulage sous vide .....	73
III.4.	La couture des stratifiés.....	74
III.5.	Présentation des matériaux utilisés.....	76

III.5.1. La surface de travail.....	76
III.5.2. Le renfort .....	76
III.5.3. La matrice (Epoxy 50-A1).....	77
III.5.4. La pompe à vide (composite repair console GMI-ANITA NG 9201).....	77
III.5.5. Tissus d'arrachage.....	78
III.6. Procédure de fabrication.....	79
III.7: Découpage des plaques.....	86
III.7.1 : Norme utilisée.....	86
III.7.2 : création d'un trou avec une fissure dans le centre des éprouvettes.....	89
III.8 Conclusion.....	89

## **Chapitre IV Procédures Expérimentales et Discussion des Résultats**

IV.1.Introduction .....	90
IV.2. Etude expérimentale du comportement en flexion.....	90
IV.3. Schéma de réduction de données.....	92
IV.4. Résultats expérimentaux.....	93
IV.4.1.Etude expérimentale du comportement en flexion 3 pointe.....	93
IV.4.1.1.Flexion Verre/Epoxy [2, 3, 8] plis sans couture.....	94
IV.4.1.2.Flexion Verre/Epoxy [2, 3, 8] plis sans couture.....	97
IV.4.1.3. Comparaison des résultats de flexion appliquée sur les éprouvettes.....	99
IV.4.1.4.Flexion verre/époxy [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 1.5 mm.....	101
IV.4.1.5. Flexion unidirectionnel [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 2.5 mm.....	103
IV.4.1.6.Flexion unidirectionnel [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 3.5 mm.....	105
IV.4.1.7.Flexion unidirectionnel [2.3.8] plis avec et sans couture avec une fissure de 4.5 mm.....	107
IV.4.1.8.Flexion unidirectionnel [2.3.8] plis avec et sans couture avec une fissure de 5.5 mm.....	109
IV.5.Conclusion .....	110

# Liste des figures

---

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

Figure I.1: Composition d'un matériau composite.....	9
FigureI.2. Organigramme des principales familles des matrices.....	10
Figure I.3 : Organigramme de la classification des matériaux composite selon le renfort.....	10
FigureI.4 les éléments constitutifs d'un matériau composite.....	11
Figure I.5 : Différents types de renfort organiques et inorganiques.....	12
Figure I.6 : Diffèrent type de fibre de verre.....	13
Figure I.7. Différentes famille de matrice.....	17
FigureI.8 : Composite monocouche.....	26
FigureI.9 : Composite stratifiée.....	27
Figure I.10. : Matériaux sandwiches a âmes pleines.....	28

### Chapitre II

FigureII.1. Principe du moulage au contact. ....	31
Figure II.2. Principe du moulage par projection simultanée.....	32
Figure II.3. Moulage sous vide.....	34
Figure II.4. Moulage par injection de résine. ....	35
Figure II.5. Moulage à la presse à froid. ....	36
Figure II.6. Moulage par injection.....	37
Figure II.7. Moulage en continu de plaques.....	39
Figure II.8. Moulage en continu de panneaux ondulés. ....	39
FigureII.9. Moulage par pultrusion. ....	40
Figure II.10. Moulage par centrifugation. ....	42
Figure II.11. Principe de l'enroulement circonférentiel.....	43
Figure II.12. Principe de l'enroulement hélicoïdal. ....	44
Figure II.13. Enroulement hélicoïdal continu. ....	44

## Liste des figures

---

Figure II.14. Enroulement polaire (Documentation Vetrotex).....	44
Figure II.15.image qui représenter Les unidirectionnels (UD) .....	47
Figure II.16.image qui représenterla stratifil.....	48
Figure II.17.stratifil bouclé.....	48
Figure II.18.fils coupé. ....	49
Figure II.19.fibres broyées. ....	49
Figure II.20.mat à fils coupé. ....	49
Figure II.21.mat à fils continus. ....	50
Figure II.22. Le motif d'armure.....	50
Figure II.23.armure haut module.....	51
Figure II.24.armure unidirectionnelle. ....	51
Figure II.25.satin de 8. ....	52
Figure II.26. Armure serge.....	52
Figure II.27. Armure Taffetas. ....	53
Figure II.28. Des armures bi ou tridimensionnelles .....	53
Figure II.29. Comparaison de l'approche classique (a) et l'approche utilisant la MLR (b) la rupture transverse de la matrice .....	55
Figure II.30. Rupture transverse de la matrice.....	55
Figure II.31. Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre..	56
Figure II.32. Rupture transverse de la matrice.....	56
Figure II.33. Rupture longitudinale de la matrice.....	57
Figure II.34. Décohésion fibre-matrice.....	57
Figure II.35. Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés.....	58
Figure II.36. Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°. ....	58
Figure II.37. Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0°. ....	59
Figure II.38. Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (DocumentONERA). ....	59
Figure II.39. Surface de rupture associée à une bonne adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA). ....	60
Figure II.40. Visualisation par radiographie X de l'état de fissuration de composites à fibres de carbone. ....	60
Figure II.41. Processus d'émission acoustique.....	61
Figure II.42. Structure de stratifie.....	61

## Liste des figures

---

Figure II.43. Stratifié est soumis à des sollicitations.....	63
Figure II.44 Représentation des couches d'un stratifié .....	64
Figure II.45 Stratifié avec des couches isotropes.....	66
Figure II.46 Stratifiés antisymétriques.....	67

### **Chapitre III**

Figure III.1, 2 : Durcisseur + Résine .....	69
Figure III.3 : Machine à coudre.....	71
Figure III.4 : exemple de couture à (45°).....	71
Figure III.5 : Le type de pas choisie.....	72
Figure III.6 : Schéma illustratif, présente les dimensions utilisées pour la couture (stitch length et stitch step) .....	72
Figure III.7 : Table de travail .....	72
Figure III.8 : tissu de verre (300*300) mm .....	73
Figure III.9, 10 : La résine + durcisseur.....	73
Figure III.11 : Pompe à vide.....	74
Figure III.12 : Tissu d'arrachage .....	75
Figure III.13, 14 : Tissu de verre.....	75
Figure III.15 : Un film de mise sous vide .....	76
Figure III.16, 17 : On mélange la résine avec le durcisseur.....	76
Figure III.18 : Etalement de la résine.....	77
Figure III.19 : dépôt de la résine sur la nappe .....	77
Figure III.20 : Etalement de la résine .....	78
Figure III.21 : Dépôt de tissu d'arrachage.....	78
Figure III.22 : Dépôt de feutre de drainage .....	79
Figure III.23 : Tuyau de la pompe à vide .....	79
Figure III.24 : Mise en place le tuyau avec le sac à vide .....	80
Figure III.25 : Fermeture hermétique du sac à vide .....	80
Figure III.27 : La chambre chaude. ....	81
Figure III.28 : Stratifier après démoulage .....	81
Figure III.29 : les dimensions de l'éprouvette selon la norme ASTM D3090.....	81
Figure III.30 : Le moyen de découpage des plaques.....	83
Figure III.31 : échantillons des éprouvettes obtenues.....	84

# Liste des figures

---

## Chapitre IV

Figure IV.1 : la machine de flexion.....	85
Figure IV.2 : les éprouvettes après l'essai de flexion. ....	86
Figure IV.3 : exemple d'un essai de flexion 3points sur éprouvette stratifié.....	86
Figure IV.4 : Vue d'ensemble d'un montage de flexion 3points. ....	86
Figure IV.5 : Courbe de comportement expérimental force-déplacement en flexion 3 point des stratifiées unidirectionnel. [A] :2 plis sans couture. [B] :3 plis sans couture, [C] : 8plis sans couture. ....	88
Figure IV.6 : Courbe de comportement expérimental force-déplacement en flexion 3 point de stratifiée unidirectionnel. [A] :2 plis avec couture. [B] :3 plis avec couture, [C] : 8plis avec couture. ....	90
Figure IV.7 : comparaison contrainte-déformation obtenues lors d'essais de flexion pour des éprouvettes couturé et non couturé.....	92
Figure IV.8: Réponses Force-Déplacement pour des éprouvettes stratifiéUnidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec $L = 90\text{mm}$ (a) 2 Plis sans et avec couture, (b) 3 plis sans et avec couture, (c) 8 plis sans et avec couture.....	94
Figure IV.9: Réponses Force-Déplacement pour des éprouvettes stratifié Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec $L = 90\text{mm}$ (a) 2 Plis sans et avec fissure, (b) : 3 Plis sans et avec fissure, (c) : 8 Plis sans et avec couture.....	96
Figure IV.10 Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifié Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec $L=90\text{ mm}$ (a)2 Plis sans et avec couture : (b) : 3 Plis sans et avec couture : (c) : 8 Plis sans et avec couture.....	98
Figure IV.11: Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifié Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec $L = 90\text{ mm}$ . (a) 2 Plis sans et avec couture ; (b) 3 Plis sans et avec couture ; (c) 8 Plis sans et avec couture. ....	99
Figure IV.12. Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifié Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec $L= 90\text{ mm}$ (a) :2 Plis sans et avec couture ; (b) : 3 Plis sans et avec couture ; (c) : 8Plis sans et avec couture.....	100

## Liste des tableaux

### Chapitre I

<b>Tableau I. 1</b> Caractéristique des résines thermodurcissable et thermoplastique.....	13
<b>Tableau I. 2</b> Les avantages et les inconvénients de la résine époxyde.....	14

### Chapitre II

<b>Tableau II. 1</b> Qui présente les caractéristiques principales.....	29
<b>Tableau II. 2</b> Les caractéristiques mécaniques de moulage par projection simultanée. ....	31
<b>Tableau II. 3</b> Caractéristique mécanique de Moulage sous vide. ....	32
<b>Tableau II. 4</b> Les caractéristiques mécaniques de Moulage par injection de résine.....	33
<b>Tableau II. 5</b> Caractéristiques mécaniques de Moulage à la presse à froid. ....	34
<b>Tableau II. 6</b> Caractéristique mécanique de Moulage par injection. ....	36
<b>Tableau II. 7</b> Caractéristiques mécaniques Moulage par pultrusion.....	38
<b>Tableau II. 8</b> Caractéristiques mécaniques de moulage par centrifugation .....	40
<b>Tableau II. 9</b> Caractéristiques mécaniques .....	43
<b>Tableau II. 10</b> les différent type de fibres de verre.....	45

### Chapitre III

<b>Tableau III. 1</b> Caractéristique de la résine Epocast (fiche technique A). ....	70
<b>Tableau III. 2</b> dimension des éprouvettes en (mm). ....	83

### Chapitre IV

<b>Tableau IV. 1</b> Résultat des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 2 plis sans couture.....	89
<b>Tableau IV. 2</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 3 sans couture.....	89
<b>Tableau IV. 3</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 8PA. ....	90
<b>Tableau IV. 4</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 2 plis avec couture.....	91

## Liste de tableaux

---

<b>Tableau IV. 5</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 3 plis avec couture.....	91
<b>Tableau IV. 6</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 8 plis avec couture.....	92
<b>Tableau IV. 7</b> comparaison contrainte-déformation obtenues lors d'essais de flexion pour des éprouvettes couturé et non couturé.....	92
<b>Tableau IV. 8</b> Récapitulatif des meilleurs résultats des essais de flexion sur les éprouvettes verre/époxy sans couture.....	93
<b>Tableau IV. 9</b> Récapitulatif des meilleurs résultats des essais de flexion sur les éprouvettes verre/époxy avec couture.....	93
<b>Tableau IV. 10</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	95
<b>Tableau IV. 11</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture.....	95
<b>Tableau IV. 12</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture.....	95
<b>Tableau IV. 13</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	96
<b>Tableau IV. 14</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture.....	97
<b>Tableau IV. 15</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture.....	97
<b>Tableau IV. 16</b> Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	98
<b>Tableau IV. 17</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture.....	98
<b>Tableau IV. 18</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture.....	98
<b>Tableau IV. 19</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	99
<b>Tableau IV. 20</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	100
<b>Tableau IV. 21</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture.....	100
<b>Tableau IV. 22</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture.....	101
<b>Tableau IV. 23</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture.....	101
<b>Tableau IV. 24</b> Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture.....	101

# LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

## Liste des symboles :

### A. Paramètres physiques :

$E$  : Module d'élasticité.

$\sigma$  : Contrainte.

$\varepsilon$  : Déformation.

$\sigma_r^{\text{trac}_r}$  : Contrainte à la rupture.

$\varepsilon_r^{\text{trac}_r}$  : Déformation à la rupture.

$E_{11}^{\text{trac}_r}$  : Module de Young

$K_C$  : Facteur d'intensité de contrainte.

$F$  : Force (N).

### B. Unités :

**N** : Newton.

**Pa** : Pascal.

**M**: Mètre.

**Kg**: Kilogramme.

**KN**: Kilonewton.

**Mn**: Minute.

**Mm**: Millimètre.

**MPa**: Mégapascal.

**GPa**: Gigapascal.

**%**: pourcentage.

## Liste des abréviations:

**V/Ep\_PS-2.5** : verre/époxy\_plis sans couture-entaille de 2.5mm

**V/Ep\_PS-3.5** : verre/époxy\_plis sans couture-entaille de 3.5mm

**V/Ep\_PS-4.5** : verre/époxy\_plis sans couture-entaille de 4.5mm

**V/Ep\_PS-5.5** : verre/époxy\_plis sans couture-entaille de 5.5mm

**V/Ep\_PA-2.5** : verre/époxy\_plis avec couture-entaille de 2.5mm

**V/Ep\_PA-3.5** : verre/époxy\_plis avec couture-entaille de 3.5mm

**V/Ep\_PA-4.5** : verre/époxy\_plis avec couture-entaille de 4.5mm

**V/Ep\_PA-5.5** : verre/époxy\_plis avec couture-entaille de 5.5mm

**V/Ep\_PS** : verre/époxy\_plis sans couture

**V/Ep\_PA** : verre/époxy\_plis avec couture

**2P** : 2plis

**3P** : 3plis

**8P** : 8plis

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les matériaux composites évoquent des matériaux différents des matériaux homogènes habituels. C'est un assemblage constitué de deux ou plusieurs éléments qui permettent d'obtenir certaines propriétés sachant que, pris tous seuls, les éléments de base ne peuvent y aboutir. Plus couramment, un matériau composite désigne des arrangements de fibres noyées dans une matrice. Le résultat est donc un matériau fortement hétérogène et anisotrope promet d'être aussi efficace.

De nombreux avantages sont offerts par les matériaux composites par rapport aux matériaux métalliques conventionnels. Leur utilisation comme matériaux de structure dans l'aéronautique, le transport automobile, les constructions navales ou dans les bâtiments et travaux public a nettement augmenté durant ces dix dernières années. Parmi ces avantages, on cite en premier lieu leur grand rapport raideur/masse, qui permet un allongement conséquent des structures, particulièrement recherché dans les domaines précités. A titre d'exemple, dans le domaine de bâtiment l'usage de composites renforcés de fibres (de verre, de carbone ou d'aramide) permet une réduction de la masse des pièces pour une raideur structurale considérable s'ils sont envisagés comme des cloisons, cela induit à une économie sur la masse totale.

Les matériaux offrent également une bonne résistance à la fatigue, la corrosion et une bonne adaptabilité de leurs propriétés mécanique aux sollicitations spécifiques qu'ils rencontrent au cours de leur utilisation.

Notre étude porte sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux composites stratifiées a base de renfort en fibre de verre unidirectionnelle et à base de matrice époxy, ces derniers sont soumis à l'essai de flexion trois point, ces matériaux composites sont destinés à être utilisés dans les domaines de la construction et du transport.

Ce travail est structure en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Généralité sur les matériaux composites

Chapitre 2 : La mise en œuvre et couture des stratifiés

Chapitre 3 : Elaboration des composites stratifiés sans et avec couture

Chapitre 4 : Caractérisation mécanique et comparaison

### 1. Présentation générale de la compagnie Air Algérie :

Air Algérie est une compagnie aérienne nationale active dans le domaine du transport civil sous le nom de Compagnie Générale de Transport (C.G.T) créée en 1947. C'est une Entreprise Publique Economique/Société Par Action (EPE/SPA) avec un capital de 43.000.000.000,00 DA. Son siège social est à : 1, place Maurice AUDIN, Alger, Algérie. Elle a pour mission principale d'assurer le transport des passagers, bagages, fret et courriers dans des meilleures conditions de sécurité, régularité et confort.

Elle opéré depuis l'aéroport houari Boumediene d'Alger des vols vers 28 pays en Europe, en Afrique, en Asie, en Amérique et au Moyen-Orient. Elle dessert également 32 destinations sur le territoire algérien. Elle est membre de l'association internationale de transport aérien. Nous pouvons résumer l'identité de la compagnie Air Algérie dans la fiche signalétique suivante :

<b>Logo (avec dénomination)</b>	
Dénomination	Air Algerie
Capital	43 000 000 000,00 DA
Forme juridique	EPE/ SPA
Domaine d'activité	Le transport aérien
Registre de commerce	RC : 00B0091100
Siege social	1, place Maurice AUDIN 16000
Site web	<a href="http://www.airalgerie.dz">www.airalgerie.dz</a>
Nombre de filiales	4

**Tableau I.1** : Fiche signalétique d'Air Algérie. [1]

### 1.2. Historique :

Dès le lendemain de l'indépendance, Air Algérie est considérée comme l'instrument privilégié de l'exercice de la politique du pays, qui devrait permettre à l'Algérie de développer et réaffirmer les coopérations commerciales et culturelles avec des partenaires au niveau national et international, la principale préoccupation des pouvoirs publics consistait à promouvoir l'aviation de façon à répondre à des besoins de plusieurs aides géographiques, économiques, sociales et transitoires.

1947 : Air Algérie est née dans le but de l'exploitation du réseau des lignes aériennes entre l'Algérie et la France.

1963 : Après l'indépendance, Air Algérie devient une compagnie nationale sous tutelle du ministère des transports, mais dans cette période, le contrôle de l'état était assuré à 51%. Les 49% restantes étaient détenues par Air France.

1970 : Après que les parts de l'état algérien atteignent les 80% y compris le capital de la compagnie, Air Algérie a procédé au renouvellement de sa flotte.

1971 : C'est une date historique dans la vie de la compagnie, deux (02) boëings 727-200, venant de Seattle (USA) à Alger, date des perfectionnements technique et commerciaux. Par cette acquisition, Air Algérie est la première compagnie en Afrique à utiliser à des aéronefs type Jet.

1972 : Le 12 décembre, l'état algérien détient 100% des parts d'Air Algérie, mais cette nationalisation ne sera effective qu'en 1974.

1975 : Air Algérie est devenue une Société Nationale de Transport et de Travail Aérien « STTA », chargée d'assurer les services aériens de transports publics réguliers et non réguliers, sur les réseaux nationaux et internationaux.

1983 : La compagnie a été restructurée en deux entités distinctes ; l'une pour les lignes intérieures et l'autre pour les lignes internationales.

1984 : Les deux entités citées ci-dessus sont à nouveau fusionnées en une seule entreprise à laquelle revient la charge de la gestion des aéroports.

1987 : Air Algérie est déchargée de la gestion des aéroports.

## PRESENTATION DU LIEUX DE STAGE

---

1997 : Le 17 février, Air Algérie devient une entreprise publique économique (E.P.E) ayant le statut de société par action (S.P.A) au capital de 2,5 milliards DA.

1999 : Un plan de modernisation et de mise à niveau a été élaboré dont :

- Le remplacement des B727-200 et B737-200 par de nouveaux avions « nouvelle génération ».
- L'achèvement des travaux de la nouvelle base de maintenance.
- La mise en place d'une nouvelle stratégie commerciale adaptée aux nouvelles règles de l'économie de marché.
- Développer et renforcer la coopération avec d'autres transporteurs.
- La mise en place d'un système interne de communication (intranet).

2000 : Le capital d'Air Algérie est porté à 6 milliards de dinars.

2002 : Le capital d'Air Algérie est porté à 14 milliards de dinars.

2003 : Le crash le plus grave de l'histoire d'Air Algérie (boeing 737) à Tamanrasset, faisant 102 morts et 1 survivant.

2006 : Crash d'un avion-cargo d'Air Algérie (Italie) faisant 2 morts.

2007 : Deux événements ont marqué l'histoire de la compagnie Air Algérie, le premier est l'ouverture de la ligne Alger-Montréal et le second événement tragique est le décès du président Mohamed Tayeb Benouis.

2008 : Nomination du nouveau PDG « Abdelwahid Bouabdallah ».

2009 : Cette année a connu :

- L'ouverture d'une ligne directe Alger-Pékin.
- Un appel d'offres internationales d'achat de 11 avions pour une valeur de 111 millions de dollars (accord de l'État algérien).
- L'augmentation du capital à 43 milliards de dinars.

2010 : Modification de l'organigramme de la compagnie

### **1.3. Organigramme de la compagnie Air Algérie :**

Organigramme de la compagnie Air Algérie se compose d'une :

## PRESENTATION DU LIEUX DE STAGE

---

- ✓ Direction des transports.
- ✓ Direction logistique.
- ✓ Direction financière.
- ✓ Direction technique.
- ✓ Direction des frets.
- ✓ Direction des ressources humaines.
- ✓ Direction commerciale.
- ✓ Direction régionale.
- ✓ Direction générale
- ✓ Direction informatique et de télécommunication.
- ✓ Direction opérations aériennes.
- ✓ Direction de planification et contrôle des gestions
- ✓ Direction des travaux aériens

### 1.4. Objectif d’Air Algérie :

Comme toute entreprise, Air Algérie a des objectifs à atteindre notamment :

- Augmenter son chiffre d’affaire
- Assurer une place importante sur le marché
- Faire face à la concurrence
- Améliorer l’image de la compagnie
- Rendre le client fidèle au produit offert et assurer la survie de l’entreprise....

Pour réaliser tous ses objectifs, elle a des missions à accomplir tout en respectant ses moyens.

### 1.5. Missions d’Air Algérie :

La mission principale de l’entreprise de transport et de travail aérien est le transport des passagers, bagages, fret et courriers dans des conditions optimales de confort, de sécurité et de régularité.

## **PRESENTATION DU LIEUX DE STAGE**

---

Ses principales missions sont :

- Attribuer des conventions et des accords pour exploiter les réseaux internationaux et domestiques en vue d'assurer le transport des personnes, fret, bagages, et courriers quel que soit sa nature : régulier ou non (saisonnier, charter) ...
- Le traitement des dossiers de candidature à l'agrément, l'accord de l'agrément, et le suivi des agents agréés.
- L'émission et la vente des titres de transport et l'obtention de toutes licences et autorisations sur vols.
- Assurer la réparation, la révision, la maintenance, l'entretien, l'achat et la location des aéronefs.
- La communication, la publicité, le transit, les commissions, les consignations, la présentation, l'assistance commerciale et toutes prestations en rapport avec son sujet.
- L'avitaillement des avions dans des conditions fixées par le ministère du transport (l'entretien, la réparation, la révision et toute autre opération de maintenance des aéronefs et équipements pour son compte et le compte des tiers).
- L'exploitation et la gestion des installations en vue de promouvoir les prestations commerciales au niveau des aéroports.

### **1.6. Moyens humains et matériels d'Air Algérie :**

#### **➤ Moyens humains :**

Air Algérie a su investir dans la formation du personnel, si bien qu'elle ne dispose aujourd'hui que d'un personnel de nationalité algérienne :

- Un personnel de conduite des aéronefs qui lui confère une grande réputation de sécurité.
- La maintenance de sa flotte assurée par son propre personnel.
- Un centre hôtelier ou commissariat (catering) lui permettant de couvrir ses besoins au départ de l'Algérie, ainsi que l'assistance des compagnies étrangères.

Air Algérie compte un effectif de 9327 employés ; les catégories de son personnel se répartissent comme suit :

## PRESENTATION DU LIEUX DE STAGE

---

- \* 8140 personnels au sol.
- \* 502 personnels navigants techniques.
- \* 685 personnels navigants commerciaux.

➤ **Moyens matériels :**

A ce jour, Air Algérie compte une flotte « passagers » de 41 avions

Type d'avion	Nombre
Boeing 737-800	16
Boeing 737-600	05
Boeing 767-300	03
Hercules L-382G	01
ATR 72	12
Airbus 330-200	05

**Tableau I.2 :** La flotte d'Air Algérie [2].

A ces capacités, s'ajoute la charge offerte par les sautes des avions mixtes qui sont respectivement de l'ordre de 3 à 5 tonnes pour les avions de types Boeing 737/727/767.

Aujourd'hui Air Algérie est aussi :

- 3.500.000 passagers transportés chaque année.
- 36 villes desservies dans 24 pays et 40 escales en Algérie.
- (Voir Annexe n° 1 : Le réseau intérieur et international d'Air Algérie)
- Jusqu'à 120 vols quotidiens en programme de pointe.
- Un réseau de vente comprenant 150 agences en Algérie et à l'étranger reliées à son système de réservation. Son produit est distribué à travers les G.D.S (Global Distribution System) auprès desquels Air Algérie a souscrit des abonnements.
- Des charters pétroliers qui transportent environ 500.000 passagers par an.

Chapitre I :

**GENERALITE SUR  
LES MATERIAUX  
COMPOSITES**

## I.1 Introduction

Durant ces dernières années, l'utilisation des matériaux composites a connu une évaluation considérable dans différents domaines : l'aéronautique, automobile, emballage, bâtiment, etc.

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certain cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de « nouveaux matériaux ». En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

## I.2. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels :

- légèreté
- grande résistance à la fatigue
- liberté de formes
- maintenance réduite
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- une bonne isolation électrique.

Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

On distingue deux types de composites: les composites grandes diffusions et les composites hautes performances. [1]

**Grande diffusion :**

- Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa 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).

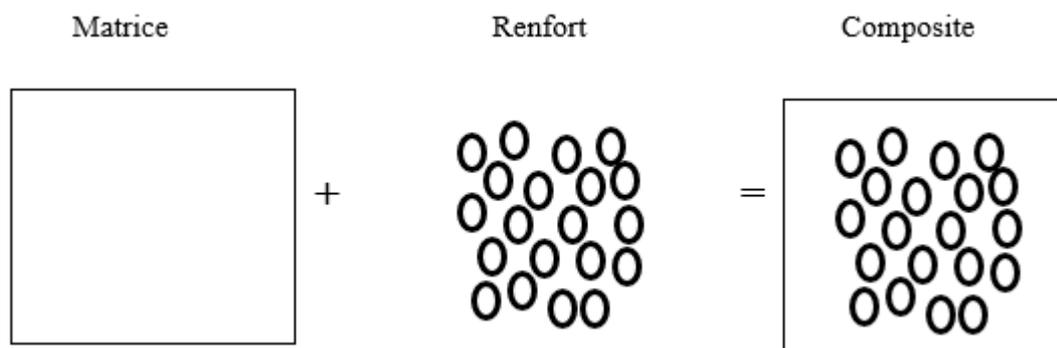
**Hautes performances :**

- Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite 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 :

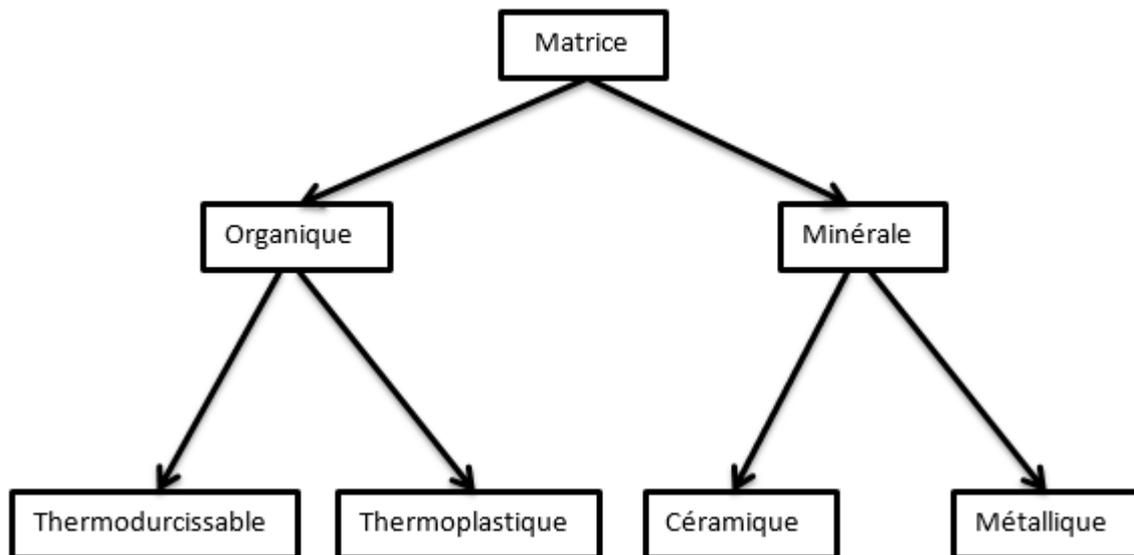
- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels. [1]



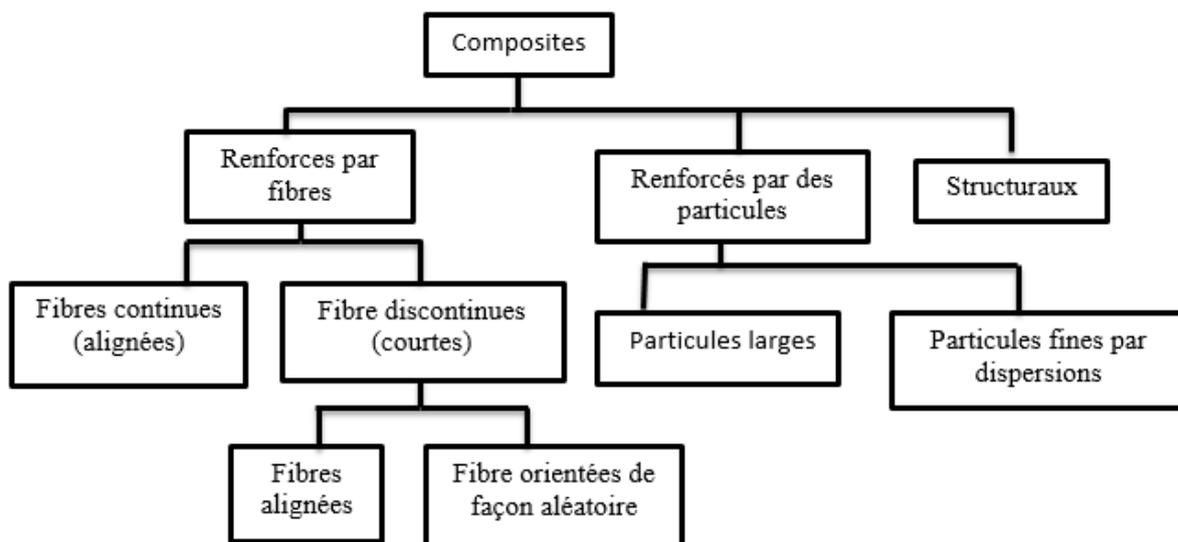
**Figure I.1:** Composition d'un matériau composite. [2]

**I.3. Classification des composites :**

La classification des matériaux composites se fait selon la nature de ces deux éléments constituant :

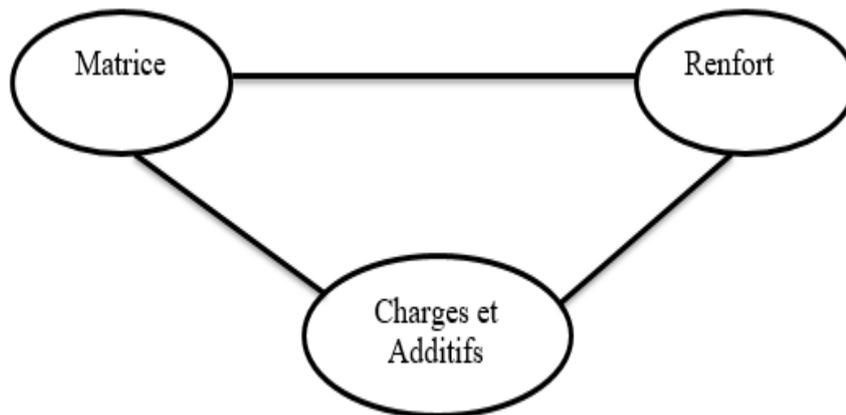
**1. Selon la matrice :****Figure I.2.** Organigramme des principales familles des matrices.**2. Selon le renfort :**

Organigramme suivant résume la classification des composites selon le renfort :

**Figure I.3 :** Organigramme de la classification des matériaux composite selon le renfort

**I.4. Eléments constitutifs :**

En général, un matériau composite constitué d'une phase continue appelé matrice, élément qui est destiné au transfert de charge et protection du deuxième constituant qui est le renfort (fibre ou particule).



**Figure I.4** les éléments constitutifs d'un matériau composite

**I.4.1. Le renfort**

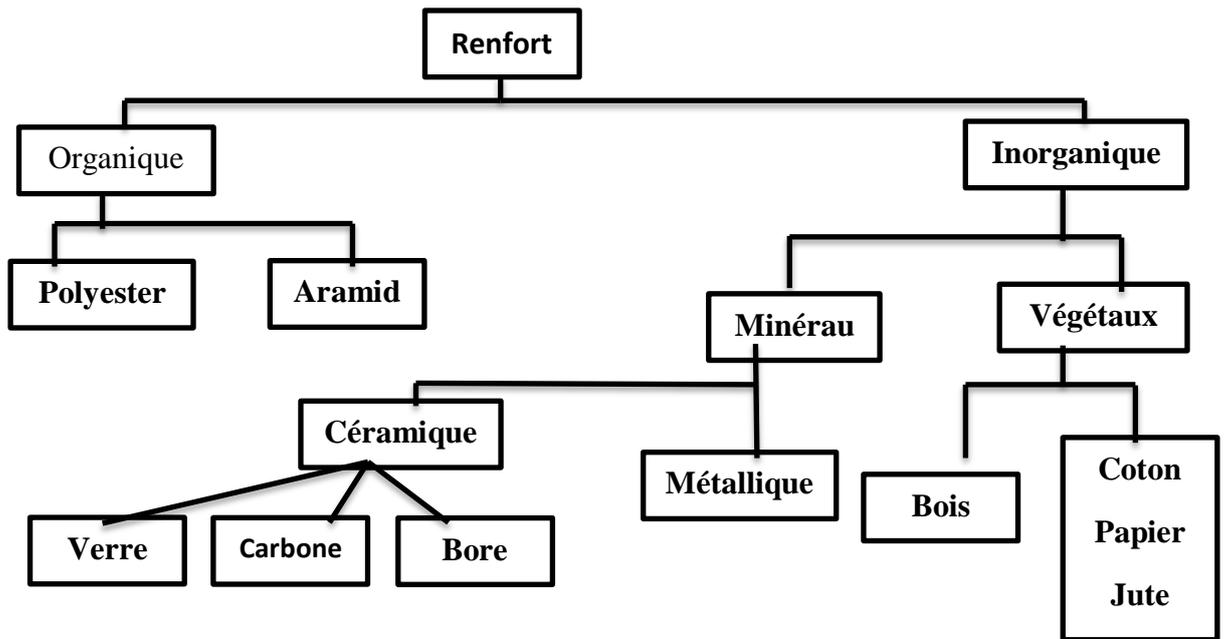
Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction du prix de revient recherché pour la structure à réaliser. Les fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), surfaciques (tissus ou mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus). [3]

Les rôles des renforts consistent à :

- supporter les efforts appliqués ;
- conférer au composite sa rigidité élastique et sa résistance à la rupture, éventuellement à haute température.

Ils doivent également être compatibles avec la matrice du composite sur le plan chimique, c'est-à-dire assurer une adhérence inter faciale renfort-matrice suffisante et stable dans le temps.

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.4. [3]



**Figure 1.5 :** Différents types de renfort organiques et inorganiques. [2]

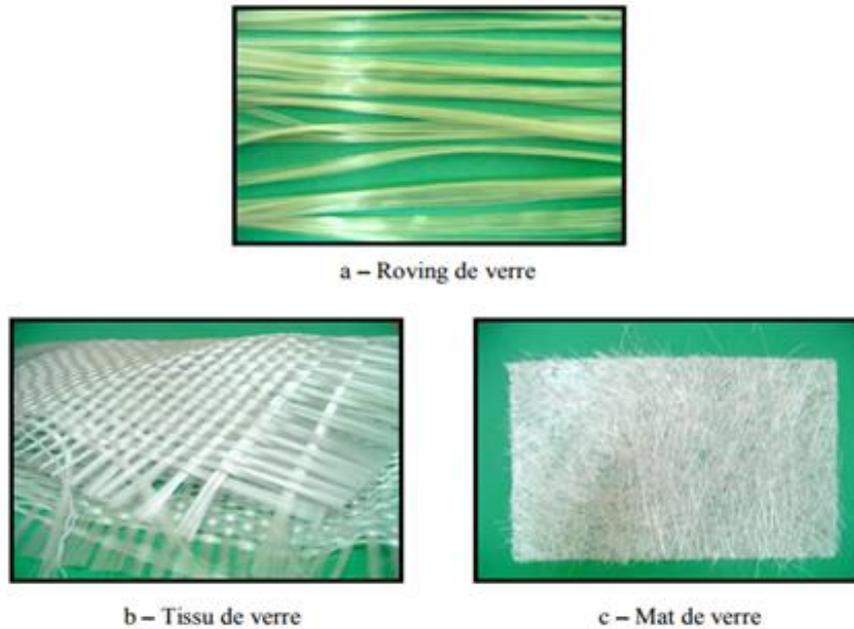
La forme du renfort est en fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser et elle permet de distinguer deux grandes familles :

#### **I.4.1.1. Différents types de renfort :**

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>.
- 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 I.6 :** Différent type de fibre de verre. [4]

#### **I.4.1.1.1. Renfort en fibres discontinues**

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

#### **I.4.1.1.2. Renfort en fibres continu**

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre.

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou Roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions) [5]

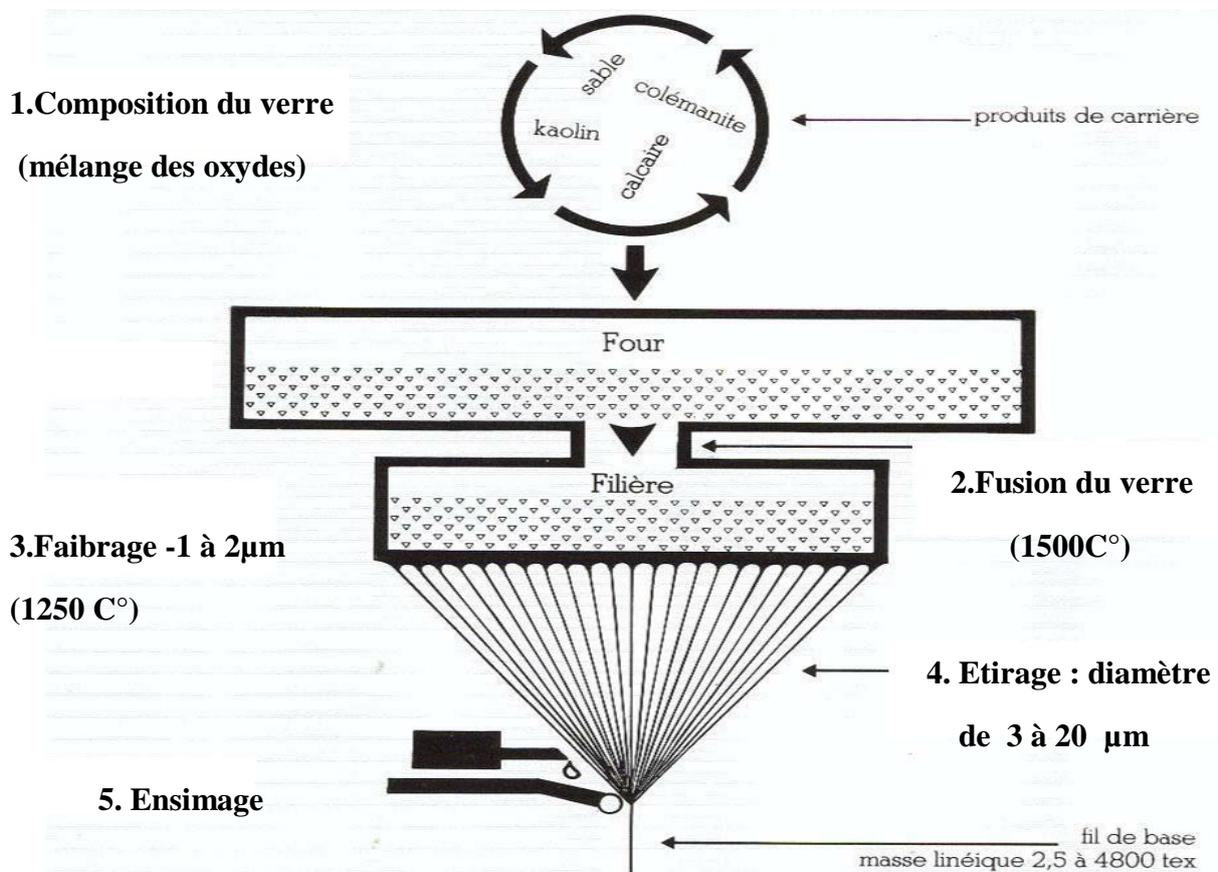
### I.4.1.2. Les Principaux Matériaux de Renforts :

#### I.4.1.2.1 Fibre de verre :

Suivant leurs compositions, différents types de verres peuvent être obtenus. Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1 %), sont réservés à des applications spécifiques :

Leur procédé d'élaboration par filage du verre en fusion permet d'obtenir des fibres de 5 à 15  $\mu\text{m}$  de diamètre. Leur résistance à la rupture en traction ou flexion est d'autant plus élevée que leur diamètre est faible. Un diamètre de quelques microns autorise un rayon de courbure de quelques dixièmes de millimètres. [3]

##### I.4.1.2.1.1 Fabrication de fibres de verre



##### a. Ensimage des fibres de verre

**I.4.1.2.1.2. Composition et rôle de l'ensimage :**

Désigne les traitements de surface appliqués aux fibres de renfort en sortie de filière. L'ensimage est une émulsion aqueuse contenant 0.05-10% en poids de composés organiques. Parmi ces composés organiques, on distingue des silanes, des agents lubrifiants, des agents collants, des agents mouillants et des émulsifiants.

Principaux type d'ensimages :

- L'ensimage textile: appliqué sur les filaments en sortie de filière, consiste à déposer un agent de liaison assurant la cohésion des filaments entre eux, diminuant l'abrasion et facilitant les manipulations ultérieures (tissage) et évitant la formation de charges électrostatiques.
- L'ensimage plastique : appliqué sur les tissus, consiste à déposer un agent de pontage dont les rôles sont d'assurer une liaison physico-chimique entre les fibres et la résine et de protéger la fibre de son environnement.
- L'ensimage textile-plastique : assure un compromis entre les propriétés textiles et plastiques (compatibilité résine).

**I.4.1.2.1.3. Avantage des fibres de verre :**

La fibre de verre est une fibre minérale proposant de nombreux avantages pour les applications industrielles spécifiques suivantes :

**-Résistance à la traction :** à masse équivalente, la fibre de verre est 2 fois plus résistante que l'acier. La possibilité d'orienter la dépose des fibres de verre dans un sens pour des tissus unidirectionnels ou dans les 2 sens, apporte une souplesse bien supérieure.

**-Isolation électrique :** c'est une des caractéristiques principales de la fibre de verre qui offre des débouchée partout où le besoin d'une isolation électriques est recherchée.

**-Isolation thermique :** avec un point de fusion de 800C°, la fibre de verre résiste bien aux températures élevées. Une exposition continue a des températures de 550C° ne pose généralement pas de soucis.

**- Stabilité dimensionnelle :** la fibre de verre est très stable avec un allongement à la rupture de 3%. La fibre de verre connaît très peu d'allongement et de retrait dans les conditions normales d'utilisation.

- **Faible absorption d'humidité** : la fibre de verre étant d'origine minérale, elle n'absorbe quasiment pas l'humidité.

- **Résistance aux produits chimiques et aux UV.**

- **Bonne acceptation de traitements ultérieurs** : que ce soit des traitements d'enduction, de pré imprégné, de laminage et contre le collage.

- **Approche économique** : la fibre de verre a un coût compétitif au regard de l'ensemble des propriétés qu'elle apporte. C'est donc généralement une solution de compromis entre la partie technique d'un cahier des charges et la partie économique du produit. [3]

#### **I.4.1.2.2 Fibre de carbone**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. [3]

#### **I.4.1.2.3. Fibres aramides**

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymes des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibre aramide. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine de loisirs (ski, raquette de tennis). [4]

#### **I.4.1.2.4. Fibres céramiques**

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée

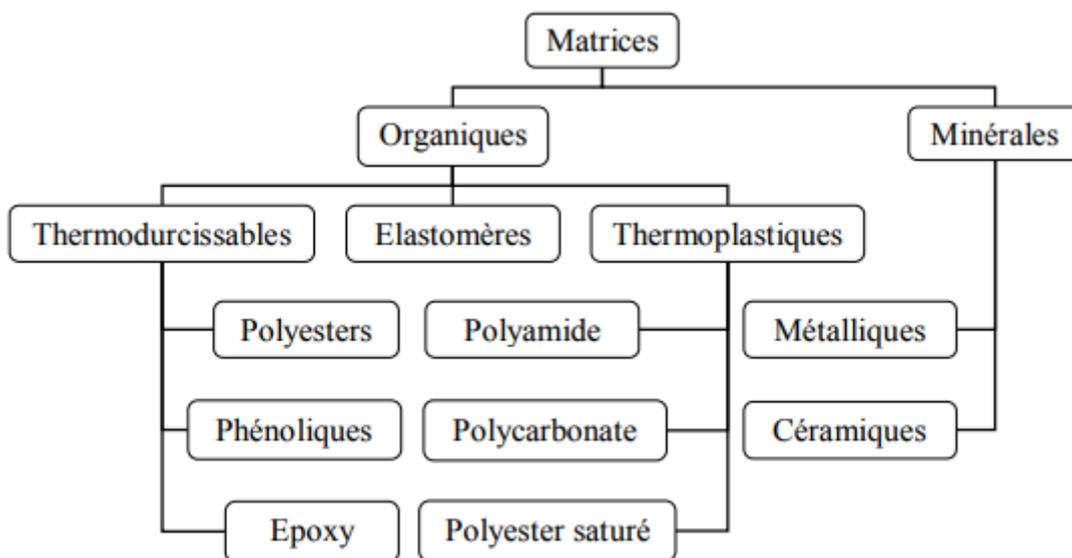
entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

#### I.4.2. Matrice :

Les plus répondu actuellement sont les matériaux composites à matrice organique, l'emploi de composite à matrice métallique ou céramique reste très limité.

Les matrices organiques sont obtenues à partir de polymère thermoplastique ou thermodurcissable (résine).



**Figure I.7.** Différentes famille de matrice

#### Matrice Polymère

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporté la tenue de la structure et donner la forme désirée au composites. On peut utiliser le polymère thermoplastique ou des polymères thermodurcissables. Ces deux types de polymères défèrent en leur structure moléculaire au c'est bien que leur comportement. Ces polymère sont souvent modifier par l'addition de charge ou l'ajout des adjuvant pour des raisons économique telle que le coût, mais aussi pour répondre a certaine exigence technique telle que la mise en œuf les propriétés chimique, physique et mécanique.

**I.4.2.1 Résines thermoplastiques(TP)**

Les thermoplastiques qui sont des composites formé par addition et fondent lorsque on les chauffe. Ce sont des matières transformables à l'état fondu. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastique sont chauffés, puis formé par moulage, injection, extrusion ou thermoformage avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains peuvent supporter des températures atteignant 315° C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73°C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécaniques et leur résistance aux effets de l'environnement, thermoplastiques constituent un matériau idéal pour de très nombreuses applications.

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéraphthalate éthylénique et butylique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phényle (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Polysulfures (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenu au chaud ;

Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température. Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité. Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau 1.4.

Il existe aussi les bios polymères, dont Daniel Wyart donne cette définition : « Un bio polymère est un polymère d'origine naturelle, biodégradable par des agents biologiques habituellement présents dans la nature ou recyclable après usage ». [6]

#### I.4.2.2. Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables sont des matériaux les plus répandus dans les applications composées. Elles sont liquides ou liquides visqueux et durcissent sous l'action du mélange avec un durcisseur, et qui après traitement thermique se transforment en produits essentiellement infusibles et insoluble. Ces résines ont la particularité d'être mise en forme qu'une seule fois (processus irréversible). Les matériaux thermodurcissables ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Parmi les matrices thermodurcissables, on trouve :

- ✓ **Les résines polyesters.**
- ✓ **Les résines phénoliques.**
- ✓ **Les résines époxydes : font l'objet de notre étude.**

**Tableau I.1** Caractéristique des résines thermodurcissable et thermoplastique

Matrice	Thermoplastiques TP	Thermodurcissable TD
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilités renfort	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + Refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et Déchets	Recyclable	Perdus ou recycle en charge
Condition de travaille	Propreté	Emanation pour <méthode humidité>

#### I.4.2.2.1 Résines époxydes.

##### 1. Définition

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

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

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Masse volumique	1 100 à 1 500 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

**Tableau I.2** : Les avantages et les inconvénients de la résine époxyde.

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>– De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters</li> <li>– Une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu</li> <li>– Une excellente résistance chimique,</li> <li>– Un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %),</li> <li>– Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Un temps de polymérisation long,</li> <li>– Un coût élevé,</li> <li>– La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,</li> <li>– Une sensibilité aux chocs</li> </ul>

**I.4.3. Les charge :**

L'objet de la charge renforçante est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances. En général, ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

Les principes de charges utilisés sont :

- -microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc....)
- -des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc....)
- -des particules de carbone (noir de carbone). [1]

**I.4.3.1. Charges renforçantes**

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

- charges sphériques et
- charges non sphériques. [4]

**I.4.3.1.1. Charges sphériques**

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur forme sphérique qui évite les concentrations de contraintes et, par conséquent, diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques. Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères pleines ou creuses ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.). Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées.

Les microbilles de verre creuses

Le principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400  $\text{kg/m}^3$ ), apportant une augmentation du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression.

La fabrication des microbilles de verre creuses se fait par passage dans une zone à haute température, de fines particules de verre contenant un gaz d'expansion (généralement un mélange d'azote et de gaz carbonique). Lors de l'élévation de température des particules, le gaz est expansé dans la particule de verre en fusion. Les particules sont ensuite refroidies

rapidement, provoquant une solidification de la paroi des microbilles avant que la pression du gaz ne diminue.

Les microbilles ainsi obtenues ont un diamètre de l'ordre de 20 à 130  $\mu\text{m}$ , avec une épaisseur de paroi de 0,5 à 2  $\mu\text{m}$ . Les microbilles peuvent être ensuite sélectionnées en fonction de leurs dimensions. Les microbilles sont enfin soumises à des traitements de surface permettant d'améliorer la liaison des microbilles avec la résine.

Les microbilles de verre creuses sont le plus souvent incorporées à des résines époxydes ou polyesters. Leur usage est limité à des mises en œuvre à basse pression du fait de la faible résistance à l'écrasement des sphères creuses.

Les avantages essentiels de leur incorporation dans une résine sont :

- la diminution de la masse volumique,
- l'augmentation du module de la résine,
- l'amélioration de la tenue en compression.

Autres microbilles

Il existe d'autres microbilles creuses :

Microbilles de carbone :

Masse volumique 120  $\text{kg/m}^3$

Diamètre 5 à 150  $\mu\text{m}$

Microbilles organiques (époxyde, phénolique, etc.) :

Masse volumique 100 à 500  $\text{kg/m}^3$

Diamètre 10 à 800  $\mu\text{m}$

Ces microbilles sont généralement plus chères (jusqu'à 5 fois pour les microbilles de carbone) que les microbilles de verre.

Parmi les autres microbilles utilisées figurent les microbilles de verre pleines.

Par rapport aux microbilles de verre creuses, les caractéristiques des microbilles pleines sont:

- Masse volumique élevée : 2 500  $\text{kg/m}^3$ ,

- Prix plus faible,
- Possibilité de mise en œuvre avec les résines à des pressions élevées. [4]

#### **I.4.3.1.2. Charges non sphériques**

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écailles de dimensions de 100 à 500  $\mu\text{m}$ , et d'épaisseur de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques.

#### **I.4.3.2. Charges non renforçantes**

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

##### **I.4.3.2.1. Charges de faible coût**

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût. Généralement, l'incorporation de ces charges conduit à :

- une augmentation :
  - de la masse volumique de la matrice,
  - du module d'élasticité,
  - de la dureté,
  - de la viscosité,
  - de la stabilité dimensionnelle.
- une diminution :
  - du prix,
  - de la résistance à la traction et à la flexion.

Les principales charges sont :

- les carbonates : craies ou calcites ( $\text{CaCO}_3$ ). Ce sont les charges les plus utilisées,
- les silicates : talc, kaolin, feldspath, wollastonite,
- les silices, obtenues par broyage et tamisage de sable de quartz.

**I.4.3.2.2. Charges ignifugeantes**

Ces charges ont ajoutées aux résines pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. Parmi les charges solides utilisées dans les résines thermodurcissables, nous citons :

- l'hydrate d'alumine, produit le plus utilisé dans les résines thermodurcissables,
- l'oxyde d'antimoine.

**I.4.3.2.3. Charges conductrices et antistatiques**

Les résines organiques sont des isolants thermiques et électriques. Pour certaines applications, il est donc nécessaire d'ajouter un élément conducteur. Les principales charges utilisées sont :

- des poudres ou paillettes métalliques : cuivre, fer, aluminium, etc.,
- des microbilles de verre métallisées (cuivre, argent),
- des particules de carbone (noir de carbone),
- des filaments métalliques.

**I.4.4. Les additifs**

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

- lubrifiants et agents de démoulage,
- pigments et colorants,
- agents anti-retrait,
- agents anti-ultraviolets.

**I.4.4.1. Lubrifiants et agents de démoulage**

Ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.

**I.4.4.2. Pigments et colorants**

Les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. À partir de ces pigments, il est possible d'obtenir des pâtes colorantes constituées de dispersions de pigments dans une pâte (résine, plastifiant), pour une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté.

Leur emploi est limité, du fait d'une mauvaise tenue chimique et thermique.

#### **I.4.4.3. Agents anti-retrait et agents de fluage**

La polymérisation des résines conduit à une diminution des distances interatomiques du monomère initial. Il s'ensuit un retrait de la résine polymérisée, qui peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. Bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait, il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti retrait (additifs dits "low profile" et "low shrink"), qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

#### **I.4.4.4. Agents anti-ultraviolets**

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines de l'action des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et d'éviter ainsi une détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation (phénomène de photo-oxydation). [4]

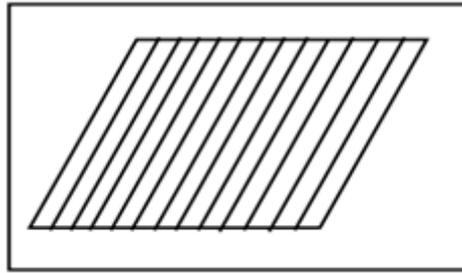
### **I.5. Architecture des matériaux composites :**

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

#### **I.5.1. Monocouches**

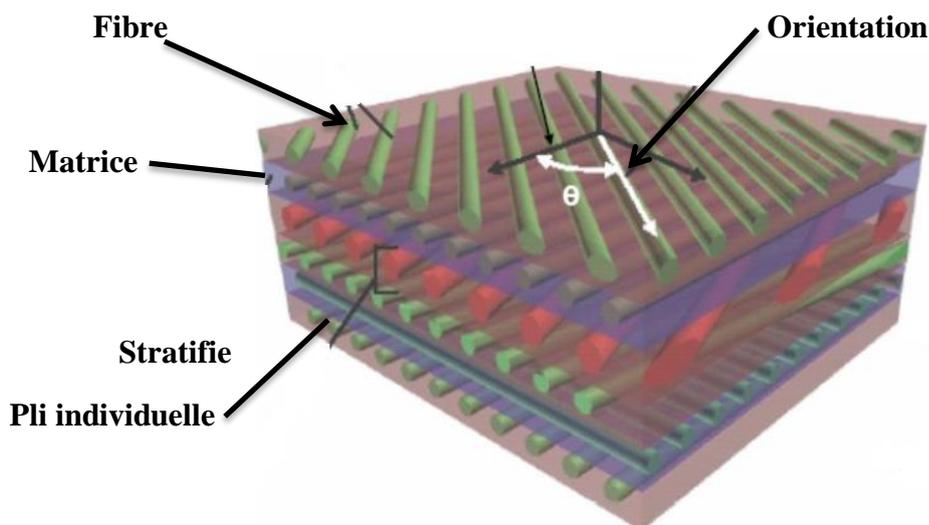
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue ou longues, fibres courtes, fibres tissées. [1]



**Figure I.8 :** Composite monocouche. [1]

### I.5.2 Stratifié :

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. 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. [4]



**Figure 1.9 :** Composite stratifié. [9]

#### I.5.2.1 Désignation des structures stratifiées :

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau

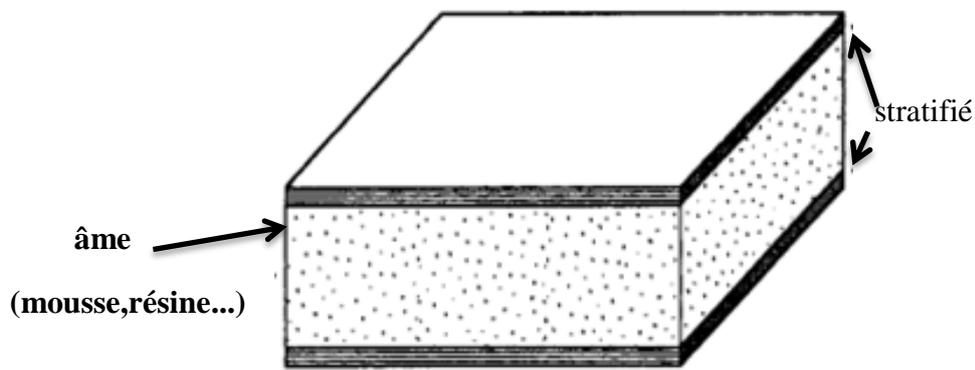
carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les figures 1.9 (a) et 1.9(b), les couches sont représentées décalées les une par rapport aux autres.
- La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;
- Les couches sont nommées successivement entre crochets en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la figure 1.9 (a) :  $[-45/45/-45/-45/45/45]$ ,
- Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme sur la figure 1.9(b) :  $[0/45 /90/-45 /0]$  ;
- En cas de stratification hybride (différents matériaux dans une même stratifiée), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;
- En cas de structure symétrique, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie :  $[-45/45/-45/-45/45/-45]$  devient  $[-45/45/-45] s$  et  $[0/45/45/90/-45/-45/0]$  devient  $[0/45 /90/-45/0]$ . [4]

### **I.5.3. Sandwichs :**

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique.



**Figure 1.10.** : Matériaux sandwiches a âmes pleines. [1]

### I.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des différentes notions sur les matériaux composites et ces composants principaux. Le chapitre suivant va porter sur la mise en œuvre des matériaux composites et leur comportement en mécanique de la rupture.

**Chapitre II :**

**LA MISE EN ŒUVRE ET COUTURE**

**DES STRATIFIES**

## II.1. Introduction

Tous les objets de notre environnements ont été ou sont réalisés selon deux principes : le façonnage et le moulage.

Le façonnage sous-entend l'intervention de la main ou de l'outil pour la production d'une œuvre unique.

Le moulage regroupe l'ensemble des opérations permettant de reproduire cette œuvre à un ou plusieurs exemplaires.

Depuis que l'homme a taillé son premier silex, des milliers de matériaux ont été découverts et les techniques n'ont pas cessé d'évaluer.

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée stratification, conduisant à l'élaboration de stratifiés, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites. [9]

Une fibre est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive. Sous la forme d'un filament fin, les propriétés d'un matériau sont beaucoup plus proches des valeurs théoriquement possibles que tout forme de matière, surtout en résistance à la rupture.

Tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. On parler d'initiation et de propagation de la rupture.

Un matériau stratifié est empilement de plis unidirectionnel avec des orientations différents des fibres. Le stratifié est fabriqué par des couches de matériaux fibreux.

## II.2. Définition du moule

Un moule se conçoit très tôt dans le processus de création d'objet [9], le choix du matériau pour réaliser le modèle détermine la nature du moule et inversement.

### II.2.1. Mise en œuvre des matériaux composites

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température,

pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.).

De manière générale, la mise en forme des matériaux en métallurgie tient au découpage, formage, soudage, perçage et usinage. S'ajoutent à cela différents traitements (traitement thermique...) visant à donner au produit des propriétés particulières.

### **II.2.1.1. Moulages sans pression**

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

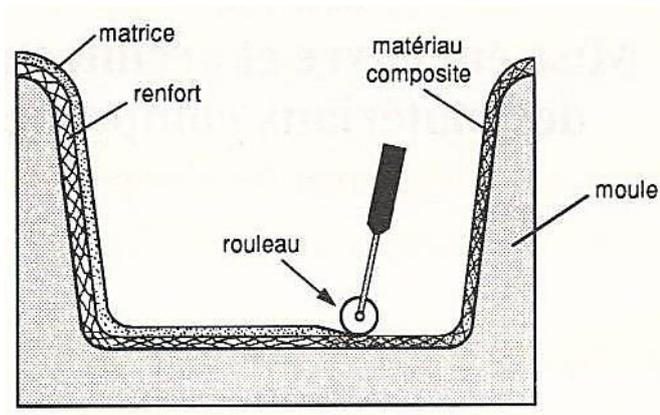
Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

#### **II.2.1.1.1. Moulage au contact**

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée [10]

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu)

Imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.



**Figure II.1** Principe du moulage au contact.

### Domaines d'application

- Nautisme, piscine
- Génie mécanique
- Transport, carrosserie (petites séries)
- Bâtiments, travaux public (coffrage)

### Caractéristiques principales

**Tableau .II.1.** Qui présente les caractéristiques principales

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très large possibilité de forme</li> <li>• Simple et peu coûteux car peu d'investissement pour la mise en œuvre.</li> <li>• Très grande variété de pièces réalisables, même des structures sandwich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédé manuel donc totalement dépendant du savoir-faire de l'opérateur.</li> <li>• Pièces de qualité variable.</li> <li>• La méthode basique expliquée peut être améliorée par une mise sous vide qui permet un compactage, un débullage et une élimination surplus de résine.</li> </ul>

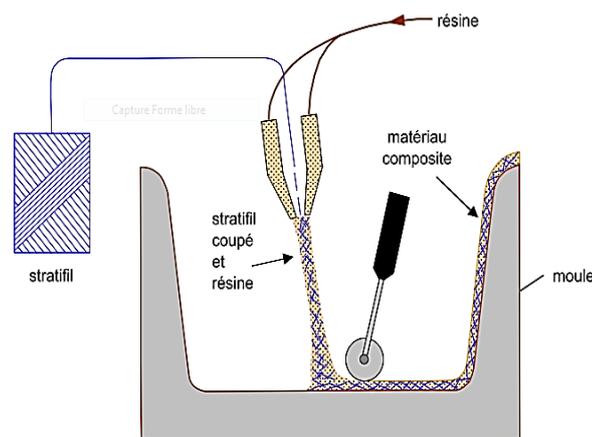
#### II.2.1.1.2. Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par

air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures



**Figure II.2.** Principe du moulage par projection simultanée.

### Domaines d'application

- Production des bateaux
- Revêtements
- Bâtiments : façade, articles sanitaires
- Travaux public : coffrages
- Capotage industriel
- Panneaux sandwichs pour camions isotherme

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.2.** Les caractéristiques mécaniques de moulage par projection simultanée.

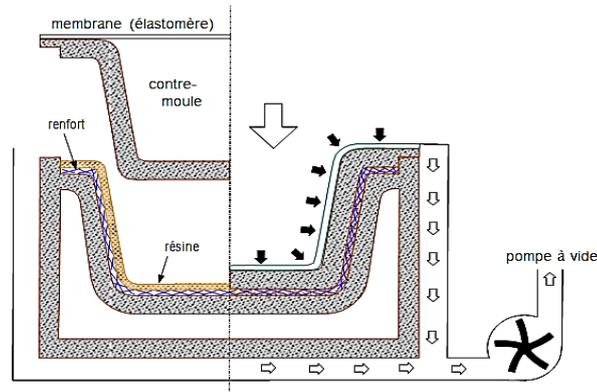
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large possibilité de forme et de dimensions.</li> <li>• Travail d'une mise en œuvre simplifiée.</li> <li>• Investissement modérés.</li> <li>• Moule simple, peu onéreux.</li> <li>• Productivité plus élevée que le moulage au contact. [11]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité de finition la pièce.</li> <li>• Qualité tributaire de la main d'œuvre.</li> <li>• Propriétés mécanique moyenne.</li> </ul>

### II.2.1.2. Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté.

Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et déballe la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.[9]



**Figure II.3.** Moulage sous vide.

### Domaine d'application

- Pompe à vide par réservoir tampon
- Bâtiment : coupoles d'éclairage zenithal
- Transports : panneaux sandwichs pour camions isothermes, conteneurs
- Pièces diverses : casque de protection enveloppants, capotages...

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau I .3.** Caractéristique mécanique de Moulage sous vide.

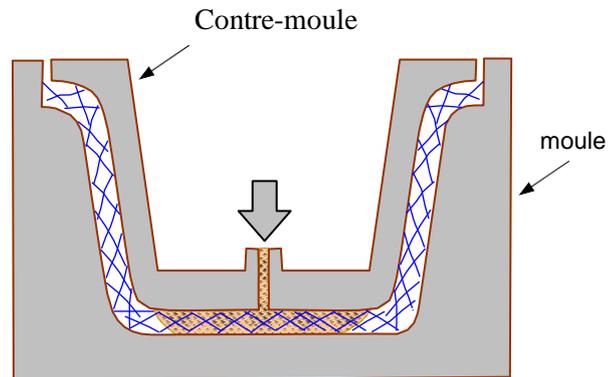
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées.</li> <li>• Qualité constante</li> <li>• Bonne cadence de production</li> <li>• Investissement très modérés</li> <li>• Propriété des surfaces après arrachage des tissus de protection.</li> <li>• Possibilité de réaliser n'importe quelle pièce.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé de tous les produits utilisés.</li> <li>• Possibilités de formes plus réduites qu'au contact.</li> <li>• Mise au point parfois difficile.</li> </ul>

### II.2.1.3. Moulage par compression

#### II.2.1.3.1. Moulage par injection de résine

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation

automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.



**Figure II.4.** Moulage par injection de résine.

### Domaines d'application

- Élément de carrosserie pour véhicules de tourisme ou utilitaire
- Petits articles sanitaires
- Cuves de petites et moyennes dimensions, capotages
- Pièces industrielles diverses
- Fourche de vélo, raquettes de tennis

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.4.** Les caractéristiques mécaniques de Moulage par injection de résine.

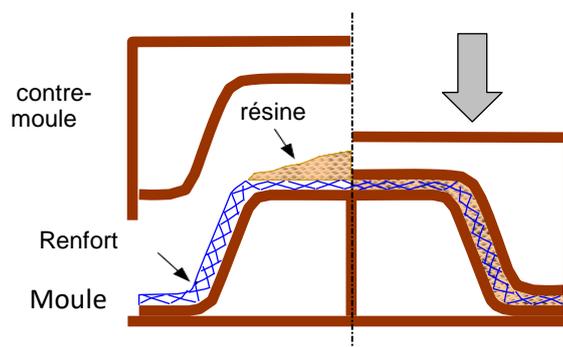
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu d'influence de la main d'œuvre sur la qualité de pièce</li> <li>• Reproductibilité des pièces.</li> <li>• Investissement modérés selon niveau d'automatisation.</li> <li>• Productivité plus élevées que les techniques moulages au contact et projection simultanée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limité aux formes peu ou moyennement complexes</li> <li>• Taux de renforcement et caractéristique moyen</li> <li>• Nécessité d'effectuer des finitions post moulage</li> </ul>

#### II.2.1.3.2. Moulage à la presse à froid

Le moulage est effectué à basse pression ( $< 5$  bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face.



**Figure II.5.** Moulage à la presse à froid.

### Domaines d'application

- Capotage divers
- Bacs de manutention

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.5.** Caractéristiques mécaniques de Moulage à la presse à froid.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de formes complexes et de grandes dimensions.</li> <li>• Grande précision du moulage et bonnes propriétés du matériau.</li> <li>• Coûts matière réduits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investissements coûteux.</li> <li>• Cadences de moulage trop faibles pour la grande série automobile.</li> </ul>

- Faible part de main d'œuvre.
- -Cadences de production élevée.

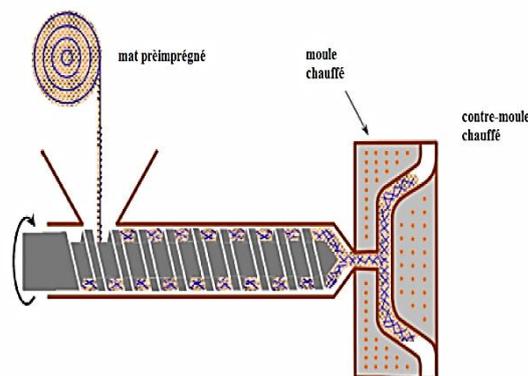
### II.2.1.3.3. Moulage par injection

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.).

Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats pré-impregnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries.



**Figure II.6.** Moulage par injection

#### Domaine d'application

- Pièces pour appareillages électriques
- Pièces automobiles sous capot
- Pièces industrielles diverses

#### Caractéristiques mécaniques :

Sont présentés dans le tableau suivant.

**Tableau II.6.** Caractéristique mécanique de Moulage par injection.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de forme complexe.</li> <li>• Grande précision de moulage.</li> <li>• Cout matière modéré.</li> <li>• Cadences de moulages élevés.</li> <li>• Faible impact de la main d'œuvre sur la qualité des pièces.</li> <li>• Larges possibilités d'automatisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limite dimensionnel.</li> <li>• Investissement élevé.</li> <li>• Propriétés mécanique modeste.</li> <li>• Nécessité de doser précisément la matière.</li> </ul>

#### II.2.1.4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches, de panneaux ondulés pour toitures (figure III.8), plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

1-Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).

2-Une phase de mise en forme.

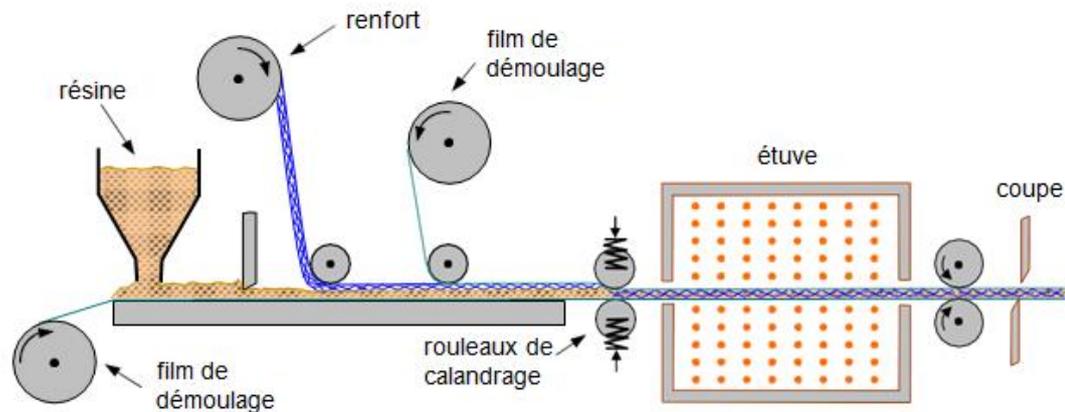
3-Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).

4-Une phase de refroidissement et découpage.

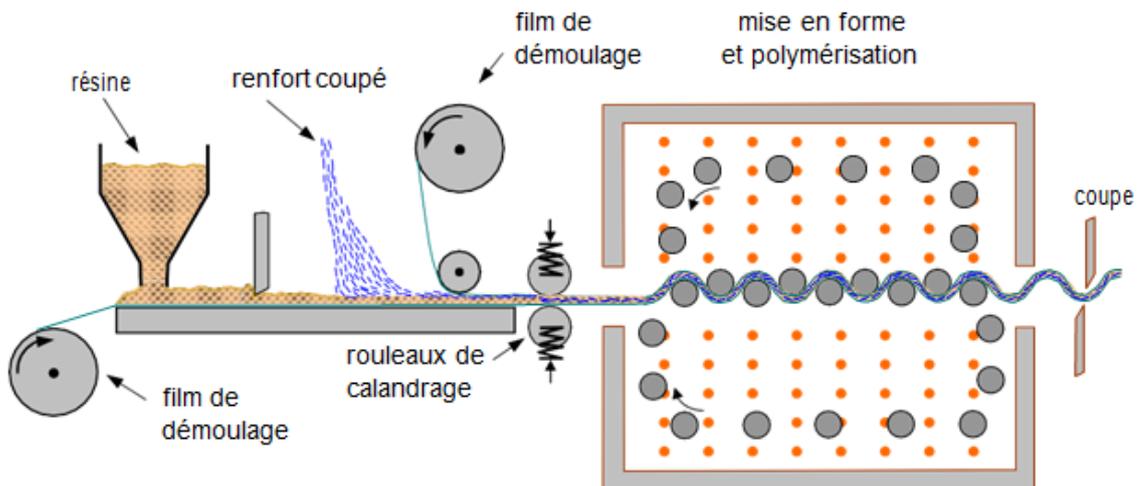
Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure III.7), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure III.8), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles. Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des

plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.



**Figure II.7.** Moulage en continu de plaques.

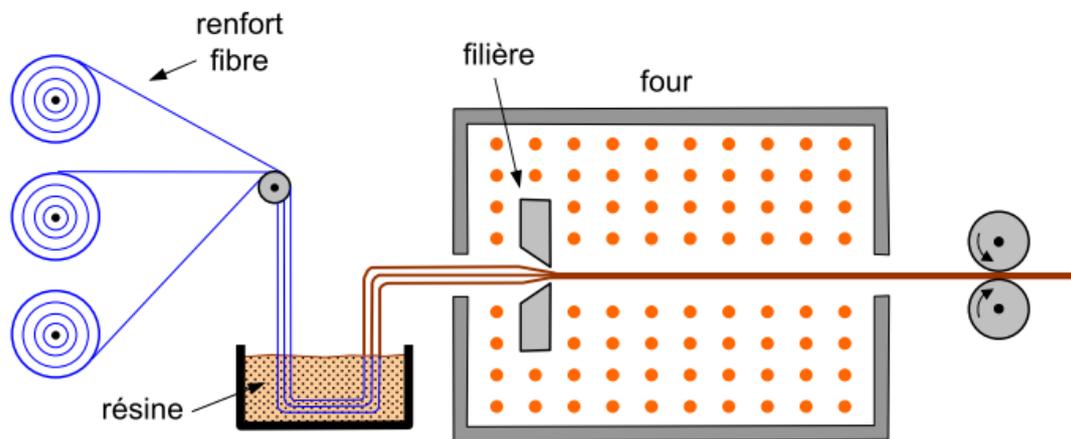


**Figure II.8** Moulage en continu de panneaux ondulés.

### II.2.1.5. Moulage par pultrusion

Des fibres ou des tissus imprégnés de résines sont tirés à travers une série de filières en acier durci. La dernière filière est chauffée pour réticuler la résine ce qui produit une section composite rigide. La forme du profilé est déterminée par la section de la filière. Il est possible de produire des sections circulaires pleines ou creuses, rectangulaires, carrées,

ou des profilés divers et des sections en I. La vitesse de passage à travers la filière est déterminée par la viscosité, l'épaisseur et le temps de réticulation de la résine.



**Figure II.9.** Moulage par pultrusion.

### Domain d'application

- Boulons d'ancrage, âmes d'isolatrice électrique haute tension, canne à pêche
- Tube de structure
- Tous profile isolant électrique ou résistant à la corrosion
- Rack à bagage pour bus

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.7.** Caractéristiques mécaniques Moulage par pultrusion

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profilés à sections complexes (creux, angles vifs...)</li> <li>• Aspect de surface lisse</li> <li>• Part de la main d'œuvre réduite, large mécanisation</li> <li>• Très grande résistance mécanique (dans la longueur)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de possibilités de variation de section</li> <li>• Profilés rectilignes</li> <li>• Investissements assez élevés</li> <li>• Coût des outillages et des machines</li> </ul>

### II.2.1.6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure 3.10) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

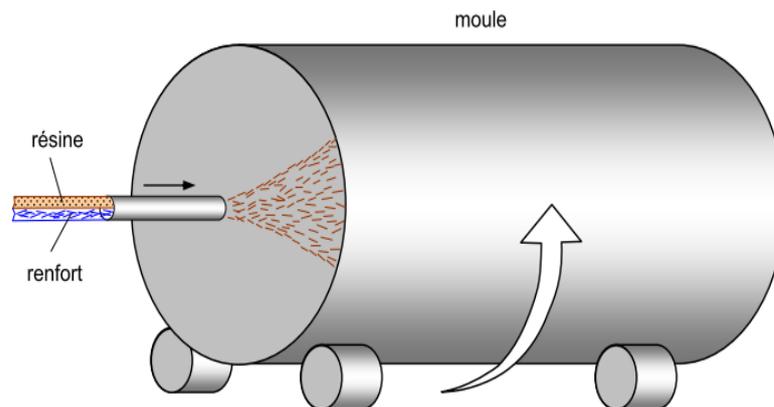
Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifié coupé;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinue avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.



**Figure II.10.** Moulage par centrifugation.

### Domaine d'application

- Moules : diamètre 0.1 à 0.5 mètres
- Tuyaux : jusqu'à 2 m de diamètre
- Cuves (diamètre 1 à 2 m)
- Silos (diamètre 4 à 5 m, longueur 10 à 12 m)
- Cages de pressions à vin

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.8.** Caractéristiques mécaniques de moulage par centrifugation

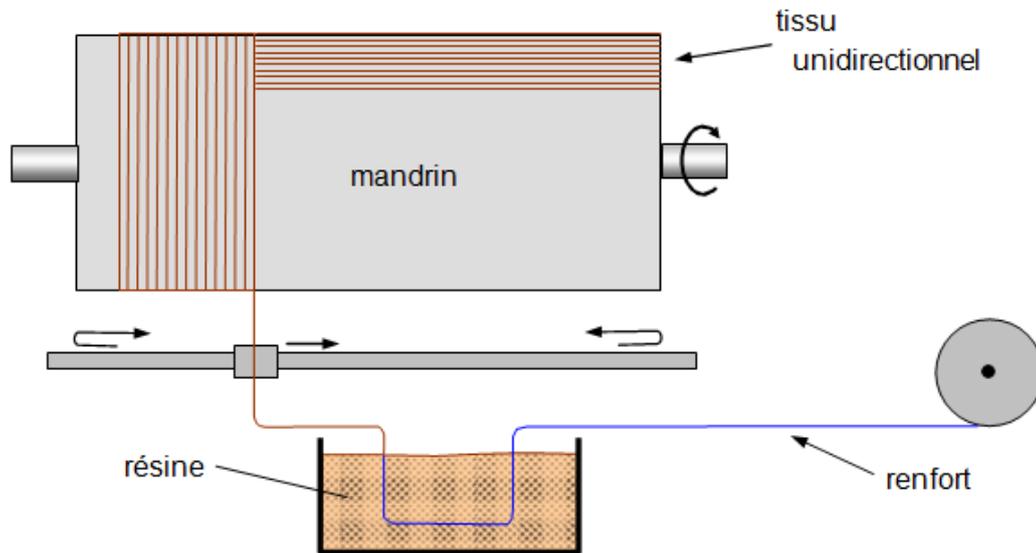
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune perte de métal : évite l'usage des noyaux axiaux pour les pièces de révolution.</li> <li>• Possibilité d'empiler des couches diverses de matériaux.</li> <li>• Propriétés mécaniques élevées du produit coulé, structure à grains fins et rendement élevé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• le coût élevé des équipements et installations.</li> </ul>

### II.2.1.7. Moulage par enroulement filamentaire

#### II.2.1.7.1. Enroulement circonférentiel (Figure II.11)

Le bobinage est effectué à  $90^\circ$  par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin.

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.



**Figure II.11.** Principe de l'enroulement circonférentiel

### II.2.1.7.2. Enroulement hélicoïdal

#### II.2.1.7.2.1. Enroulement discontinu

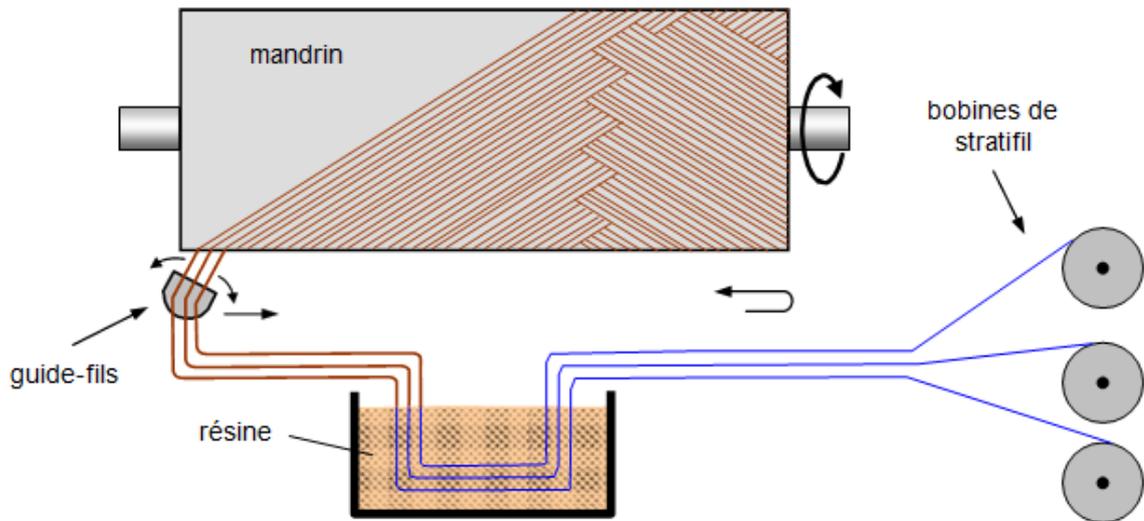
La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif des guide-fils par rapport à la rotation du mandrin (figure 3.12). La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée surtout la surface du mandrin par des mouvements alternatifs des guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

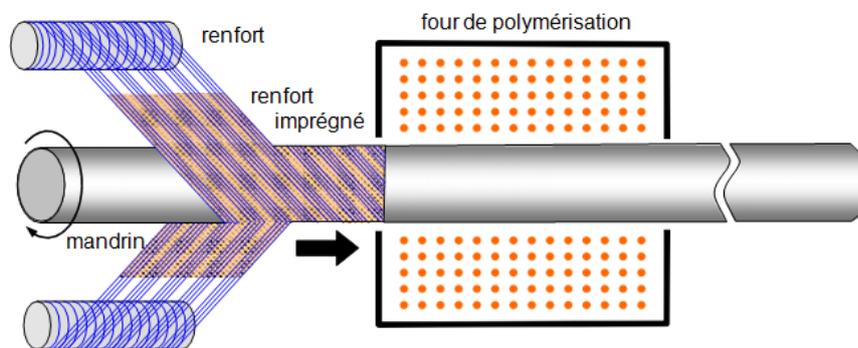
#### II.2.1.7.2.2. Enroulement continu

L'enroulement continu (figure II.13) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux

hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.



**Figure II.12.** Principe de l'enroulement hélicoïdal

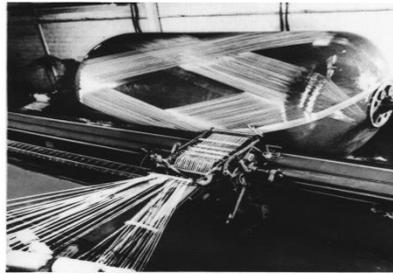


**Figure II.13** Enroulement hélicoïdal continu

### II.2.1.7.3. Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement (figure 3.14). Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.



**Figure II.14** Enroulement polaire (Documentation Vertex)

### Domaine d'application

- Tuyaux résistés à forte pression, citernes de transport, réservoir de stockage
- Appareillage de génie chimique
- Industrie électrique
- Armement (tube lance-roquettes)
- Automobiles (ressort de suspension)
- Sport : perche, canne à pêche, bouteille de plongée

### Caractéristiques mécaniques

**Tableau II.9.** Caractéristiques mécaniques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le procédé est mécanique donc très grande régularité dans le placement de la fibre.</li> <li>• Dosage assez précis de la résine.</li> <li>• Possibilité de renforcer des zones ou des axes de la pièce en fonction des contraintes.</li> <li>• Possibilité de faire varier le taux de renforcement en modifiant la tension de la fibre et le raclage de la résine.</li> <li>• Accepte pratiquement toutes les résines et toutes les fibres.</li> <li>• Possibilité d'enrouler des pré-imprégnés.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Création uniquement de formes de révolution.</li> <li>• Pas de possibilités de variation de section.</li> <li>• Investissements relativement élevés</li> </ul>

## II.3. Architecteur et mise en œuvre des matériaux composites

### II.3.1. Description

Une fibre est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive. Sous la forme d'un filament fin, les propriétés d'un matériau sont beaucoup plus proches des valeurs théoriquement possibles que tout forme de matière, surtout en résistance à la rupture. En effet, la résistance à la rupture d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque mais dépend des défauts présents à la surface ou dans le volume des matériaux, qui engendrent des concentrations de contrainte. [12]

Le verre est un matériau élastique, est chaque enfant qui a envoyé un ballon dans une vitre sait qu'il est fragile, la résistance à la rupture de verre dépend des micro-défauts superficiels.

Pour optimiser la durée de vie utile et réduire le risque de défaillance des applications en composite renforcé fibres de verre, il est critique de sélectionner correctement le type et la composition de la fibre de verre. Il existe actuellement sur le marché beaucoup de types de renforts en fibre de verre. Owens Corning vous propose cet outil pour vous aider à sélectionner la fibre de verre la plus adaptée à un environnement corrosif, prenant en compte coût et performance. Sur ce marché, Owens Corning a depuis toujours été l'inventeur principal, créant nombre d'innovations pour la fibre de verre.

Le verre étant une matière transparente dure et fragile fabriquée à l'aide de sable et de soude. [12]. Et aussi un matériau vitreux et isotrope, il le reste même après un étirage. il est composé essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ), abondante puisqu'elle est le constituant principal de sable et peu chère.

### **II.3.2. Fibre de verre**

La production industrielle des fibres de verre a débuté dans les années 1930 aux Etats-Unis où deux sociétés ont commencé à fabriquer des filtres industriels composés de fibres de verre. Les deux sociétés ont fusionné en 1938 pour devenir " Owens Corning ".

Les fibres de verre sont devenues les renforts les plus utilisés dans les matériaux composites. Elle représente plus de 99% en poids des renforts utilisés dans les composites si nous ne tenons pas compte du caoutchouc renforcé. Elle est utilisée pour le renforcement, l'isolation et l'optique.

La fibre de verre est généralement utilisée comme barrière à la corrosion et comme élément structurel. Ils ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites [13].

### II.3.3. Mise en œuvre des matériaux composites

#### II.3.3.1. Type de fibres de verre :

Tableau II.10 les différents types de fibres de verre

Type de verre	Année d'invention	Caractéristique principale	Résistance	Prix	Inventeur
Verre A	1938	Isolation	Faible	\$	Owens Corning
Verre E	1939	Classe électrique	Moyenne	\$	Owens Corning
Verre C	1943	Résistant à la corrosion	Faible	\$	Owens Corning
Verre R	1965	Grande robustesse	Élevée	\$\$	Saint-Gobain <sup>1</sup>
Verre S	1965	Grande robustesse	Très élevée	\$\$\$	Owens Corning
Verre AR	1974	Résistant aux alcalis	Faible	\$\$	Owens Corning
Verre E-CR	1980	Résistant à la corrosion	Moyenne	\$	Owens Corning
Verre Advantex <sup>®</sup>	1996	Résistant à la corrosion	Moyenne	\$	Owens Corning
Verre H	2004	Rigidité élevée	Moyenne	\$\$	Saint-Gobain <sup>1</sup>
HPG <sup>2</sup>	2004	Grande robustesse	Élevée	\$\$	Owens Corning
Fusion Directe-S	2008	Robustesse/rigidité élevées	Très élevée	\$\$\$	Owens Corning

#### II.3.3.2. Présentation industrielle des renforts en verre textile

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il faut jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements

##### II.3.3.2.1. Les unidirectionnels (UD)

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise [14].

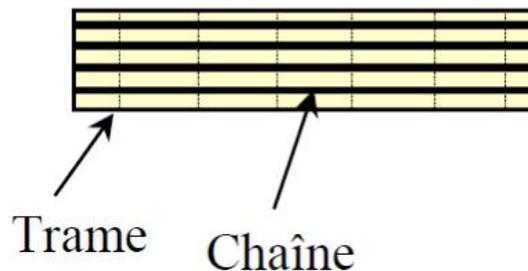
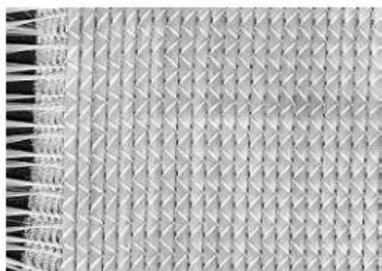


Figure II.15 Image qui représente Les unidirectionnels (UD)

➤ **Stratifils (ou roving) :**

Le roving est un Assemblage de fils de base parallèles groupé sans torsion. Cette forme de matériaux ne s'applique qu'à quelques procédés comme l'enroulement filamentaire et la pultrusion. Avec ces procédés, on peut fabriquer des tubes et des profilés extrêmement résistants.



**Figure II.16** Image qui représente la stratifil.

➤ **Stratifils bouclés (ou spun roving) :**

Une partie des fils de base ou des filaments constitutifs forme des boucles. Les boucles améliorent la résistance inter laminaire des composites Moulage par pultrusion.



**Figure II.17** Stratifié bouclé

### II.3.3.2.2. Multidirectionnelle aléatoire

Il est possible de fabriquer des composites avec des fibres disposées dans trois directions. Par construction tous les composites sont fortement anisotropes, puisque la rigidité et la résistance des fibres sont de l'ordre de 50 à 100 fois supérieures à celles des résines.

➤ **Fils coupés**

Fils de base coupés en longueur relativement faibles (3, 4, 5, 6, 12 et 25 mm) Moulage au contact, renforcement des résines thermoplastiques par extrusion/injection et le renforcement des BMC.



**Figure II.18** Fils coupé

➤ **Fibres broyées**

Elles sont obtenus par broyage de fils de base (0,1 à 0,5 mm).13, 4, 5, 6, 12 et 25 mm) Renforcement des résines thermoplastiques, R-RIM. Cela rend la résine un peu blanche.



**Figure II.19** Fibres broyées

➤ **Mats :**

Le mat se présente sous forme planeire comme un tissu mais l'orientation des fibres est aléatoire. Les fibres sont maintenues ensemble par un liant. Dans un mat, les fibres peuvent êtres continues ou coupées.

**a-Mats à fils coupés (50mm) :**

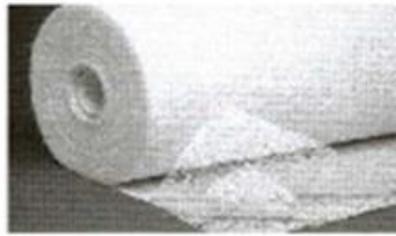
- Mats avec liant en poudre très solubilisables
- Mats avec liant en poudre peu solubilisables
- Mats avec liant liquide
- Renforcement des résines polyester et à un degré moindre les résines époxydes.



**Figure II.20** Mat à fils coupé

**b-Mats à fils continus :**

Ces mats sont constitués de fils continus, disposés sous forme de boucle (RTM, SMC, compression des plaques).



**Figure II.21** mat à fils continus

**c-Mat de surface (ou voile de surface)**

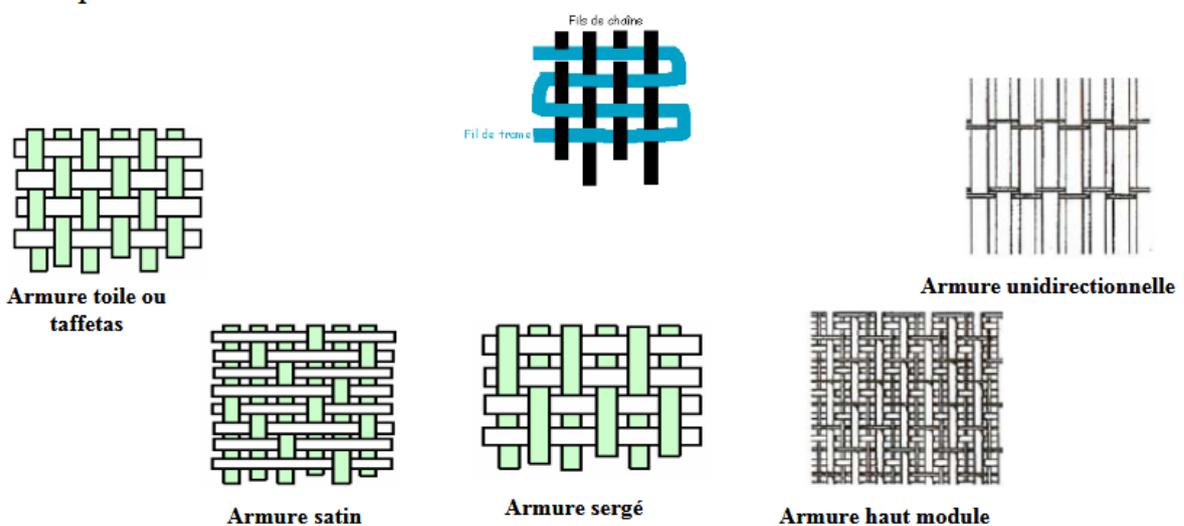
Une couche mince et compacte de fibres discontinues ou de fils liés entre eux.

**II.3.3.2.3. Orientée**

Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une armure toile, un satin ou un sergé

➤ **Armure (weave) :**

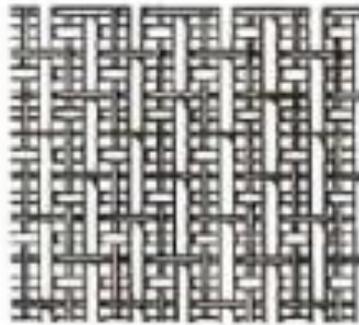
Terme de tissage désignant le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame dans un tissu. Suivant le motif d'armure, le tissu obtenu est plus ou moins souple et déformable.



**Figure II.22.** Le motif d'armure.

➤ **Armure haut module**

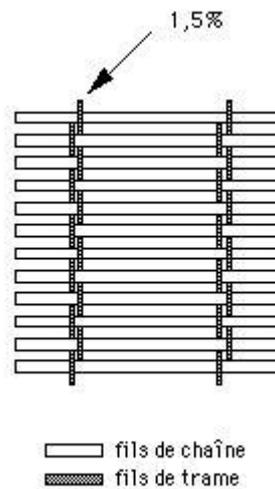
L'armure haute module dans laquelle les fils de chaîne et les fils de trame ne subissent aucun entrecroisement et sont maintenus par des fils fins.



**Figure II.23.** Armure haut module.

➤ **Armure unidirectionnelle**

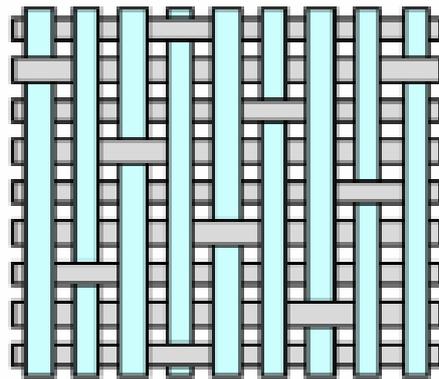
L'armure unidirectionnelle qui n'est constituée que de fils parallèles maintenus dans la direction perpendiculaire par un fil fin.



**Figure II.24.** Armure unidirectionnelle.

➤ **Satin (Satin weave) :**

Le tissu «satin» fournit la meilleure rigidité dans un stratifié. Ils sont relativement faciles à draper et très flexibles. Ils sont principalement employés pour des besoins de pièce nécessitant de grandes résistances. Le satin de 8 est le plus utilisé, très déformables, notamment pour les formes complexes.

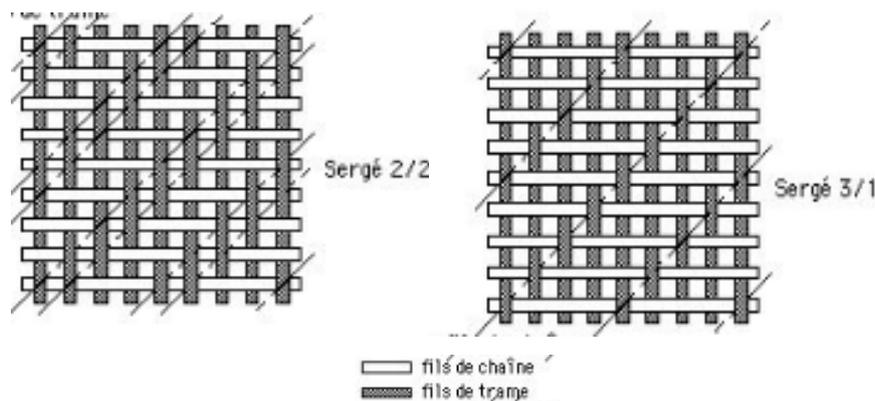


**Figure II.25.** Satin de 8.

➤ **Sergé (Twill - Twill weave)**

Désigne un type d'armure de produits textiles tissés pour lesquels chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame. C'est l'armure la plus dense.

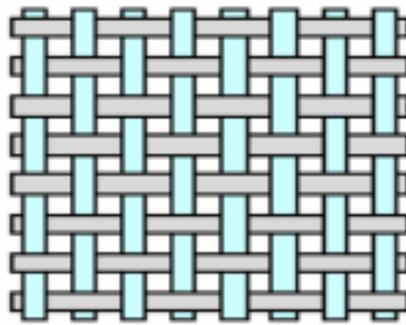
Les tissus à armure sergé sont très déformables, possèdent un comportement similaire dans le sens chaîne et le sens trame (contrairement à l'armure satin) et présentent une densité de fils plus élevée que l'armure satin.



**Figure II.26.** Armure sergée.

❖ **Taffetas (Taffeta - Taffeta Weave)**

Armure de produits textiles tissés pour lesquels chaque fil de chaîne passe alternativement au-dessus et au-dessous de chaque fil de trame et réciproquement.



Taffetas

Figure II.27. Armure Taffetas.

On réalise également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles raideur obtenue avec un renfort tissé sera moindre que celle que l'on observerait en superposant deux unidirectionnels.

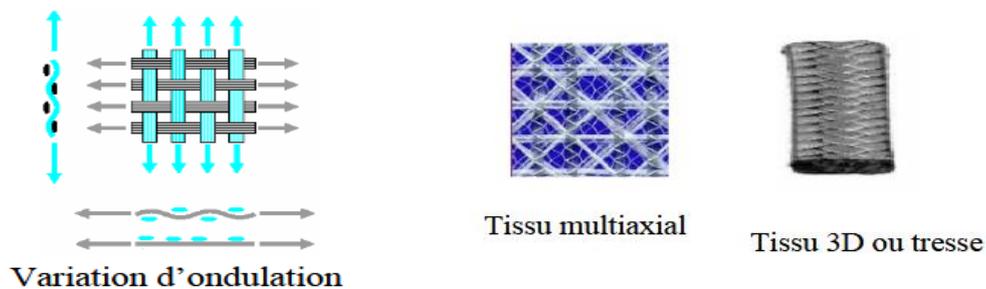


Figure II.28. Des armures bi ou tridimensionnelles.

**Remarque :** La raideur obtenue avec un renfort tissé sera moindre que celle que l'on observerait en superposant deux unidirectionnels

## II.4. Mécanisme d'endommagement et de rupture des matériaux composites

### II.4.1. Description

La rupture est un problème auquel l'homme devra faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est de plus en plus crucial avec le développement, lié aux progrès technologiques, de structures complexes. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément depuis le milieu du 20e siècle, de mieux prévenir le risque de rupture [15].

L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique à partir d'un défaut. Elle se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelle surface de rupture à l'échelle macroscopique [9].

- On distingue deux catégories de rupture des structures :
  - Celle provenant d'une négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure,
  - Et celle liée à l'utilisation d'un nouveau matériau ou d'un nouveau procédé, qui peut provoquer une rupture inattendue [15].

L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau [16].

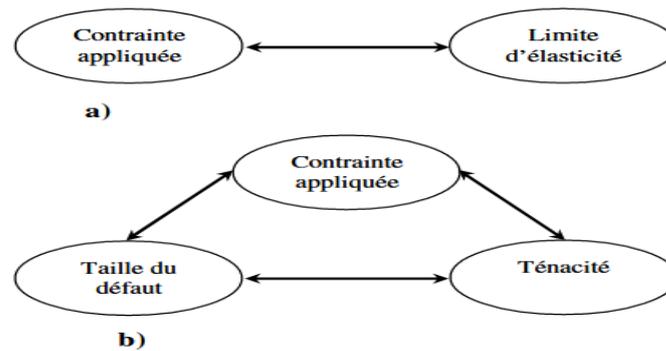
#### **II.4.2. Définition d'endommagement**

L'endommagement désigne les phénomènes de création de nouvelles surfaces au sein d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation. L'endommagement est comme une augmentation de la taille ou du nombre de fissures. Ceci engendre une diminution des caractéristiques mécaniques du système qui mène à sa ruine.

Il est l'apparition de dommage dans un matériau caractérisé par une extension de surface libre à l'intérieure du matériau accompagnée d'une augmentation des fractions volumiques de vide cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Il est caractérisé par des modifications en principe observable. Les phénomènes d'endommagement tels que les microdéformations. La dégradation des surfaces, les introductions microfissures, les microcavités, la corrosion, et le vieillissement. Sont tous observable, mais parfois ils sont difficiles à mettre en évidence.

#### **II.4.3. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception**

Deux approches sont utilisées pour le dimensionnement des structures (figure II.29). La première, la plus classique, repose sur la limite d'élasticité du matériau  $E\sigma$ , alors que la seconde s'appuie sur le concept de ténacité  $CK$  issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR).



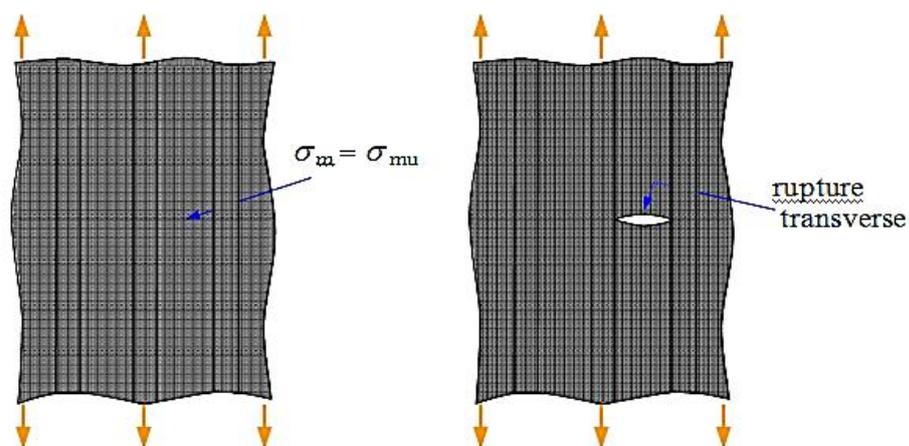
**Figure II.29.** Comparaison de l'approche classique (a) et l'approche utilisant la MLR (b).

#### II.4.4. Les mécanismes de rupture dans un composites unidirectionnelle

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

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

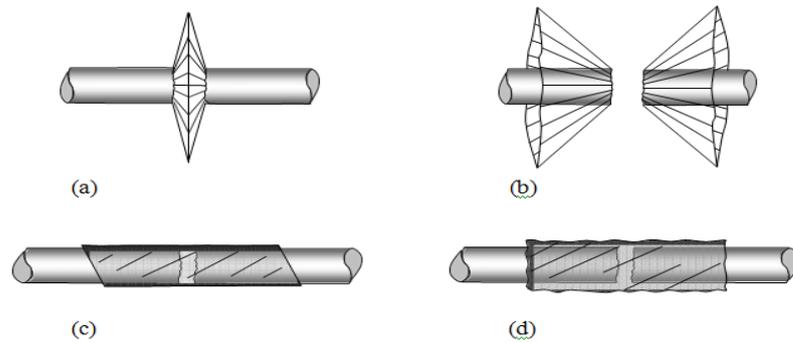
Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées [9].



**Figure II.30.** Rupture transverse de la matrice.

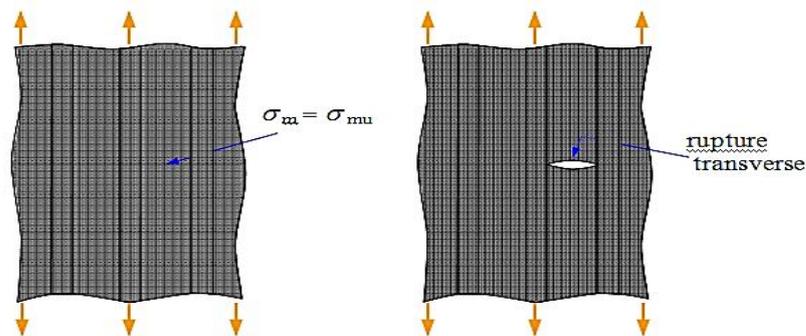
Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction  $\sigma_f$  dans une fibre atteint

la contrainte à la rupture  $\sigma_{fu}$  de la fibre (figure 12.1). La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée, des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc.



**Figure II.31.** Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

- (a) Rupture transverse de la matrice ; (b) Rupture en cisaillement de la matrice ;  
(c) Décohésion de l'interface fibre-matrice ; (d) Rupture longitudinale de la matrice.



**Figure II.32.** Rupture transverse de la matrice.

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (**Figure II.32**) lorsque la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice, soit par fissuration longitudinale (**Figure II.33**) lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture  $\tau_{mu}$ , généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture, appelé “splitting” par les anglo-saxons, se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice :  $\tau_d > \tau_{mu}$ . Dans le cas

contraire où  $\tau_d < \tau_{mu}$ , il se produit une rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice (Figure II.34).

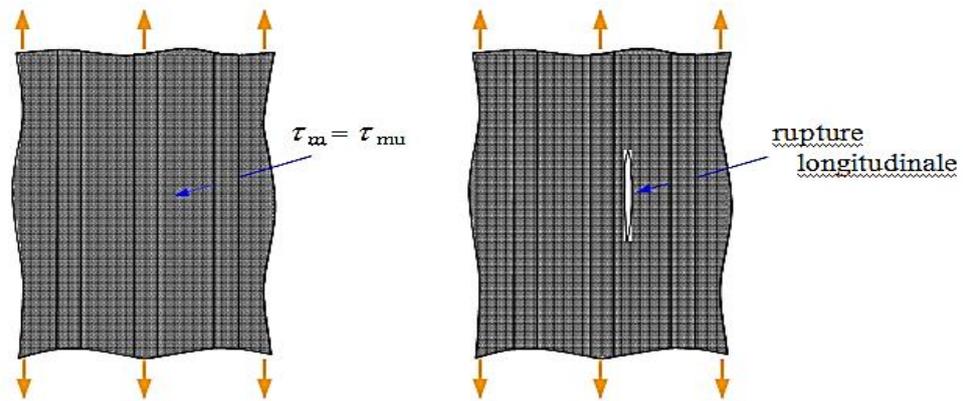


Figure II.33. Rupture longitudinale de la matrice.

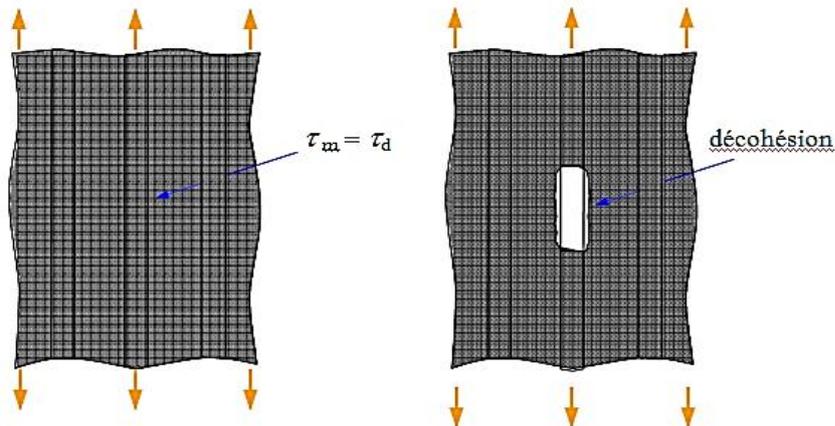
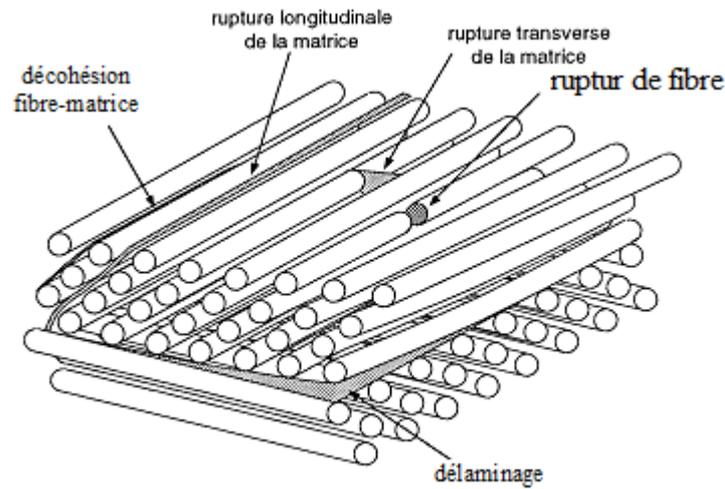


Figure II.34. Décohésion fibre-matrice.

La rupture finale d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ces divers mécanismes élémentaires. L'initiation, puis la propagation de la rupture dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, de l'interface fibre-matrice, de la fraction volumique des fibres, de l'état et des conditions de sollicitations mécaniques imposées.

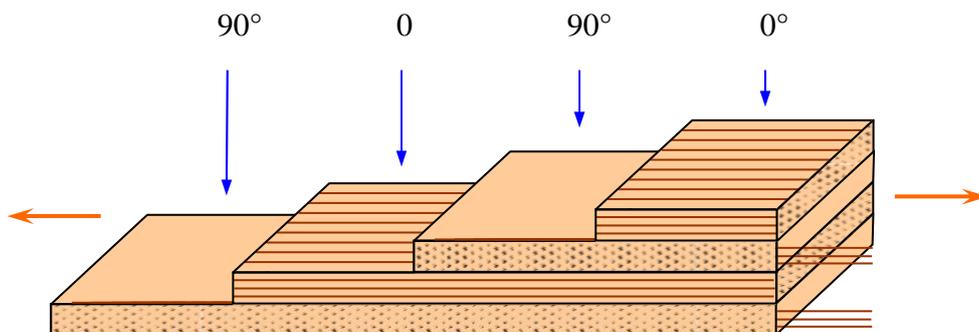
#### II.4.5. Rupture des stratifiés

Dans le cas de stratifiés au mécanisme élémentaire décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinal de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibre), s'ajout (Figure II.35) un mécanisme de rupture entre les couches appelée rupture délaminage. Les mécanismes de rupture induit dépendent de la nature de constituants, de l'architecteur des couches et des modes de sollicitation mécanique imposé.



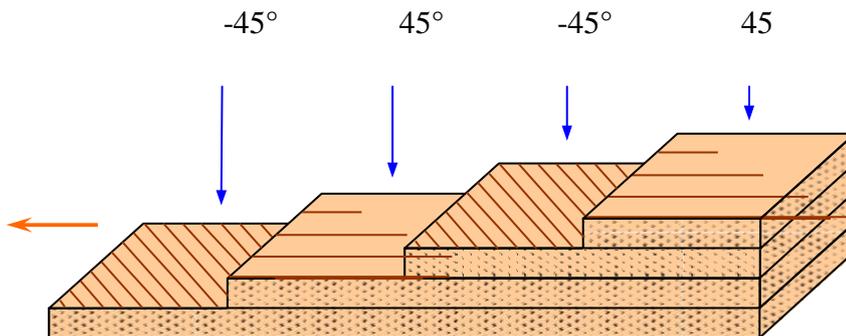
**Figure II.35.** Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés.

Par exemple, dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction  $0^\circ$  (figure II.36), le premier phénomène de rupture observé est celui de la fissuration des couches orientées à  $90^\circ$ . La fissuration se produit par rupture longitudinale de la matrice ou/et par rupture de l'interface fibre-matrice dans les couches orientées à  $90^\circ$ . Cette fissuration conduit à la formation de fissures orientées transversalement à la direction du chargement mécanique. Ainsi, cette fissuration initiale des couches à  $90^\circ$  est appelée fissuration transverse du stratifié croisé. Lorsque le chargement mécanique est augmenté, le nombre de fissures croît jusqu'à atteindre un état de saturation de la fissuration. Les fissures transverses créent en pointes de fissures, entre les couches orientées à  $90^\circ$  et à  $0^\circ$ , des concentrations de contraintes qui conduisent à l'initiation puis à la propagation du délaminage à l'interface entre les couches. Ce délaminage se développe ensuite jusqu'à la rupture finale du stratifié par rupture des fibres et de la matrice dans les couches à  $0^\circ$ .



**Figure II.36.** Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction  $0^\circ$ .

Dans le cas d'un stratifié croisé  $\pm 45^\circ$ , soumis à une traction longitudinale dans la direction  $0^\circ$  (Figure II.37), on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à  $\pm 45^\circ$ , suivie d'un délaminage entre les couches.



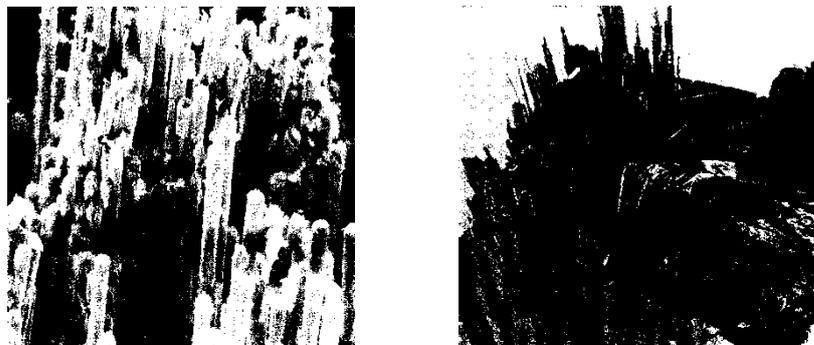
**Figure II.37.** Stratifié croisé  $\pm 45^\circ$  soumis à une traction dans la direction  $0^\circ$ .

#### II.4.6. Observation des mécanismes de rupture

Le suivi des mécanismes de rupture peut être effectué par diverses techniques dont nous donnons quelques éléments dans ce paragraphe.

##### II.4.6.1. Observation par microscopies

La technique la plus simple à mettre en œuvre est l'observation à l'aide d'une binoculaire ou d'un microscope optique, permettant éventuellement une observation continue des phénomènes de rupture au cours des essais. L'observation est ponctuelle et la profondeur de champ limitée. La microscopie électronique à balayage augmente cette profondeur, tout en permettant d'atteindre des grossissements élevés. !!!Les figures (Figure II.38) et (Figure II.39) et montrent les micrographies obtenues dans le cas de la fissuration transverse de composites présentant une faible adhérence fibre-matrice (Figure II.38) et une adhérence élevée (Figure II.39).



**Figure II.38.** Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA).

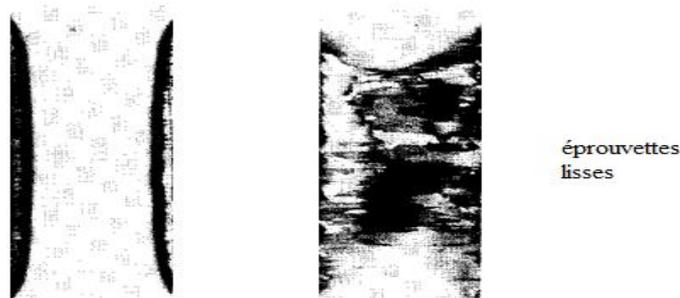


**Figure II.39.** Surface de rupture associée à une bonne adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA).

#### II.4.6.2. Visualisation par radiographies

La technique de visualisation par radiographie X consiste à imprégner l'éprouvette fissurée à l'aide d'un opacifiant (type iodure de zinc) et à faire ensuite une radiographie X de l'éprouvette. La radiographie donne une image 2D de l'état de fissuration (Figure II.40.). Il est cependant aisé de localiser les dommages dans l'épaisseur du stratifié lorsque l'on connaît l'orientation des couches. La radiographie permet une visualisation très fine des fissures, et en particulier des fissures transverses à l'épaisseur de l'éprouvette. Il faut noter qu'il est nécessaire pour chaque radiographie de démonter l'éprouvette, puis de la remonter sur la machine d'essai pour suivre l'essai. Il en résulte un alourdissement considérable des essais.

Il est également possible d'observer l'état de fissuration d'une éprouvette par radiographie à l'aide d'un scanner médical. L'analyse des variations de densité permet alors d'accéder à des informations en trois dimensions.



**Figure II.40.** Visualisation par radiographie X de l'état de fissuration de composites à fibres de carbone.

### II.4.6.3. Analyses par émission acoustique

L'émission acoustique est un processus physique qui permet d'accéder, en temps réel, à des informations sur les mécanismes de rupture mis en jeu. Lorsqu'un mécanisme de rupture se produit au sein d'un matériau, il se crée localement une discontinuité du champ des déplacements et des contraintes. Cette discontinuité appelée *événement* devient la source d'une onde de déformation qui se propage dans le matériau. À la surface du matériau, un capteur adapté traduit l'onde reçue (Figure II.41.) en un *signal* électrique qui est ensuite amplifié, puis analysé. Les capteurs sont des capteurs piézoélectriques développés spécifiquement pour l'émission acoustique, de manière à avoir une sensibilité élevée. Le domaine des fréquences étudiées s'échelonnent généralement de 50 kHz à 1 MHz

La technique d'émission acoustique consiste à extraire de ces signaux des informations en relation avec les mécanismes de rupture [9].

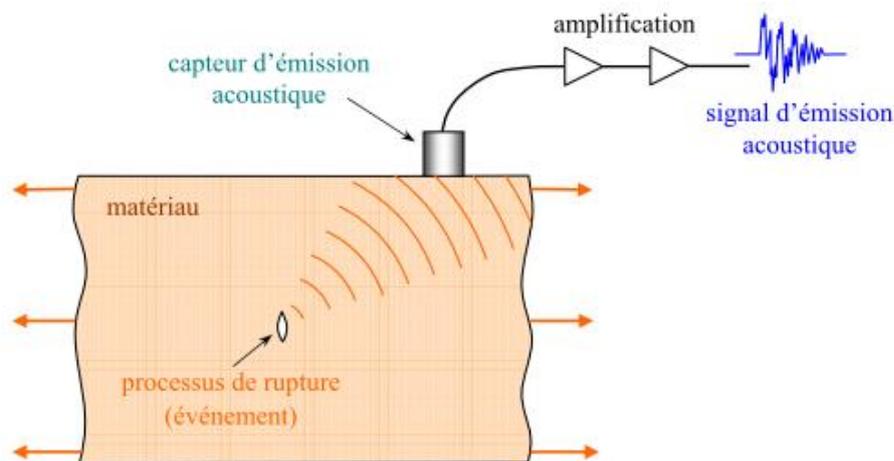


Figure II.41. Processus d'émission acoustique.

## II.5. Comportement mécanique des stratifiés

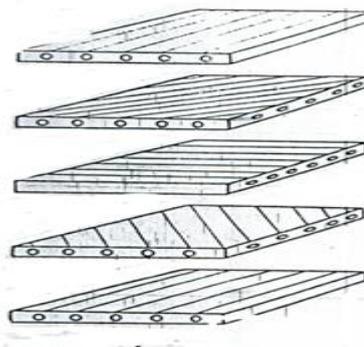


Figure II.42. Structure de stratifié

### II.5.1. Relation contrainte déformation dans le cas d'un stratifié :

La relation contrainte déformation dans les directions principales d'un matériau orthotrope s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{II.1}$$

Dans un plan (x, y) autre celui d'orthotropié, on aura :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{C}_{11} & \overline{C}_{12} & \overline{C}_{16} \\ \overline{C}_{12} & \overline{C}_{22} & \overline{C}_{26} \\ \overline{C}_{16} & \overline{C}_{26} & \overline{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{II.2}$$

$\overline{C}_{ij}$  Sont déterminés en fonction des constantes  $C_{ij}$  les équations du chapitre I.

Pour un stratifié, l'équation (II.2) sera relative à  $K^{i\text{ème}}$  couches ( $K^{i\text{ème}}$  pli) et l'on écrit :

$$\{\sigma\}_k = [\overline{C}]_k \{\varepsilon\}_k \quad \text{II.3}$$

On cherche à étudier la variation des contraintes et déformations le long de l'épaisseur du stratifié. On déterminera les forces résultantes et les moments résultants par intégration des équations (II.3) à travers l'épaisseur.

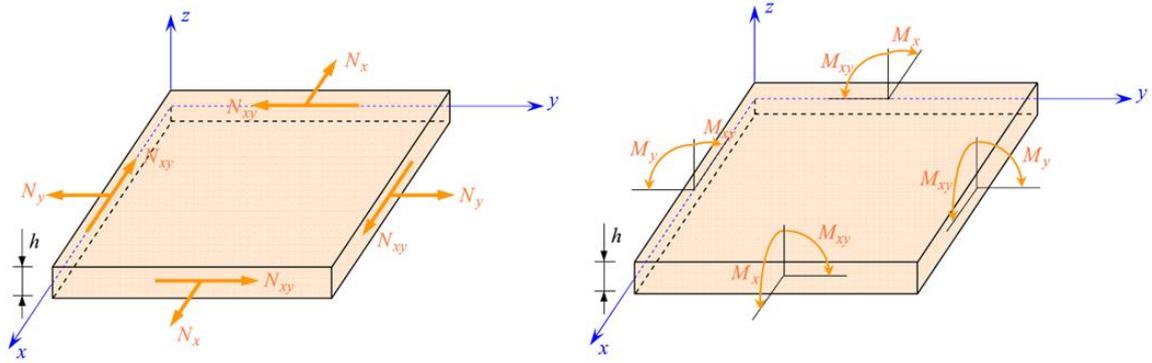
Les connaissances de variation des contraintes et des déformations et essentielle pour l'étude des contraintes d'extension et de flexion des plaques stratifiées.

Les déplacements sont continus de part et d'autre du pli et il n'y a pas de glissement relatif, le stratifié se comporte comme une seule plaque avec des propriétés du matériau variables. Après déformation (flexion) les sections transversales restent normales au plan moyen et dans ces conditions les déformations en cisaillement plans perpendiculaire au plan moyen sont ignorées ( $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \mathbf{0}$ ) de plus, les directions normales seront aussi ignorées ( $\varepsilon_z = \mathbf{0}$ ) les hypothèses de Kirchoff pour les plaques et celle de Kirchoff-Love pour les coques sont utilisées pour déduire les déplacements et par conséquent les déformations dans le stratifié.

### II.5.2. Forces résultantes et moments résultants :

Nous considérons dans ce qui suit un stratifié plan d'épaisseur totale (t) il constitué de (n) plis. Le pli n<sup>ème</sup> k a une épaisseur  $t_k$ .

Le stratifié est soumis à des sollicitations dans son plan notés  $N_x$ ,  $N_y$  et  $T_{xy} = T_{yx}$  (Figure II.43) (résultantes d'efforts ou membranes)



**Figure II.43.** Stratifié est soumis à des sollicitations

$N_x$  : Effort résultant dans la direction x, par unité de largeur dans la direction y.

$T_{xy}$ : (Ou  $T_{yx}$ ) cisaillement de membrane par unité de largeur dans la direction y (ou suivant la direction x).

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad ; \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \quad ; \quad T_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} dz \quad \text{II.4}$$

Aux efforts de membrane s'ajoutent les moments  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_{xy}$  (Figure .II.43.b) (moment de flexion et de torsion)

$M_x$  : Moment fléchissant d'axe y, du aux contraintes  $\sigma_x$ , par unité de largeur suivant la direction y

$M_{xy}$  : (Ou  $M_{yx}$ ) moment de torsion d'axe x (ou y), du aux contrainte  $\tau_{xy}$ , par unité de largeur suivant la direction y (ou suivant x).

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \cdot z dz \quad ; \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \cdot z dz \quad ; \quad M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} \cdot z dz \quad \text{II.5}$$

Les équations (II.4) et (II.5) peuvent a prendre la forme suivante (Figure II.44):

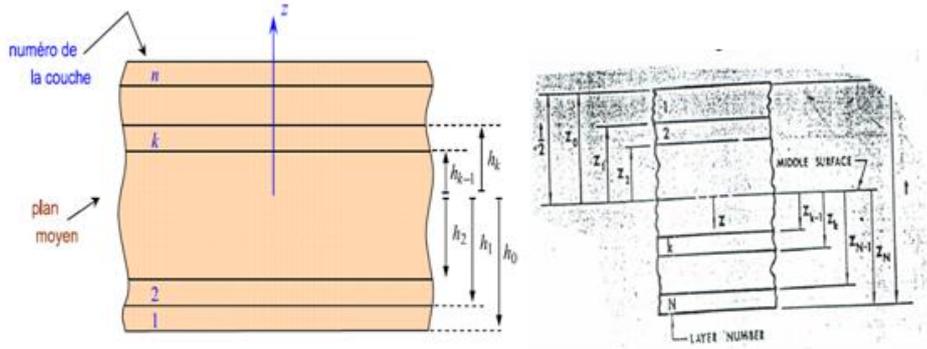


Figure II.44 Représentation des couches d'un stratifié

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad \text{II.6}$$

Et

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z dz \quad \text{II.7}$$

$z_k$  et  $z_{k-1}$  sont définis dans la figure II.44. On note que  $z_0 = -t/2$ . Les forces et moments résultants sont indépendants de la variable  $z$ , ils sont fonction de  $x$  et  $y$  les coordonnées dans les surfaces planes médianes [17].

Par substitution de l'équation (II.1) dans les équations (II.6) et (II.7) on obtient :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{C_{11}} & \overline{C_{12}} & \overline{C_{16}} \\ \overline{C_{12}} & \overline{C_{22}} & \overline{C_{26}} \\ \overline{C_{16}} & \overline{C_{26}} & \overline{C_{66}} \end{bmatrix}_k \left[ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z dz \right] \quad \text{II.8}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{C_{11}} & \overline{C_{12}} & \overline{C_{16}} \\ \overline{C_{12}} & \overline{C_{22}} & \overline{C_{26}} \\ \overline{C_{16}} & \overline{C_{26}} & \overline{C_{66}} \end{bmatrix}_k \left[ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \cdot z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z^2 dz \right] \quad \text{II.9}$$

On peut voir aisément que  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, K_x, K_y$  et  $K_{xy}$  ne sont pas fonction de  $z$  mais prennent seulement des valeurs sur la surface du plan moyen.

(II.8) et (II.9) s'écrivent :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{II.10}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{II.11}$$

Avec :

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\overline{C_{ij}})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{C_{ij}})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{C_{ij}})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Tell que :

$A_{ij}$  : Rigidité en tension.

$B_{ij}$  : Coefficients de couplage.

$D_{ij}$  : Coefficients de flexion (Rigidité en flexion).

### Conséquence :

La force résultante  $N_x$  provoque, en plus des déformations normales  $\varepsilon_x^0$  et  $\varepsilon_y^0$ , la distorsion (torsion)  $K_{xy}$ .

### Conclusion :

De même que pour le cas isotrope, dans le cas d'une plaque orthotrope il n'existe pas de couplage membrane- flexion/torsion.

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.17}$$

### II.5.4. Stratifiés symétriques :

Un stratifié est symétrique si le plan moyen est un plan de symétrie. Deux couches symétriques ont :

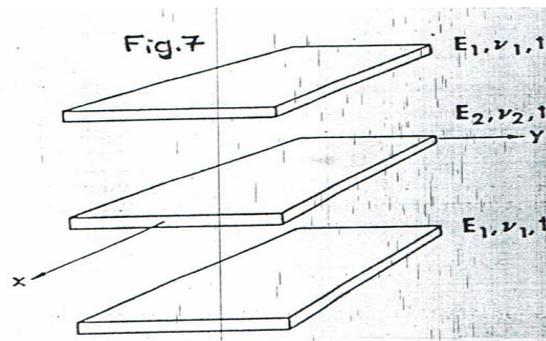
- Même matrice de rigidité réduit  $(\overline{C}_{ij})_k$
- Même épaisseur  $t_k$
- Des cotes opposées  $z_k$  ( $-z_k$ )

Les coefficients  $B_{ij}$  de la matrice de rigidité du stratifié seront nuls. L'équation constitutive prend la forme générale suivante :

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{II.18}$$

- Pas de couplage flexion- membrane. (comportement plus simple)
- Les stratifiés symétrique sont largement utilisés. Des conditions spécifiques nécessitent un stratifié non symétrique (bouclier thermique).

**II.5.4.1. Empilement de plusieurs couches isotrope (Figure II.45) :**



**Figure II.45** Stratifie avec des couches isotropes

La matrice de rigidité de la  $K^{ième}$  couche donne :

$$(\overline{C}_{11})_k = (\overline{C}_{22})_k = \frac{E_k}{1-\nu_k^2} ; (\overline{C}_{16})_k = (\overline{C}_{26})_k = 0$$

$$(\overline{C}_{12})_k = \frac{\nu_k E_k}{1-\nu_k^2} ; (\overline{C}_{66})_k = \frac{E_k}{2(1-\nu_k)}$$

On aura toujours la forme suivante des efforts et moments résultants :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \end{cases} \quad \text{II.19}$$

### II.5.5. Stratifiés antisymétriques :

Les stratifiés symétriques sont utilisés afin d'éliminer le couplage membrane-flexion. Ce couplage peut être nécessaire dans quelques conceptions ; exemple : turbine à ailettes ayant un profil gauche.

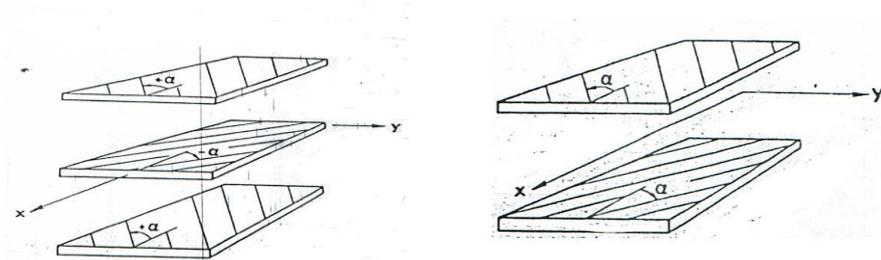


Figure II.46 Stratifiés antisymétriques

Le cas au une meilleur rigidité en cisaillement est recherchée, il est nécessaire d'avoir des couches possédant différent orientation. Stratifié symétrique, orientation des axes antisymétrique par rapport au plan moyen.

2 couches antisymétriques ont :

- Des cote opposées ( $z_k, -z_k$ ) ;
- Même épaisseur  $t_k$  ;
- Des orientations  $\theta$  et  $-\theta$  par rapport aux axes de référence du stratifié.

### II.6. Conclusion

La fibre de verre possède en conséquence le même module de Young que le verre massif, il est accessible à tous les budgets, Elle est un petit plus en matière d'isolation phonique et thermique, mais tout dépend de la qualité choisie.

Le but de la mécanique de la rupture est de formuler des critères, c'est-à-dire de définir les conditions pour les quelles un défaut identifié (ou non) peut se propager sous

une sollicitation donnée. Ainsi, de permettre un dimensionnement plus fin des structures en tenant compte des phénomènes d'endommagement amenant à la ruine du matériau.

L'étude de l'endommagement améliore la compréhension des mécanismes qui mènent à la destruction d'objets. La modélisation de ces mécanismes, ainsi que de l'influence des paramètres (mécaniques, thermiques, matériau, etc...), permet de retarder la rupture, à défaut de l'éviter.

Le but de Comportement mécaniques stratifiés et de la réalisation d'une structure ayant une rigidité pouvant résister à un chargement donné. Les directions principales des couches du stratifié peuvent être orientées différemment. On aura un couplage entre extension et distorsion si l'architecture ne vérifie pas une symétrie par rapport au plan médian [17].

### III.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale qui est consacré à l'élaboration des échantillons. Nous étudierons en premier lieu les matériaux utilisés, à savoir les fibres de verres et la résine époxy.

Ensuite la méthode d'élaboration par moulage sous vide de différente plaque stratifiée (sans et avec couture).

Nous entamerons par la suite le découpage des éprouvettes pour des essais de flexion 3 point selon des normes bien appropriées à chaque essai.

### III.2.Matières premières :

#### III.2.1.Résine Epoxyde :

La résines utilisée est une résines organique de performance élevées de type époxy fournie par la société AIR ALGERIE, (fiche technique annexe A) son appellation est « Epocast»,

destinées à la stratification. Utilisée grâce à ses avantages tels que la très bonne liaison chimique et la très bonne adhérence. La Epocast se présente sous forme de kit pré dose de deux composantes :

- Elément A : la résine
- Elément B : le durcisseur



(a)



(b)

Figure III.1 : type de résine pour l'élaboration ; (a) : la résine, (b) : le durcisseur

**Tableau III.1** : Caractéristique de la résine Epocast (fiche technique A).

Densité	1.25
La viscosité (MPa)	3500 à 25°c
Durée pratique d'utilisation	15-20 min à20°c65%HR
Temps de durcissement A23°c et 93%HR	3jours 2h
Résistance a la compression (MPa)	70
Résistance a la flexion (MPa)	25
Durée de mise en service	10jà20°c

### III.3.Elaboration des plaques stratifiées :

L'élaboration des stratifiées est réalisée par la méthode dite <<moulage sous vide>>.

#### III.3.1.Moulage sous vide :

Dans cette expérience on utilise un moule ouvert sur lequel sont disposées les couches de renfort pré-imprégné de résine. Une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement grâce à un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce. Le vide est fait sur cette feuille de plastique il ya donc compactage de la pièce et élimination des bulles d'air.

L'excédent de résine est absorbe par le tissu de pompage.

Dans notre étude nous avons utilisé ce procède pour l'élaboration des stratifiées au niveau de la base de maintenance de air Algérie.

Nous avons réalisés six plaques de stratifiées :

**Série 1** : Stratifie deux plis unidirectionnel.

**Série 2** : Stratifie deux plis unidirectionnel avec couture (45°, -45°).

**Série 3** : Stratifie trois plis unidirectionnels.

**Série 4** : Stratifie trois plis unidirectionnel avec couture (45°, -45°).

**Série 5** : Stratifie huit plis unidirectionnels.

**Série 6** : Stratifie huit plis unidirectionnel avec couture (45°, -45°).

#### III.4.La couture des stratifiés :

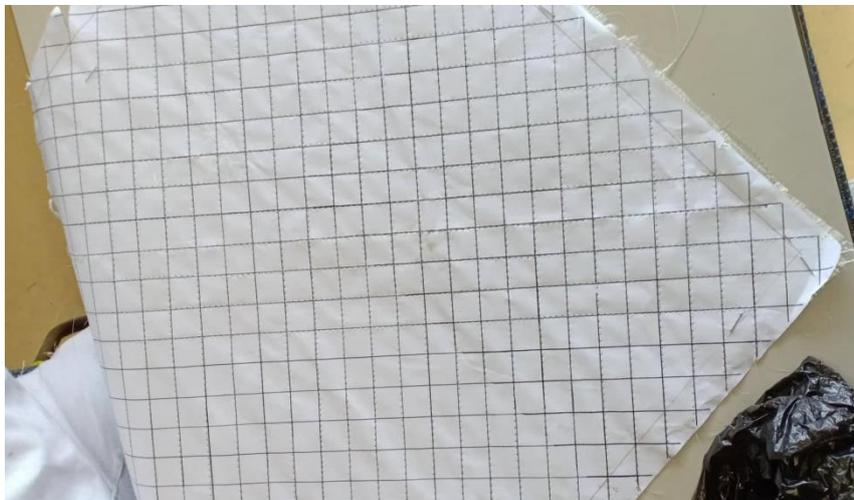
La couture est réalisé avec « **file de pêche ordinaire** » d'un diamètre égale a 0.1mm et pour le type de couture utilise dans cette expérience est Le « **'Chain Stitch'** ».

Le choix de ce type de couture est fait parce que ce type de couture peut être fait sur une machine à coudre domestique (ordinaire).



**Figure III.3** : Machine à coudre

- 1)- préparations des plis qui sont orientées dans les directions mentionnées avant.
- 2)- fixation des plis, coller une feuille blanche sur le stratifiés et tracer des traits parallèles orienté suivant la direction ( $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ) pour les suivre avec la machine à coudre.



**Figure III.4** : exemple de couture à ( $45^\circ$ ).

- 3)- préparation de la machine à coudre (montage de fil de pêche dans la machine à coudre), et réglage de pas de couture ou bien « **Stitch length** » (4mm dans cette expérience). (Figure 3.4)

Et avant de commencer à coudre il faut prendre en considération que « **Stitch step** » (la distance entre les lignes de couture) est 20 mm (Figure 3.5)



Figure III.5 : Le type de pas choisie.

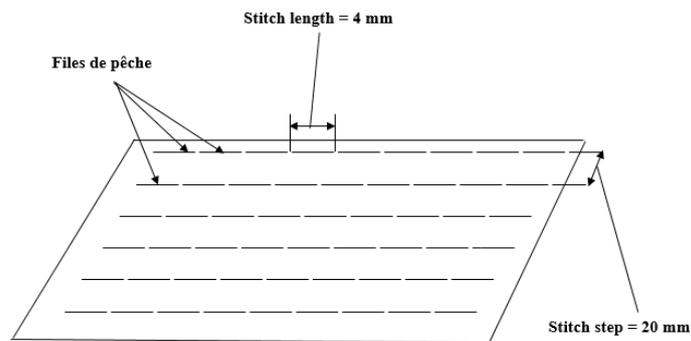
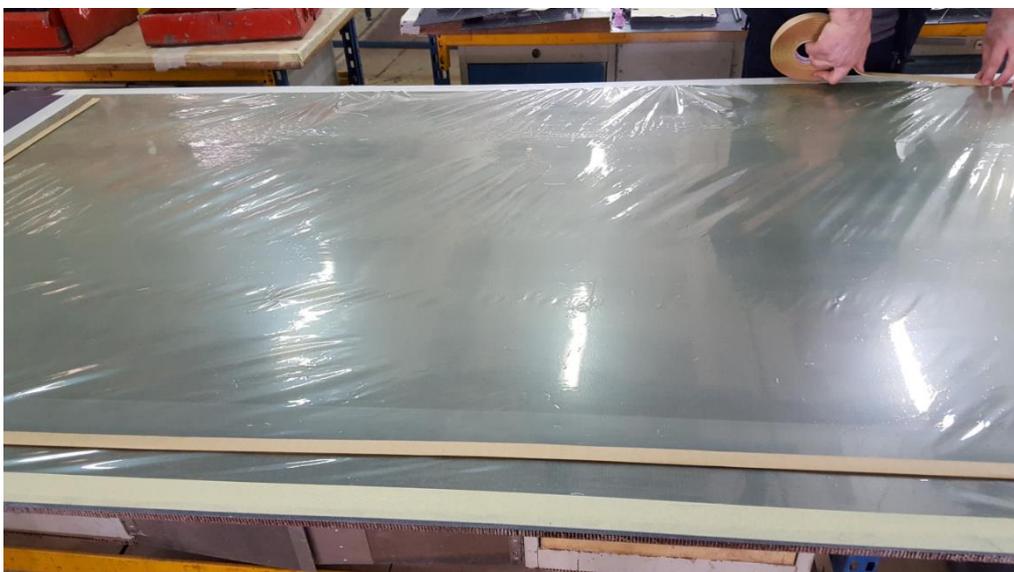


Figure III.6 : Schéma illustratif, présente les dimensions utilisées pour la couture (stitch lenth et stitch step).

### III.5.Présentation des matériaux utilisés :

#### III.5.1.La surface de travail :

La réalisation des matériaux nécessite une surface de travail plane, dans notre cas il s'agit d'une table de travail en sandwich nid d'abeille fibre de carbone (figure2.7)



FigureIII.7 : Table de travail

### III.5.2. Le renfort

Le renfort utilise pour la réalisation des éprouvettes est des nappes de fibre de verre unidirectionnelle, avec une dimension de (300\*300) mm.



Figure III.8 : tissu de verre (300\*300) mm

### III.5.3. La matrice (EpoCast 50-A1) :

C'est un mélange de deux éléments : la résine et le durcisseur. Les proportions ont été prises selon des normes imposées par le fabricant, qui exige comme mélange : 100g de résine pour 67g de durcisseur



(a)



(b)

Figure III.9, 10 : type de résine pour l'élaboration ; (a) : la résine, (b) : le durcisseur

### III.5.4. La pompe à vide (composite repaire console GMI-ANITA NG 9201) :

La console NG9201 (Figure 2.8) est un équipement de haute technologie innovant qui, en un boîtier compact rassemble les instruments nécessaires pour assurer toutes les fonctions que nécessite un collage à chaud sous vide d'une réparation "composites" ou sur métal.

La console NG9201 est un modèle de base dans la gamme. Il est régulièrement mis à jour pour intégrer les évolutions électroniques du moment. Modèle idéal pour des applications d'atelier ou sur avion, ANITA autorise toutes les opérations pour des réparations de petites ou grandes dimensions, la puissance de la valise pouvant assurer l'alimentation d'une couverture chauffante d'un mètre carré au moins.

- Taille: 350 x 220 x 220 mm, 9 Kg
- 2 Canaux chauffants indépendants pour réparation sur structure complexe ou large,
- Capacité totale en puissance de chauffe: 6000 watts (plus de 1 m<sup>2</sup>),
- Capacité de mesure de température: 6 thermocouples,
- Pompe à Vide par air comprimé et mesure de la dépression obtenue dans le sac à vide,
- Imprimante de tableau, et Supervision par PC par logiciel ANITALK (optionnel),
- Programmation et mise en œuvre très simples,
- Affichage et Synoptique pour visualisation de loin.



**Figure III.11** : Pompe à vide

### III.5.5. Tissus d'arrachage :

Le tissu d'arrachage a plusieurs avantages lors d'une utilisation sous vide :

- Eliminer la couche de résine polluée par les solvants à la surface des composites en les arrachant après polymérisation
- Eviter le collage de l'éprouvette avec l'ensemble des tissus lors de la séparation.



Figure III.12 : Tissu d'arrachage

### III.6 Procédure de fabrication

L'élaboration des stratifiés (sans et avec couture) consiste à mettre un composite verre/époxy (Epoxy) sous forme des plaques. Les stratifiés constitués de 6 plaques de différentes coutures et différentes couches.

- 3 plaques stratifiées non couturer 2plis, 3plis, 8plis.
- 3 plaques stratifiées couturer ( $45^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ) 2plis, 3plis, 8plis.

#### Etape1 :

Découper le renfort (tissu de verre) attentivement toute en respectant les dimensions à l'aide de ciseau.



(a)



(b)

Figure III.13 : Tissu de verre ; (a) : les dimensions de tissu de verre, (b) : le découpage

### Etape2 :

On pose un film de mise sous vide qui est un nylon vert spéciale pochète sur la plaque plane et on le fixe à l'aide d'un ruban adhésive pour qu'il ne bouge lors de travail.



**Figure III.15 :** Un film de mise sous vide

### Etape3 :

Mélanger la résine avec le durcisseur pendant 5 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation pour assurer une dispersion totale du mélange (**3min** dans un sens et **2min** dans l'autre sens).



(a)



(b)

**Figure III.16, 17 :** On mélange la résine avec le durcisseur ; (a) : les dimensions de tissu de verre, (b) : le découpage

### **Etape4 :**

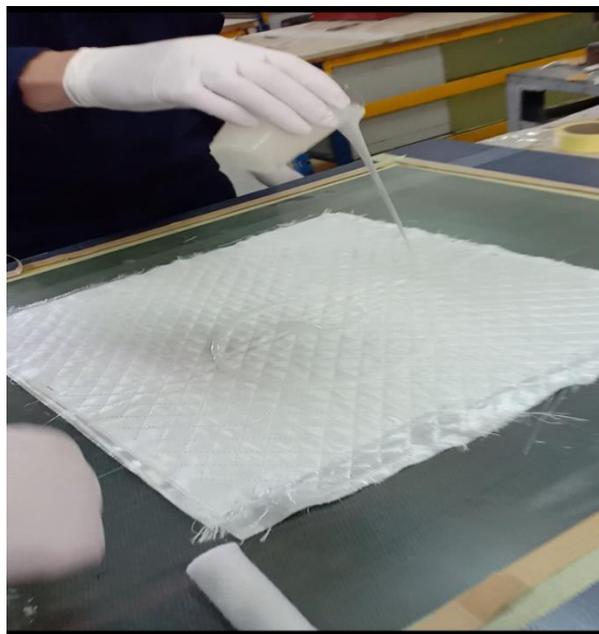
On étale la résine sur le film nylon pour assurer que la surface de la plaque absorbe bien la résine. (Figure2.18)



**Figure III.18 :** Etalement de la résine

### **Etape5 :**

On dépose sur le plan de travail le premier pli en fibre de verre unidirectionnel comme le montre la (figure 2.19).



**Figure III.19 :** dépôt de la résine sur la nappe

### **Etape6 :**

Un bon étalement de la résine sur la nappe de fibre de verre est nécessaire pour que cette dernière soit imprégnée d'une façon homogène sur toute la surface de la nappe (Figure 2.20)

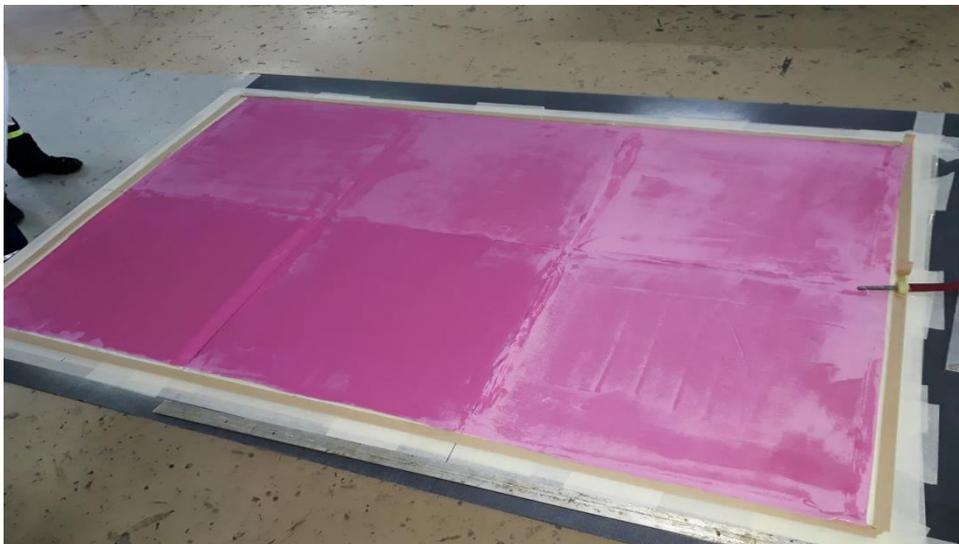


**Figure III.20 :** Etalement de la résine

### **Etape7 :**

Après avoir suivi le plan de travail dans chaque plaque stratifiés (Figure 2.15).

On dépose en dessus un tissu d'arrachage qui facilite l'arrachage de la plaque une fois terminé (Figure 2.21).



**Figure III.21 :** Dépôt de tissu d'arrachage

### **Etape8 :**

Le feutre de drainage est appelé aussi tissu de pompage (la WAT), est un sort de couverture pliée plusieurs fois permettant d'obtenir un tissu épais capable d'absorber l'excédent de résine (Figure2.22).



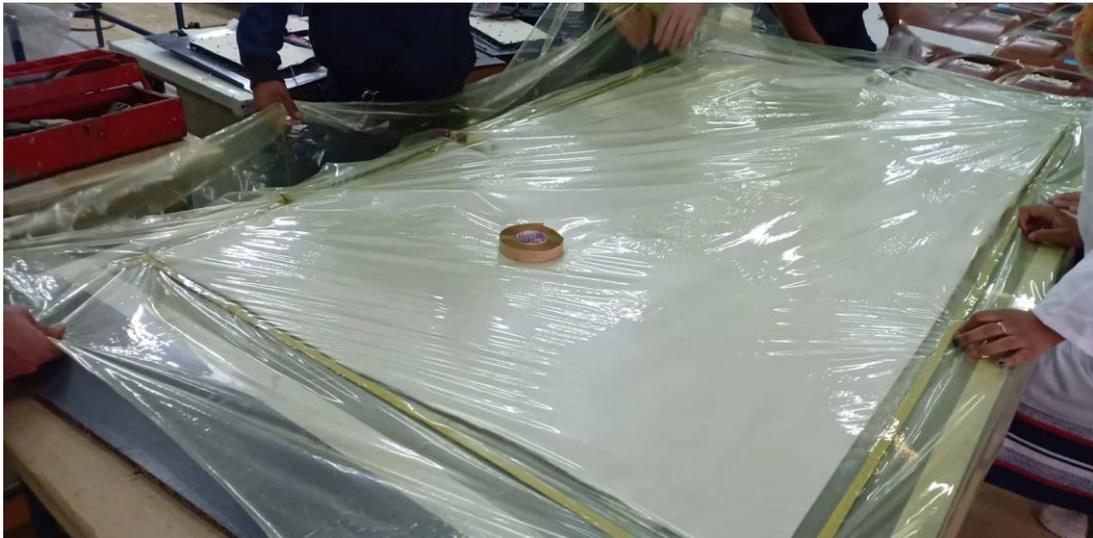
**Figure III.22 :** Dépôt de feutre de drainage

### **Etape9 :**

Un tuyau de la pompe à vide qui est connecte avec l'appareil est mis entre le sac vide et le tissu de drainage (Figure2.23). L'ensemble est ensuite couvert par un sac à vide (film de mise sous vide) (Figure2.24).



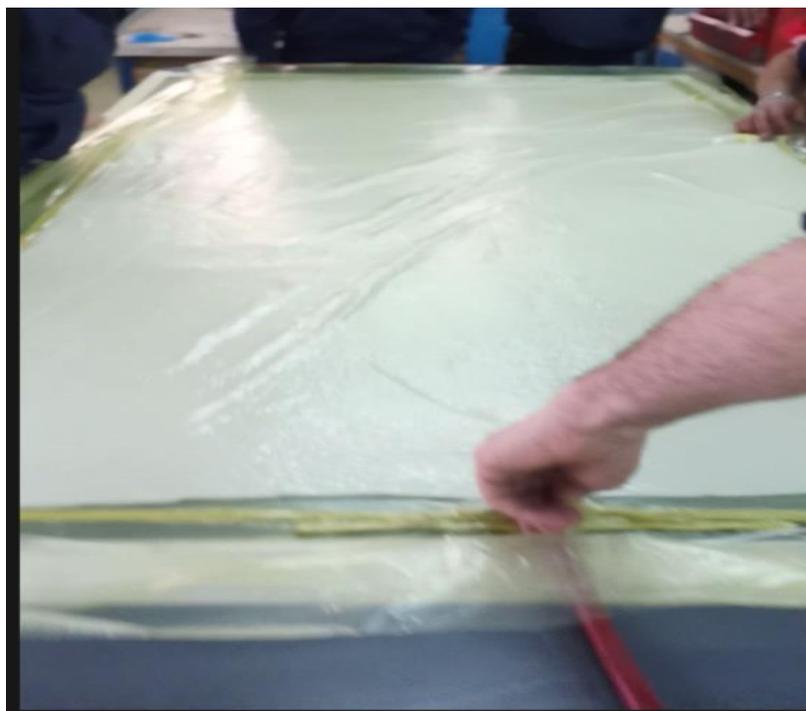
**Figure III.23 :** Tuyau de la pompe à vide



**Figure III.24 :** Mise en place le tuyau avec le sac à vide

**Étape10 :**

Cette étape consiste à fermer hermétiquement le sac a vidé avec un mastic d'étanchéité sous forme d'un ruban adhésif souple et pâteux (Figure2.25). Après avoir placé le joint on s'assure de sa bonne étanchéité avec le sac à vide.



**Figure III.25 :** Fermeture hermétique du sac à vide

### **Etape11 :**

L'opération de mise sous vide est lance, elle consiste à compacter la pièce et éliminer les bulles d'air. L'excédent de résine est absorbe par le tissu de drainage (Figure2.26). On laisse l'appareil de pompe à vide presque 4 à 6h du temps.



**Figure III.26 :** Début de processus de compactage

**Remarque :** pour les stratifiés de huit plis on a créé une chambre chaude à l'aide d'un séchoir et une surface en acier, pour assurer que la résine a été bien absorbée de la part des huit plis, et propager sur toute les surfaces des stratifiées (Figure 3.27).



**Figure III.27 :** La chambre chaude.

**Etape12 :**

Après polymérisations, on procède au démoulage les plaques stratifiées (Figure2.28).



**Figure III.28 :** Stratifier après démoulage

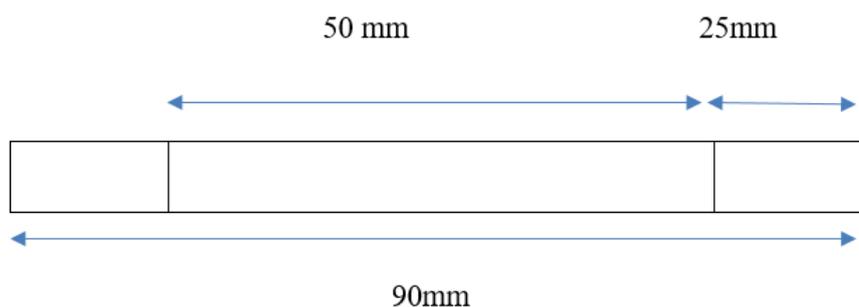
**III.7 : Découpage des plaques :**

**III.7.1 : Norme utilisée :**

Une fois les plaques réalisées sont prêtes on les découpe en petites éprouvettes dimensionnées selon les normes, puis on fixe les talons sur nos éprouvettes.

De toutes les normes relatives aux essais de flexion dans le plan des matériaux composites à matrice organique, L'ASTM D3039 est la norme la plus complète, car elle renseigne également sur les conditions d'essai (température, humidité relative), qui bien souvent sont responsables de dispersions importantes dans les mesures effectuées.

Les dimensions recommandées selon la norme ASTM D3039 (American Society for testing and materials) sont représentées sur la figure suivante.



**Figure III.29 :** les dimensions de l'éprouvette selon la norme ASTM D3090.

**Tableau III.2** : dimension des éprouvettes en (mm).

	Longueur totale	Longueur entre outillage	Largeur	Epaisseur
<b>Traction</b>	<b>90 ± 1</b>	<b>50 ± 1</b>	<b>16 ± 0.5</b>	<b>0.3 – 1.7</b>

Le découpage est réalisé avec une machine à découper du type CT15172 crownmunie d'un système de refroidissement par l'eau, régler aux faibles vitesses d'avance, pour éviter le délaminage des couches.

Les plaques de stratifié de dimension 400x 400 mm sont découpées suivant la norme ASTM D3039 relative aux tests de traction.

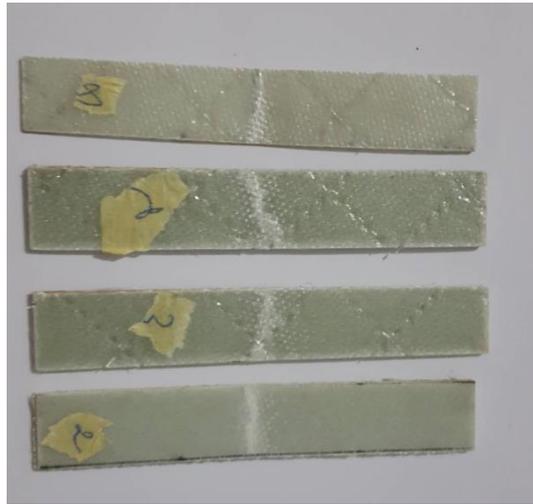


**Figure III.30** : Le moyen de découpage des plaques.

Les échantillons sont représentés dans les figures suivantes :

### **III.7.2 : création une fissure dans le centre des éprouvettes :**

Des entaille ont été créé de longueur de **1mm** de largeur et de déférentes longueur (**1.5 – 2.5 – 3.5 – 4.5 – 5.5**) **mm** comme indique les figures ci-dessous :



**Figure III.31** : échantillons des éprouvettes obtenues.

### **III.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre on à présenter les différents étapes d'élaborations des matériaux composites stratifiés avec et sans couture pour les deux cas sans et avec fissure (2 plis jusque 8 plis cousu et non cousu),

La raison de l'utilisation de cette technique fabrication montrée dans ce chapitre est due à son faible cout et à sa facilité de réalisation.

### IV.1.Introduction :

L'objet de ce chapitre est consacré à la caractérisation du comportement des matériaux de l'étude. A cet effet, nous présentons les essais mécaniques en flexion 3 pointes, appliqués sur les différents types des matériaux élaborés dans le chapitre précédent, Enfin, une étude comparative sur des résultats expérimentaux relatifs aux caractérisations mécaniques obtenues sur des éprouvettes en composites verre/époxy avec et sans couture (file de pêche) ayant subi des tests de flexion 3 points.

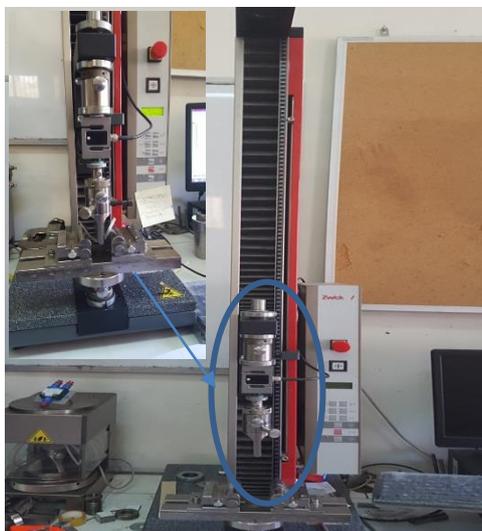
La caractérisation mécanique réalisée dans cette partie est basée sur des essais statiques de flexion pour le but de déterminer les propriétés mécaniques.

### IV.2. Etude expérimentale du comportement en flexion

L'essai de flexion 3 points est utilisé pour caractériser les matériaux en flexion. Les essais de flexion trois points sont effectués sur des échantillons élaborés suivant la norme ASTM D790 84-a. Le principe de cet essai est de mesurer la flèche «  $S$  » à partir d'un effort «  $F$  » appliqué au centre de deux appuis, en utilisant les grandeurs «  $S$  et  $F$  », et la géométrie de la pièce «  $L$ ,  $a$  et  $b$  » on peut déduire «  $\sigma$ ,  $\epsilon$  et  $E$  ».

L'éprouvette parallélépipédique est soumise à une flexion, au milieu de la portée « flexion 3 points », la charge est appliquée à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les essais sont effectués sur une machine de type « Zwick Z010 » équipée d'un capteur de force de 10 KN et pilotée par le logiciel « test expert V12.0 »



**Figure IV.1 :** Essai de flexion 3 points sur éprouvette stratifiée.

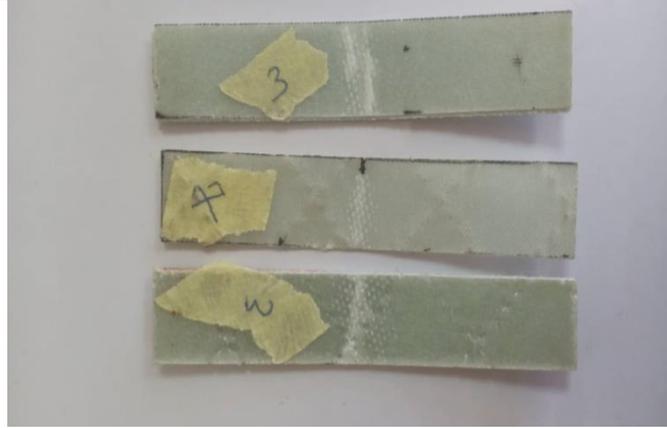


Figure IV.2 : les éprouvettes après l'essai de flexion.

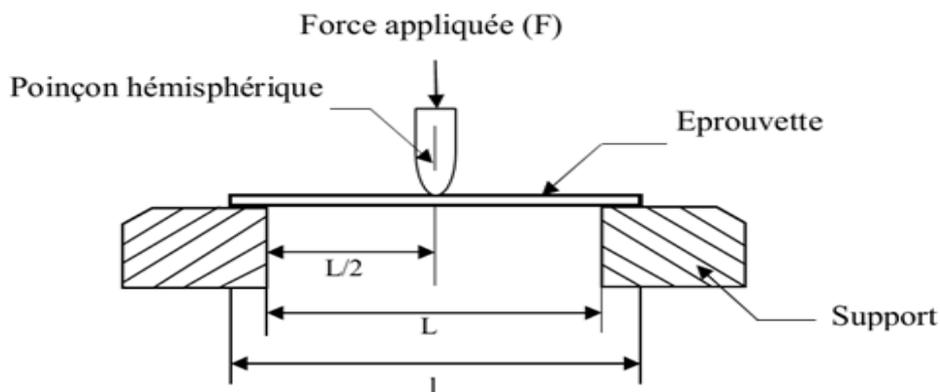


Figure IV.4 : Vue d'ensemble d'un montage de flexion 3points.

La contrainte de flexion est déterminée par [20] :

$$\sigma_i = \frac{3 \times F_i \times L}{2 \times b \times a^2}$$

La déformation est déterminée par [20] :

$$\varepsilon_i = \frac{6 \times S_i \times a}{L^2}$$

Ou:

**S**: la flèche en (mm) ;

**b** : largeur (mm) ;

**a** : épaisseur (mm) ;

**L** : l'écartement en (mm).

### IV.3. Schéma de réduction de données

Il existe différentes formulations de réduction des données pour calculer la mode II SERR [19,20]. La théorie de faisceau modifiée (MBT) est l'une des méthodes fiables de réduction des données fréquemment utilisées pour calculer le taux de restitution d'énergie (SERR). Wang et Williams [19] ont développé le concept MBT pour spécimen ENF. Selon réf [19], le mode II SERR est calculé comme suit :

$$G_{II} = \frac{9P^2(a + 0.42ch)^2}{16b^2h^3E_{f1}}$$

Où  $E_{f1}$  est la rigidité en flexion longitudinale des composites stratifiés. De plus,  $b$  et  $h$  sont la largeur et la moitié de la hauteur de l'ENF spécimen. Dans la relation ci-dessus,  $\chi$  est un facteur de correction obtenu comme [24] :

$$\chi = \sqrt{\frac{E_{II}}{11G_{11}} \left\{ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right\}}$$

Où  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  et  $G_{13}$  sont traction longitudinale, traction transversale et rigidité au cisaillement hors du plan des composites stratifiés.

### IV.4. Résultats expérimentaux :

L'acquisition des données des essais de traction obtenus par la machine est assurée au moyen d'un PC. Les résultats seront présentés dans un fichier d'extension «.TRA » et traités sous le logiciel Exell, à l'aide de ses données la trace des courbes contrainte-déformation est possible pour chaque éprouvette, on tire le module de Young, la contrainte à la rupture et l'allongement à la rupture. Pour chaque type d'éprouvettes, nous présentons les courbes « contrainte-déformation ».

L'analyse de ces courbes permet d'aboutir aux caractéristiques mécaniques du matériau.

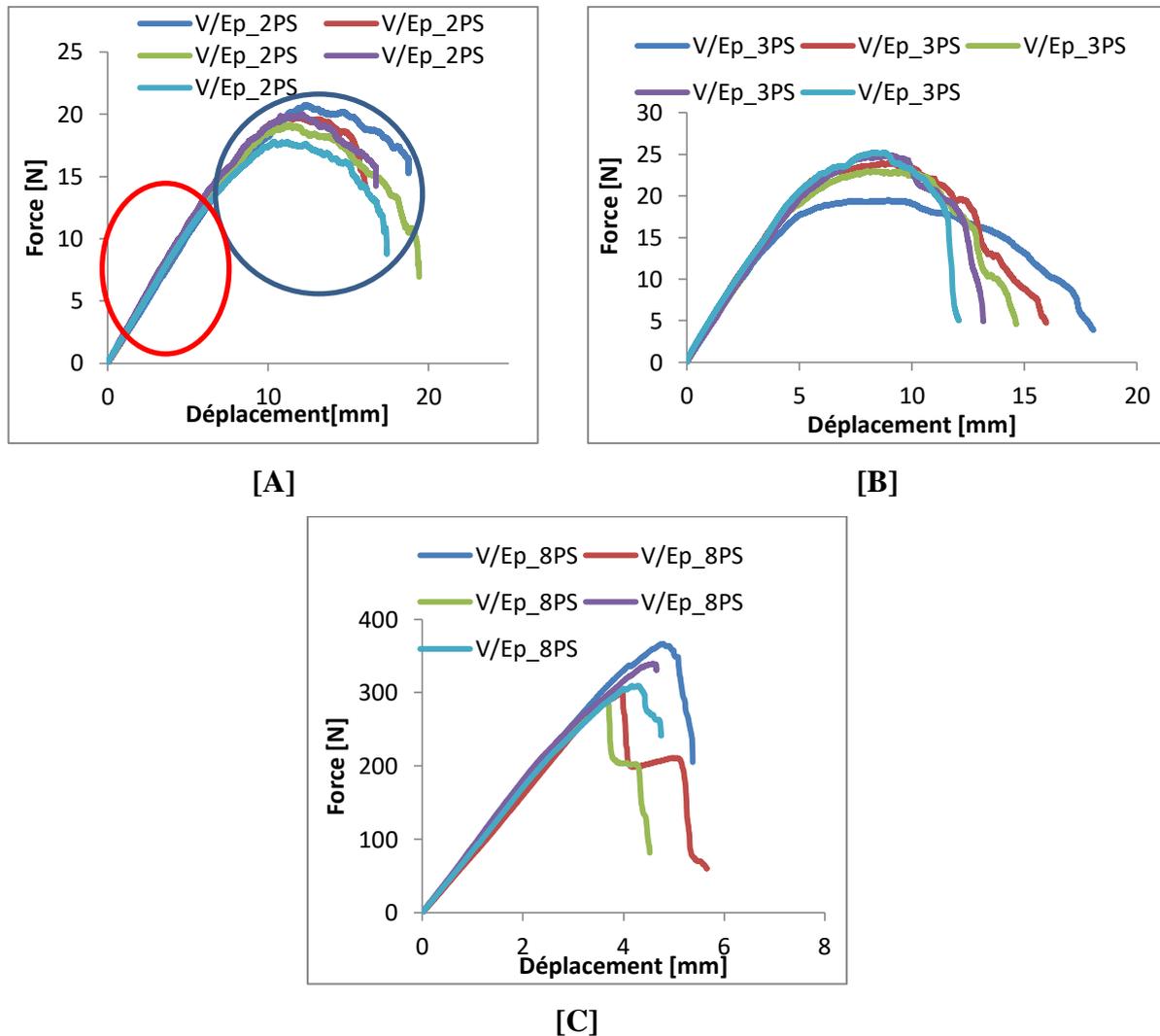
#### IV.4.1. Etude expérimentale du comportement en flexion 3 points

##### Résultats des essais de flexion :

Au cours des essais de flexion, l'acquisition des données est assurée au moyen d'un PC muni d'un logiciel « Test Xpert v12 ». Les résultats des essais sont récupérés sous forme d'un fichier texte et traités sous le logiciel Excel

IV.4.1.1.Flexion Verre/Epoxy [2, 3, 8] plis sans couture.

La figure IV.5. Représente l'évolution de la force en fonction du déplacement longitudinale pour les éprouvettes en matériaux composites (verre/epoxy) sans couture.



**Figure IV.5 :** Courbe de comportement expérimental force-déplacement en flexion 3 point des stratifiées unidirectionnel. [A] :2 plis sans couture. [B] :3 plis sans couture, [C] : 8plis sans couture.

**Interprétation des résultats**

Les résultats montrent que les courbes varient en premier lieu d'une manière linéaire par un comportement élastique (zone 1), avant de changer l'allure par un comportement plastique (zone 2).

On peut expliquer la variation des valeurs mesurées d'une éprouvette à une autre par l'ensemble des problèmes rencontrés lors du processus d'élaboration (les conditions de fonctionnement, endommagement lors du découpage,..), la dégradation des propriétés à

## CHAPITRE IV : Procédures Expérimentales et Discussion des Résultats

cause de l'humidité et finalement les problèmes éventuels de la machine d'essai et le traitement des données.

Le comportement de ses éprouvettes se manifeste par une variation linéaire de la force en fonction de déplacement qui correspond au comportement élastique de ce matériau jusqu'à une contrainte maximale, et après il passe à la partie non linéaire associée à l'apparition de la déformation plastique. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (Tableau IV.9) :

**Tableau IV.1** : Résultat des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 2 plis sans couture.

MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/EP_2PS	208,77	241.04	2.65	269.021
V/EP_2PS	222,36	208.85	2,23	287.3405
V/EP_2PS	229,76	103.49	2,70	281.8964
V/EP_2PS	237,77	225.09	2,33	285,510049
V/EP_2PS	227,93	138.77	2,42	304,730669
MOYENNE	225,318±10,77	183,45±50,34	2,47±0.20	285,69±12.82

**Tableau IV.2** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 3 sans couture.

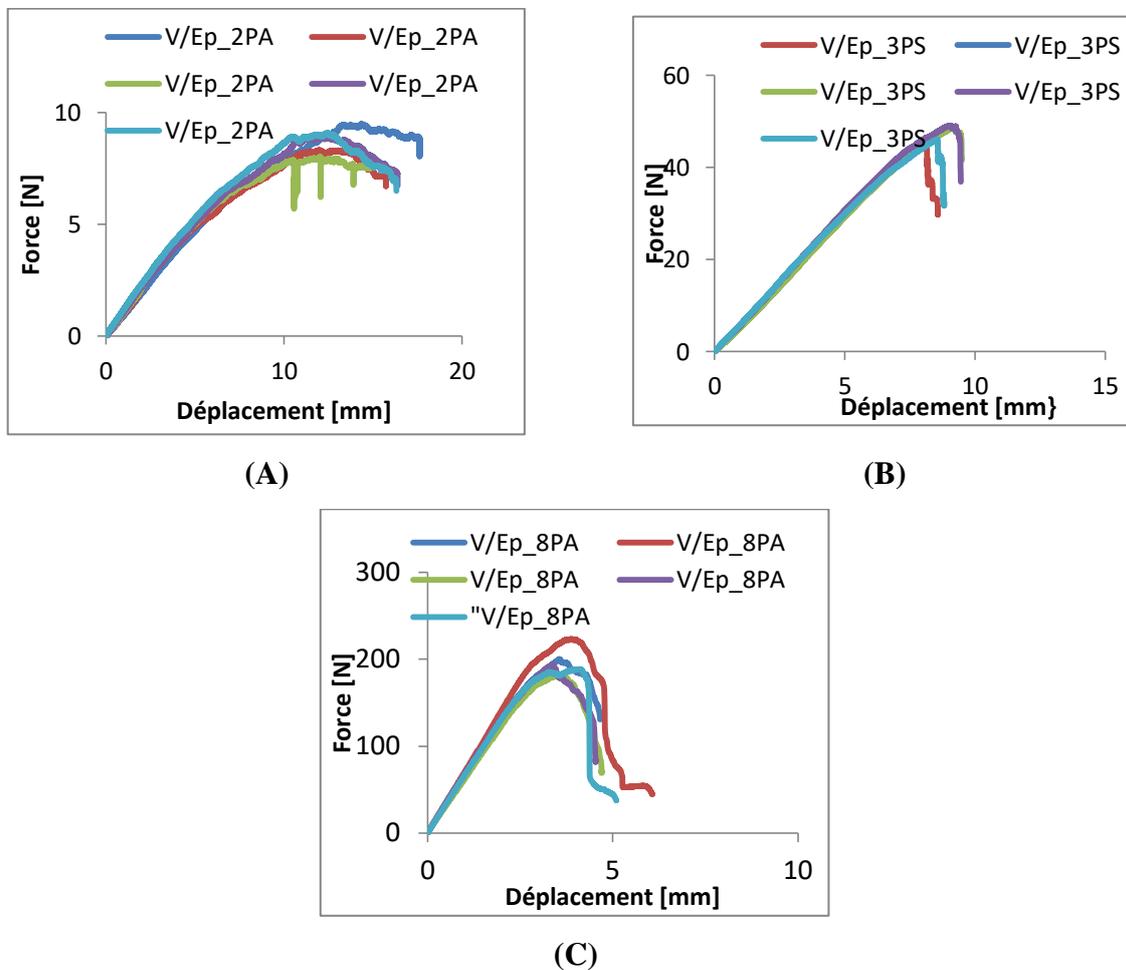
MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/EP_3PS	181,70	207,49	1,77	302,9591
V/EP_3PS	170,11	274,36	1,98	319,52288
V/EP_3PS	174,04	277,47	1,96	323,1498
V/EP_3PS	199,8	255,59	1,91	340,18965
V/EP_3PS	189,86	214,11	1,82	303,08758
MOYENNE	183,10±12,01	245,80±33,11	1,89±0,09	317,78±15,56

**Tableau IV.3** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 8PA.

MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex,r}$ (MPa)	$\epsilon_r^{flex,r}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex,r}$ (MPa)
V/EP_8PS	193,43	246,87	2,66	420,51
V/EP_8PS	188,5	70,24	2,77	351,16
V/EP_8PS	196,63	93,97	2,23	335,26
V/EP_8PS	197,03	366,12	2,32	371,02
V/EP_8PS	184,57	262,62	2,33	333,38
MOYENNE	192,032±5,39	207,96±123,97	2,46±0,233	362,27±35,90

**IV.4.1.2.Flexion Verre/Epoxy [2, 3, 8] plis sans couture.**

La figure IV.6 représente l'évolution de la force en fonction du déplacement longitudinale pour les éprouvettes en matériaux composites (verre/époxy) avec couture



**Figure IV.6** : Courbe de comportement expérimental force-déplacement en flexion 3 point de stratifiée unidirectionnel. [A] :2 plis avec couture. [B] :3 plis avec couture, [C] : 8plis avec couture.

**Interprétation des résultats**

Les courbes présentent deux parties différentes ; Une partie linéaire caractérisé par un comportement élastique et une deuxième partie non linéaire caractérisé par un comportement plastique jusqu'à une contrainte maximale (la rupture) de chaque éprouvette.

On remarque d'après la Figure IV.6 les courbes ne sont pas identiques d'une façon précise, la différence des caractéristiques mécaniques mesurées d'une éprouvette à une autre est due, d'une part aux raisons des défauts de couture dus au manque de grande précision dans la couture et également pour l'utilisation d'une machine à coudre ordinaire et d'une autre part au processus d'élaboration.

Les caractéristiques mécaniques du matériau composite stratifié des éprouvettes verre/époxy avec couture sont regroupée dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau IV.4** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 2 plis avec couture.

<i>Matériaux</i>	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (mm)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/Ep_2PA	42,877	75,10	3,30	80,984
V/Ep_2PA	30,175	46,22	3,32	53,5609
V/Ep_2PA	31,097	48,55	3,18	51,635
V/Ep_2PA	36,028	48,64	3,34	60,8914
V/Ep_2PA	61,886	63,33	2,82	82,6100
<i>Moyenne</i>	40,4126±13,019	56,37±12,484	3,19±0,2177	65,9364±14,896

**Tableau IV.5** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 3 plis avec couture.

<i>Matériaux</i>	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (mm)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/Ep_3PA	71,926	16,98	4,59	84,74414
V/Ep_3PA	68,35	18,50	4,29	92,33184
V/Ep_3PA	52,972	16,47	4,11	82,1644
V/Ep_3PA	57,985	18,56	3,60	92,33323

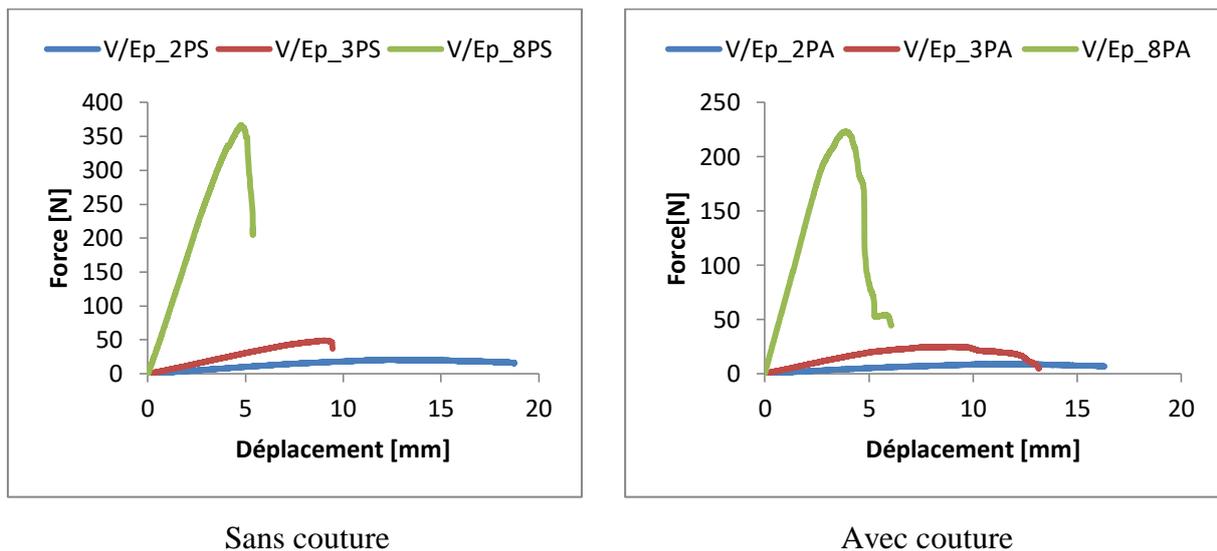
## CHAPITRE IV : Procédures Expérimentales et Discussion des Résultats

V/Ep_3PA	58,197	17,64	3,39	88,15755
Moyenne	61,88±7,91	17,63±0,92	4,00±0,49	87,94±4,53

**Tableau IV.6** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion d'éprouvettes 8 plis avec couture.

MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$\epsilon_r^{flex}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)
V/EP_8PA	180,1	167,03	2,19	252,19
V/EP_8PA	140,8	45,96	3,09	229,5897
V/EP_8PA	130,9	78,19	2,40	198,6262
V/EP_8PA	164,29	99,93	2,22	228,2912
V/EP_8PA	132,85	39,13	2,64	195,5932
MOYENNE	149,78±21,52	86,05±51,53	2,51±0,37	220,85±23,69

### IV.4.1.3. Comparaison des résultats de flexion appliquée sur les éprouvettes :



**Figure IV.7** : comparaison contrainte-déformation obtenues lors d'essais de flexion pour des éprouvettes couturé et non couturé.

## CHAPITRE IV : Procédures Expérimentales et Discussion des Résultats

Les deux graphes présentent l'évolution de la force en fonction de le déplacement éprouvettes verre/époxy de différentes plis (2 jusqu'à 8 plis) couturé et non couturé.

On note la présence d'une partie linéaire qui représente le comportement élastique du matériau élaboré et une partie non linéaire qui représente le comportement plastique du matériau dans les deux cas ou les éprouvettes sont couturées et non couturé.

Pour le 1<sup>er</sup> cas (éprouvettes non couturé) la valeur maximale obtenue de la contrainte ne dépasse pas 420,51 MPA et le déplacement est inférieure à 2,77 mm (les caractéristiques mécaniques d'éprouvette qui contient 8 plis sont les plus logique).

Pour le 2<sup>eme</sup> cas (éprouvettes couturé) la valeur maximale obtenue de la contrainte ne dépasse pas la valeur 252,19 MPA et le déplacement est inférieure à 4,59 mm (l'éprouvette qui contient 8 plis présentent des meilleures résultats).

On observe les valeurs mesurées de la contrainte à la rupture des éprouvettes non couturé sont supérieures à celles qui contient de la couture à l'intérieure.

Les tableaux ci-dessous rassemblent les résultats d'essai de traction pour les éprouvettes cousu et non cousu :

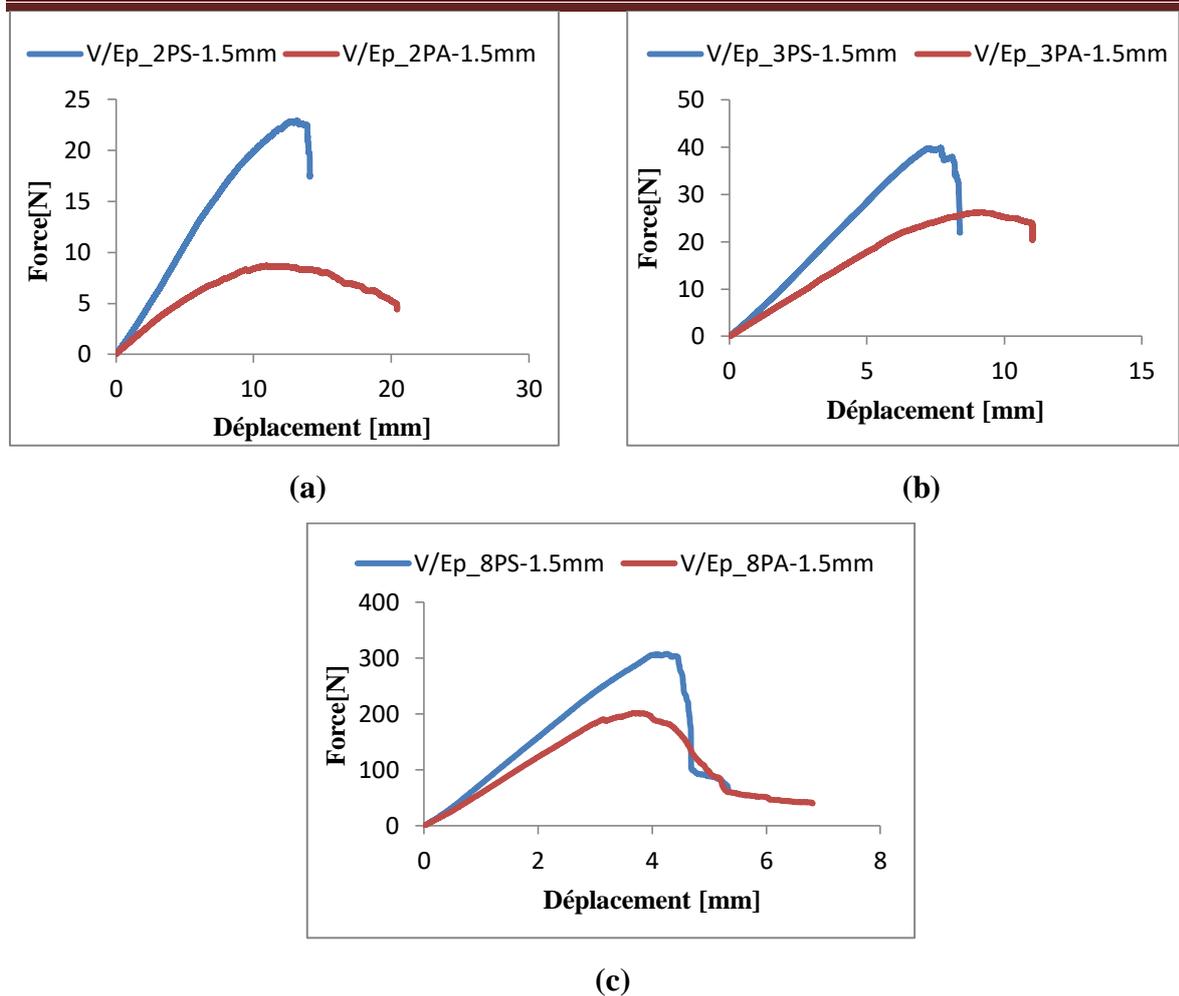
**Tableau IV.7** : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais de flexion sur les éprouvettes verre/époxy sans couture.

MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/EP_2PS	208,77	241.04	2.65	269.021
V/EP_3PS	199,8	255,59	1,91	340,18965
V/EP_8PS	193,43	246,87	2,66	420,51

**Tableau IV.8** : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais de flexion sur les éprouvettes verre/époxy avec couture.

MATERIAUX	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPA)	$\epsilon_r^{flex_r}$ (MM)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPA)
V/EP_2PA	61,886	63,33	2,82	82,6100
V/EP_3PA	57,985	18,56	3,60	92,33323
V/EP_8PA	3,09	45,96	140,8	229,589712

### V.4.1.4.Flexion verre/époxy [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 1.5 mm



**Figure IV.8:** Réponses Force-Déplacement pour des éprouvettes stratifiées unidirectionnelles sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec  $L = 90\text{mm}$  (a) 2 Plis sans et avec couture, (b) 3 plis sans et avec couture, (c) 8 plis sans et avec couture.

### Interprétation des résultats

Les courbes varient en premier lieu d'une manière linéaire (comportement élastique) jusqu'à une valeur avoisinante avant de changer l'allure (comportement plastique) jusqu'à une déformation totale des éprouvettes.

Nous avons remarqué que la force augmente par rapport au nombre des plis au contraire de déplacement qu'il diminue lorsque on ajoute des plis.

Dans le cas de stratifiés couturés on remarque que de le module d'élasticité augmente.

- Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants:

**Tableau IV.9 :** Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture

## CHAPITRE IV : Procédures Expérimentales et Discussion des Résultats

MATERIAU	$\varepsilon_r^{\text{flex}_r}$ (%)	$\sigma_r^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$E_{11}^{\text{flex}}$ (GPA)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$K_{II}^{\text{flex}}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_2PS-1.5MM	1.96	258.79	202.9	336.22	0.0145
V/EP_2PA-1.5MM	4.61	25.23	27.64	46.04	0.0247

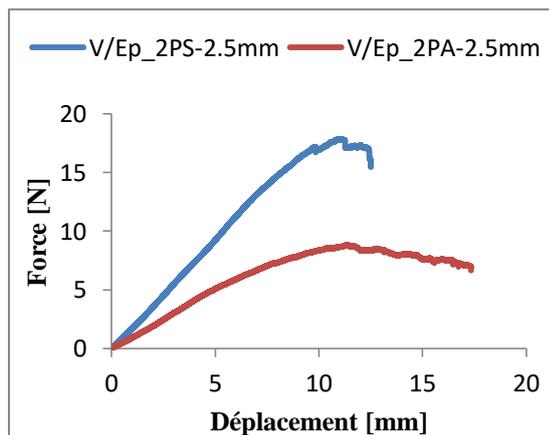
**Tableau IV.10** : Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\varepsilon_r^{\text{flex}_r}$ (%)	$\sigma_r^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$E_{11}^{\text{flex}}$ (GPA)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$K_{II}^{\text{flex}}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_3PS-1.5MM	1.75	76.35	86.16	137.5	0.0416
V/EP_3PA-1.5MM	3.12	88.01	47.26	97.06	0.0018

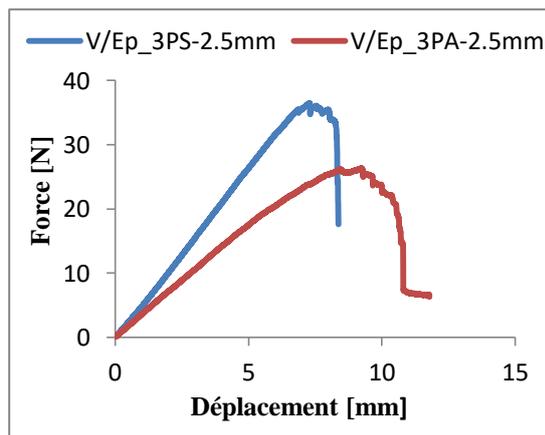
**Tableau IV.11**: Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\varepsilon_r^{\text{flex}_r}$ (%)	$\sigma_r^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$E_{11}^{\text{flex}}$ (GPA)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{flex}_r}$ (MPA)	$K_{II}^{\text{flex}}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_8PS-1,5MM	2.68	67.93	141.4	341.19	0.0069
V/EP_8PA-1,5MM	3.55	41.54	103.5	206.93	0.0019

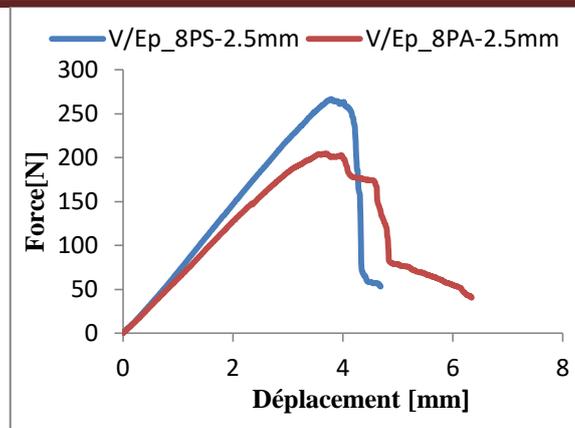
### IV.4.1.5. Flexion unidirectionnel [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 2.5 mm



(a)



(b)



(c)

**Figure IV.9 :** Réponses Force-Déplacement d'un essai de flexion 3 points pour des éprouvettes stratifiées unidirectionnelles sans et avec couture soumises à  $L = 90\text{mm}$  (a) 2 Plis sans et avec fissure, (b) : 3 Plis sans et avec fissure, (c) : 8 Plis sans et avec couture

**Interprétation des résultats**

D'après les courbes on constate que la contrainte maximale augmente lorsque on ajoute des plis couturés, par contre dans le cas où les éprouvettes ne contiennent pas de fil de pêche à l'intérieure, elle diminue lorsque on utilise quelques plis mais elle à augmenter aussi à cause de glissement dans le cas de 8 plis, et pour le module d'élasticité il diminue lorsque on ajoute des plis non couturés.

Nous constatons que le comportement de ses éprouvettes caractérise par un domaine élastique où la force augmente avec l'accroissement du déplacement. Et un domaine non linéaire plastique représentée par une grande propagation des fissures avec un chargement à une valeur presque constante jusqu'à la rupture.

- Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.12 :** Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{\text{flex}_r}$ (%)	$\sigma_r^{\text{flex}_r}$ (MPa)	$E_{11}^{\text{flex}}$ (GPa)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{flex}_r}$ (MPa)	$K_{II}^{\text{flex}}$ $\text{MPa}\sqrt{m}$
V/EP_2PS-2.5MM	1.71	242.82	193.3	271.98	1.022
V/EP_2PA2.5MM	3.66	43.05	28.61	57.2	0.11

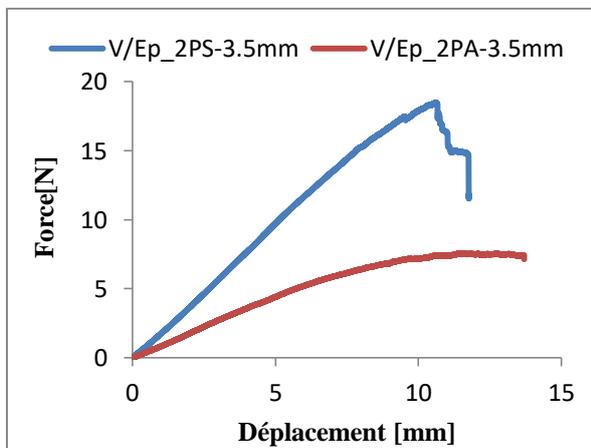
**Tableau IV.13** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 3 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex_r}$ (%)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_3PS-2.5MM	1.71	124.46	165	250.97	0.56
V/EP_3PA-2.5MM	2.37	43.92	142.8	184	0.49

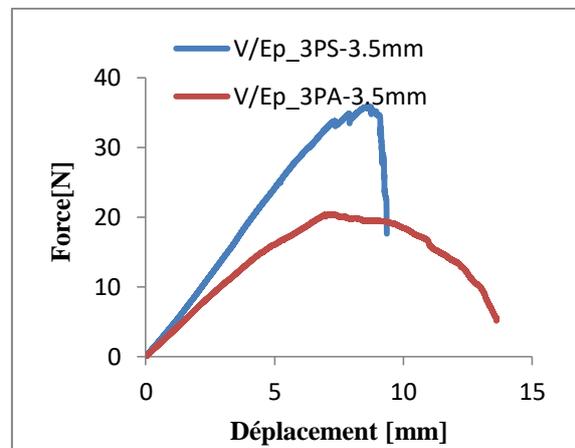
**Tableau IV.14** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 8 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex_r}$ (%)	$\sigma_r^{flex_r}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex_r}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_8PS-2.5MM	2.33	59.12	151	295.6	0.1867
V/EP_8PA-2.5MM	3.3	39.71	116.7	199.32	0.1287

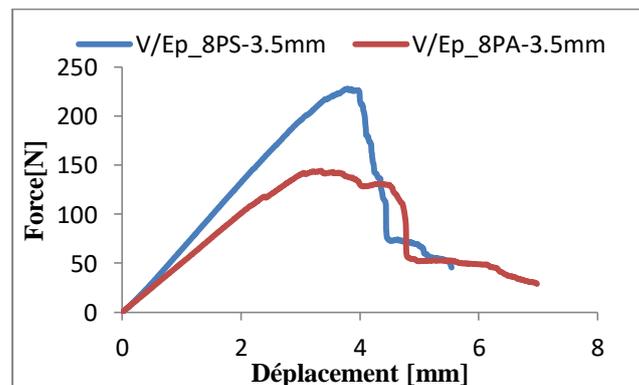
**IV.4.1.6. Flexion unidirectionnel [2, 3, 8] plis sans et avec couture avec une entaille de 3.5 mm**



(a)



(b)



(c)

**Figure IV.10** Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifié

Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec L=90 mm

(a) 2 Plis sans et avec couture : (b) : 3 Plis sans et avec couture : (c) : 8 Plis sans et avec couture

**Interprétation des résultats**

L'allure de cette courbe est linéaire (comportement élastique) avant de se courber au voisinage avant le point de déformation et entrer dans la partie non linéaire (comportement plastique) jusqu'à la rupture.

Cette non-linéarité due principalement, à l'existence d'une déformation plastique à l'extérieur de la fissure Ce qui fait pour le matériau à une propagation lente de la fissure.

➤ Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.15** : Résultats des caractéristiques mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPA)	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_m^{flex}$ (MPA)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_2PS-3.5MM	1.64	174.49	187	272.05	0.1339
V/EP_2PA-3.5MM	2.86	49.75	27.303	50.92	0.338

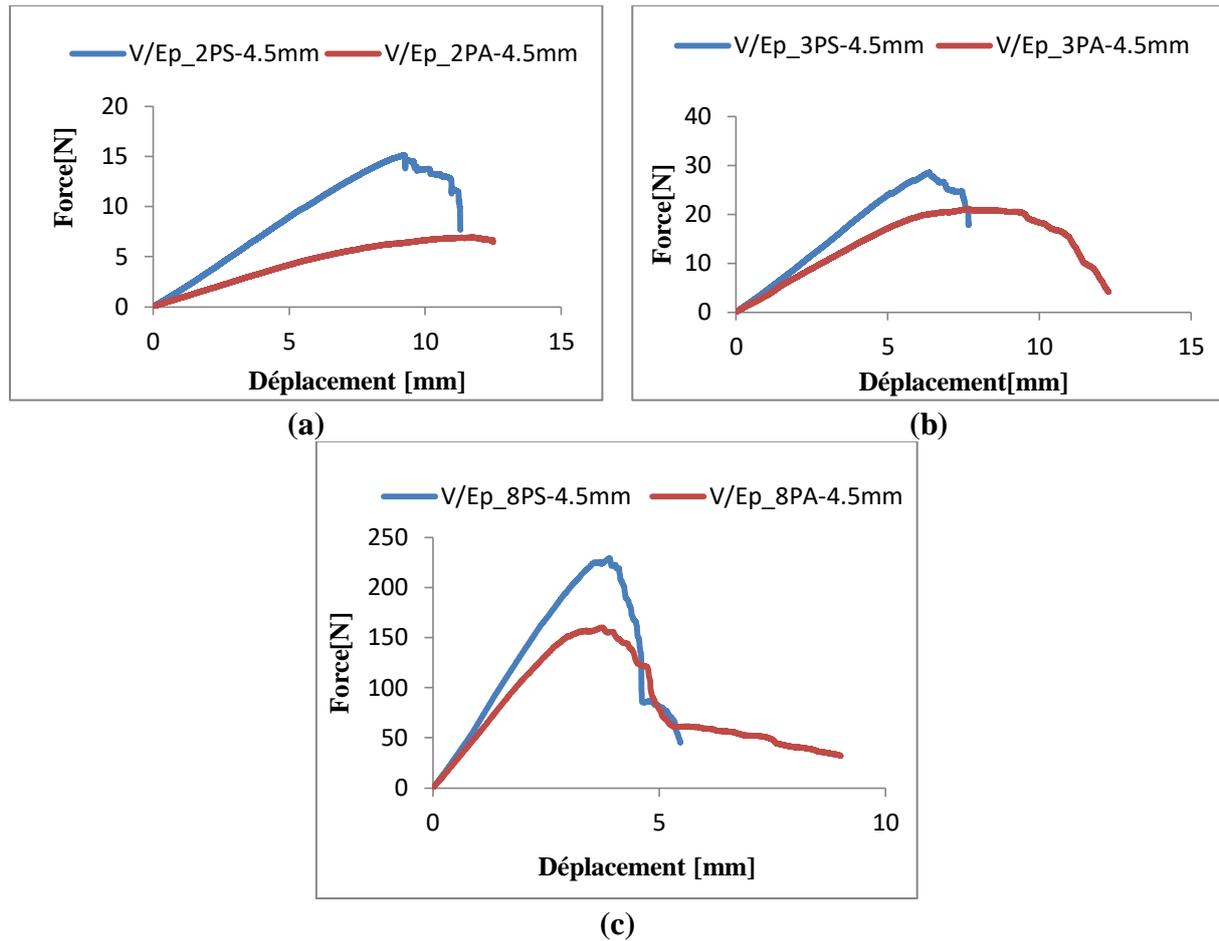
**Tableau IV.16** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 3 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPA)	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPA)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_3PS-3.5MM	1.91	123.71	148.54	246.5	0.0397
V/EP_3PA-3.5MM	3.69	20.27	49.48	80.06	0.0166

**Tableau IV.17**: Résultats des caractéristique mécanique en flexion 8 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPA)	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPA)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_8PS-3.5MM	2.73	52.24	149.07	261.38	0.0047
V/EP_8PA-3.5MM	3.63	29.38	98.23	146.67	0.0035

**IV.4.1.7. Flexion unidirectionnel [2.3.8] plis avec et sans couture avec une fissure de 4.5 mm**



**Figure IV.11:** Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifiées unidirectionnelles sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec  $L = 90$  mm. (a) 2 Plis sans et avec couture ; (b) 3 Plis sans et avec couture ; (c) 8 Plis sans et avec couture.

**Interprétation des résultats**

Dans cette expérience nous avons remarqué que l'augmentation de la couture entraîne une diminution de la pente des courbes et par conséquent le module d'Young. Ceci explique la grande différence dans les résultats obtenus.

- Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.18** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 2 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_2PS-4,5MM	1.60	108.62	165.5	213.29	0.153
V/EP_2PA-4.5MM	2.4	50.37	34.74	54.34	0.061

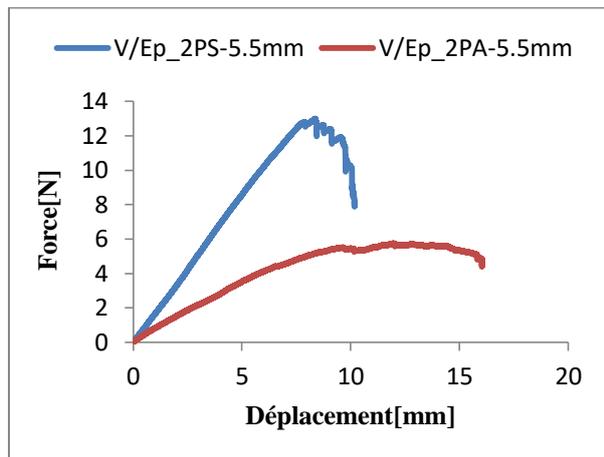
**Tableau IV.19** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 3 plis sans et avec couture.

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_3PS-4.5MM	1.56	123.06	147	193.39	0.053
V/EP_3PS-4.5MM	3.36	31.90	91.74	159.71	0.022

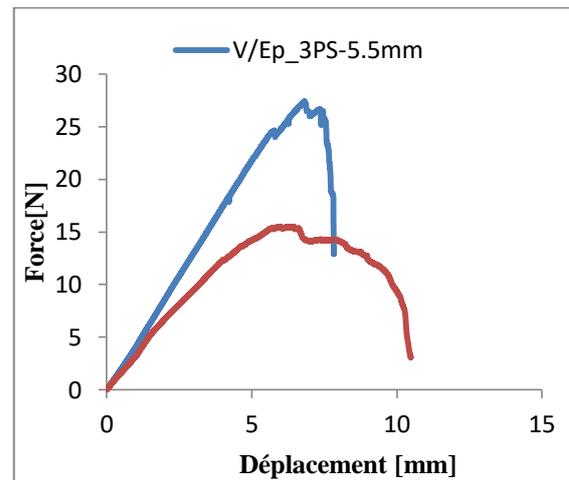
**Tableau IV.20** : Résultats des caractéristique mécanique en flexion 8 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_8PS-4.5MM	2.69	52.83	149.9	263.92	0.0055
V/EP_8PS-4.5MM	4.54	34.58	116.9	172.56	0.0046

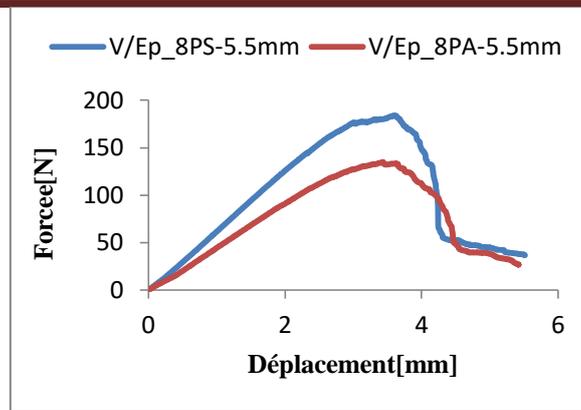
**IV.4.1.8.Flexion unidirectionnel [2.3.8] plis avec et sans couture avec une fissure de 5.5 mm**



(a)



(b)



(c)

**Figure IV.12.** Réponses Force-Déplacement pour deux éprouvettes stratifié Unidirectionnelle sans et avec couture soumises à un essai de flexion 3 points avec  $L= 90$  mm  
 (a) : 2 Plis sans et avec couture ; (b) : 3 Plis sans et avec couture ; (c) : 8Plis sans et avec couture.

**Interprétation des résultats**

Les courbes sont divisées en deux parties comme dit précédemment, une partie linéaire et une autre non linéaire.

Nous avons remarqué que les éprouvettes de 8 plis sans plus résistant par rapport les autres éprouvettes grâce à ses formes.

Y'a un décalage de la pente entre les deux différentes courbes à cause d'utilisation de la couture.

- Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.21 :** Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 2 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_2PS-5.5MM	1.44	113.8	161.6	180.99	0.18
V/EP_2PA-5.5MM	3.08	38.64	32.461	46.04	0.07

**Tableau IV.22 :** Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 3 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPa)	$E_{11}^{flex}$ (GPa)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPa)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_3PS-5.5MM	1.60	91.27	138.45	184.71	0.06
V/EP_3PA-5.5MM	2.59	14.87	60.476	74.18	0.03

**Tableau IV.23 :** Résultats des caractéristique mécaniques en flexion 8 plis sans et avec couture

MATERIAU	$\epsilon_r^{flex}$ (%)	$\sigma_r^{flex}$ (MPA)	$E_{11}^{flex}$ (GPA)	$\sigma_{max}^{flex}$ (MPA)	$K_{II}^{flex}$ $MPa\sqrt{m}$
V/EP_8PS-5.5MM	2.74	41.12	138.14	205.47	0.0058
V/EP_8PA-5.5MM	2.85	27.75	84.488	138.71	0.0048

#### IV.5.Conclusion :

Cette partie aborde le comportement du matériau étudié sous chargement statique.

Les essais de flexion statiques montrent que les graphes présentent l'évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes verre/epoxy de différents plis (2,3 et 8) couturé et non couturé.

Les résultats montrent que toutes les stratifiés présentent un comportement de type élastique fragile par une partie linéaire jusqu'à une valeur spécifique nommé la contrainte maximale suit par un comportement plastique par une partie non-linéaire jusqu'à la déformation totale.

On constate que le placement de deux lignes de couture dans les directions 1 et 2 au lieu d'une ligne suivant la direction 1 ou bien 2 joue un rôle important dans l'évolution du module d'Young et la contrainte maximale.

Il y'a une relation inverse à chaque fois qu'on ajoute les plis la force augmente et cela conduit à un déficit de déplacement.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Les matériaux composites c'est l'assemblage de deux matériaux ou plus de nature différente. Elle constitué d'un renfort qui supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué aux matériaux composites, ainsi, il augmente les propriétés mécaniques pour eux, et la matrice qui lier les renforts entre eux, les protégés des milieux extérieure et repartir la charge mécanique appliqué.

L'objectif fixé pour ce travail est la caractérisation d'un matériau composite stratifié en verre/ epoxy préparé par le procédé moulage sous vide et utilisé dans la fabrication des avions (pêche et plaisance). Cette caractérisation a pris en compte l'influence de la séquence de stratification et du mode d'élaboration (taux de catalyseur et température d'élaboration).par une essai de flexion3 points pour caractérisé les proprietes mecaniques de ce materiaux

Les courbes de comportements mécaniques expérimentales obtenues sont linéaires (élastiques), et non linéaire (plastique), avec des pentes différentes dénotant une variation légère des modules d'élasticité à la traction des éprouvettes testées. Une dispersion des résultats a été observée pour les valeurs des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en flexion. Elle est liée principalement au mode de mise en œuvre des stratifiés, au nombre des plis des stratifiés, ainsi au couture des stratifiés.

Les résultats obtenus vérifient bien que les éprouvettes qui contient de fil de pêche à l'intérieure avec une fissure, ont une rigidité inférieure à celles d'éprouvettes non cousu.

Finalement, nous souhaitons que ce mémoire puisse servir comme outil de travail pour les étudiants concernés, et qu'il sera amélioré et complété pour rendre son utilité plus complète.

### **Références bibliographique**

- [1] DJABLOUN YOUCEF. Chapitre composites..
- [2] Abdallah MIR. Étude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy. Thèse de doctorat. UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES .Algérie 2010
- [3] LAURANT GORNET (Généralité sur les matériaux composites).
- [4] DJEBLOUN TOUCEF. Chapitre composites.
- [5] CHOUAIB. Aribi, Etude comparative du comportement des différents matériaux composites (différents matrices). Mémoire de magistère, université de M'HAMED Bouguera, Boumerdes. Algerie2011.
- [6] P.Calin GEORGEL, Résine époxyde renforcée avec des fibre naturelles, thèse de matrice de recherche, université Laval QUEBEC, 2009
- [7] ENSTAB. Chapitre 4 matériaux composites
- [8] Berthelot J.M Matériaux Composites. Comportement mécanique et analyse des structures 4<sup>ème</sup> édition 2005 .Ed. Lavoisier. ISBN 2-7430-0771-0
- [9] A. R. Blythe, Electrical resistivity measurements of polymer materials, Poly Test, 4195-209, 1984
- [10] Jean marie BERTHELOT, Mécaniques Des Matériaux et Structure Composites : Novembre 2010
- [11] M.MENAIL : Coure Master 2: Mise en forme des composites thermodurcissables: Université Badji MokhtarAnnaba: 2015-2016
- [12] [www.compositec.com/compositec-promotion](http://www.compositec.com/compositec-promotion)
- [13] Claude BARTHIAS et COLL : Livre : Matériaux composites 2 éme édition
- [14] Laurent GORNET: Généralités sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 2008
- [15] M.MENAIL: Coure Master 2: Constitution d'un matériau composite: Université Badji Mokhtar Annaba: 2015-2016

## Références bibliographique

---

[16] Abderrahim ZEGHLOUL : Concept Fondamentaux De La Mécanique De La Rupture : 2016-2017

[17] Mécanique de la rupture : 6 octobre 2010

[18] Dr H. MECHAKRA : Matériaux composite cours et exercices résolus N° : 37/01/01 : Mai 2018

[19] Y. Wang, J.G. Williams, corrections pour les échantillons de ténacité à la rupture du mode II matériaux composites, Compos. Sci. Technol. 43 (1992) 251-256, [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90096-L](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(92)90096-L).

[20] A. Arrese, N. Carbajal, G. Vargas, F. Mujika, Une nouvelle méthode de détermination du mode II courbe en R par le test de flexion en bout, Eng. Fract. Mech. 77 (2010) 51–70, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.09.008>.