

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

FALI Dawoud & GANA Abdelkadir

Thème

ELABORATION DES COMPOSITES LAMINAIRES

Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom | Grade | Qualité |
|----------------------|-------|-----------|
| MAOSSAI Ahmed Tawfiq | | Président |
| MAKRI Hocine | | Encadreur |
| MAECHTA Ahlem | | Examineur |

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A l'âme pure de mon père, que Dieu lui accorde sa miséricorde

A ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il,

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé,

Je n'oublierai pas d'associer dans mes remerciements mes collègues, les plus chers, et en particulier ABDELKADIR pour leur aide,

Je leur souhaite tout le succès et tout le bonheur à mes amis et mes camarades,

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire jusqu'à l'université.

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

A tous ceux que j'aime.

Dawoud FALI

Dédicaces

A mes chers parents

A ma mère qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

À mon très cher père rabi yarehmou pour son soutien et ses encouragements tout au long de ma vie, Seigneur aie pitié d'eux car ils m'ont élevé quand j'étais jeune,

À mes sœurs,

À mes frères,

À toute ma famille,

À tous mes amis et proches,

À mon binôme Dawoud, pour son esprit calme et sa gentillesse,

...Abdelkadir

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Merci ma chère famille, ma source d'énergie dans la vie, le fondement de ma réussite et mon soutien en tout temps.

Merci, au Dr MAKRI Hocine, qui a supervisé ce travail, pour sa disponibilité, ainsi que son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également "M. BAALI Ibrahim et BAALI Abdelwahab", le directeur de Maghreb Pipe Industry, et aussi au personnel de l'entreprise, qui nous ont aidé pendant mon stage et nous ont fourni tous les besoins au niveau du laboratoire

Et tous mes amis sont issus des spécialités « Génie des matériaux ».

Et tous mes professeurs du département de génie mécanique qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même en me formant de la meilleure façon possible.

merci

DAWOUD, ABDELKADIR

Résumé: L'objectif de ce travail, c'est l'élaboration d'un matériau composite stratifié laminaire ou multicouches à base de résine Orthophtalic comme matrice et de fibres de verre type-A comme renfort dans les couches multi angles ou de fibre de verre type-E pour les mats pour améliorer le comportement mécanique de ce laminaire à la traction et à la flexion.

Nous avons étudié l'influence de l'orientation des fibres dans le de composites ainsi que l'influence du nombre de plis et la disposition des couches sur le comportement à la traction et à la flexion. A la lumière des résultats obtenus on a constaté qu'il y a une importante influence de l'orientation des fibres et de la disposition de la couche comportant le mat par rapport aux couches multi-angles sur les caractéristiques mécaniques du composite.

Mots clés: composite laminaire; stratifiés multicouches, fibres de verre, résine Orthophtalic.

ABSTRACT: The objective of this work is the elaboration of a laminar or multilayered composite material based on Orthophtalic resin as matrix and type-A glass fibers as reinforcement in the multi-angled layers or type-E glass fibers for the mats to improve the mechanical behavior of this laminar to traction and flexion.

We have studied the influence of the orientation of the fibers in the composites as well as the influence of the number of plies and the arrangement of the layers on the tensile and flexural behavior. In the light of the results obtained, it was found that the orientation of the fibres and the arrangement of the layer containing the mat in relation to the multi-angle layers have an important influence on the mechanical characteristics of the composite.

Key words: laminar composite; multi-layer laminates, fibreglass, Orthophtalic resin.

ملخص : الهدف من هذا العمل هو تطوير مادة مركبة صفيحية ، أي صفائح مركبة متعددة الطبقات يعتمد على راتنج ارتوفتاليك كمصفوفة والتعزيز على شكل ألياف زجاجية نوع أ للطبقات متعددة الزوايا وألياف زجاج صنف e- للحصيرة من أجل تحسين السلوك الميكانيكي لهذه الصفائح في المد والانحناء.

درسنا تأثير زاوية توجيه الالياف في المدة المركبة وكذلك عدد الصفائح وترتيب الطبقات على التصرف في المد والانحناء. في ضوء النتائج المحصل عليها وجدنا ان هناك تأثير لزاوية الاتجاه و ترتيب طبقات اللتي تحتوي على الحصيرة على الخصائص الميكانيكية للمركب.

الكلمات المفتاحية: مركبة صفيحية- متعددة الطبقات صفيحية-الياف زجاجية- راتنج ارتوفتاليك

Table des matières

| | |
|--|----------|
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des symboles | |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I. Généralité sur les matériaux composites | |
| I.1 Introduction | 4 |
| I.2 Historique des composites | 4 |
| I.3 Définition et caractéristiques générales | 5 |
| I.4. Classification des matériaux composites | 7 |
| I.4.1. Selon le renfort | 7 |
| I.4.2. Selon la matrice | 7 |
| I.5. Constituants d'un matériau composite | 8 |
| I.5.1. Le renfort | 8 |
| I.5.1.1 Les fibres végétales | 8 |
| I.5.1.2. Fibres aramide (kevlar) | 9 |
| I.5.1.3. Fibres de carbone | 10 |
| I.5.1.4. Fibres de polyéthylène haute ténacité | 10 |
| I.5.1.5. Fibre de bore | 10 |
| I.5.1.6. Fibre de silice (ou de quartz) | 10 |
| I.5.1.7. Aperçu sur les fibres de verre | 11 |
| a) Fabrication..... | 11 |
| b) Structure..... | 13 |
| c) Propriétés et applications | 14 |
| I.5.1.8. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts | 15 |
| I.5.1.9. Architecture des renforts | 15 |
| a) Les formes unidirectionnel (UD) | 15 |
| b) Les formes bidirectionnel (2D) | 16 |
| c) Forme multidimensionnelle | 18 |
| I.5.1.10. Ensimage | 18 |
| I.5.2. Matrice | 18 |
| I.5.2.1 La matrice organique | 19 |
| a) Les résines thermoplastiques | 19 |
| b) Résines thermodurcissables | 19 |
| c) Résines thermostables | 20 |
| I.5.2.2 La matrice minérale | 20 |
| a) la matrice céramique | 20 |
| b) la matrice métallique | 20 |
| I.5.3. Les charges et les additifs | 20 |
| I.5.3.1. Les charges | 20 |
| I.5.3.2. Les additifs..... | 21 |
| I.5.4 L'interface fibre/matrice et l'adhésion mécanique | 21 |
| I.6. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites | 22 |
| I.6.1. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés | 22 |
| I.6.1.1. Fissuration matricielle | 23 |
| I.6.1.2. Décohésion fibre/matrice | 23 |
| I.6.1.3. Rupture de fibre | 24 |
| I.6.1.4. Délaminage | 24 |
| I.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites | 25 |
| I.7.1. Les avantages | 25 |

| | |
|--|----|
| I.7.2. Inconvénients | 25 |
| I.8. Domaines d'utilisation des matériaux composites | 25 |
| I.9. Conclusion | 26 |

Chapitre II. Les Laminaires

| | |
|---|----|
| II .1 Introduction | 28 |
| II .2 Processus de fabrication | 29 |
| II.2.1 Processus de mise en place des mains | 29 |
| II.3 Architecture des matériaux composites..... | 31 |
| II.3.1 Monocouches..... | 31 |
| II.3.2 Stratifiés..... | 31 |
| a) Equilibré | 31 |
| b) Symétrique | 31 |
| c) Antisymétrique..... | 31 |
| d) Croisé | 31 |
| e) Hybride | 31 |
| II.3.3 Les matériaux Sandwich..... | 32 |
| II.4 Comportement mécanique des matériaux composites stratifiés | 33 |
| II.5 Définition d'une plaque..... | 33 |
| II.6 : Lay-up classique..... | 34 |

CHAPITRE III-Technique expérimentales

| | |
|---|----|
| III .1. Introduction | 37 |
| III.2. Matériaux utilisés | 37 |
| III.2.1. La matrice | 37 |
| III.2.1.1. Caractéristiques mécaniques et avantages de la matrice | 38 |
| III.2.2. Le renfort | 39 |
| III.3. Procédé de fabrication des plaques stratifiées | 39 |
| III.4. Préparation des éprouvettes | 40 |
| a) Découpage des échantillons | 41 |
| b) Polissage : | 41 |
| III.5. Détermination du taux de fibres..... | 42 |
| III.5.1. Matériel utilisé | 42 |
| III.5.2. Déroulement de l'essai de calcination..... | 43 |
| III.5.2.1 Mesure du taux de verre | 43 |
| III.6. Les essais mécaniques | 43 |
| III.6.1 Essais de traction | 43 |
| III.6.1.1 Principe d'essai | 43 |
| III.6.1.2 La machine de traction | 43 |
| III.6.1.3 Les Forme géométriques de l'éprouvette | 45 |
| III.6.2 Essai de flexion 3 points..... | 47 |
| III.6.2.1 Principe d'essai | 47 |
| III.6.2.2 Mécanisme de rupture | 47 |
| III.6.2.3 Les Forme géométriques de l'éprouvette..... | 48 |

CHAPITRE IV-résultats et discussions

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction..... | 52 |
| IV.2. Détermination du taux de fibres | 52 |
| IV.3. Résultats des essais de traction | 52 |
| IV.3.1 Influence de l'orientation des fibres | 52 |
| IV.3.1.1. Composites à 3 plis..... | 53 |
| IV.3.1.2 composites à 6 plis..... | 54 |
| IV.3.2. Influence du nombre de plis | 57 |
| IV.3.3 influence de la disposition des couches | 58 |
| IV.3.3.1. Influence du nombre de plis | 59 |

| | |
|--|-----------|
| IV.4. Résultats des essais de flexion | 60 |
| IV.4.1 Influence de l'orientation des fibres | 60 |
| IV.3.2 Résultats par rapport l'augmentation du nombre de couches | 62 |
| Conclusion générale | |
| Bibliographie | 64 |

Liste des figures

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figure I.1 | Matériau composite..... | 3 |
| Figure I.2 | Organigramme de la classification des matériaux selon le renfort..... | 4 |
| Figure I.3 | Organigramme des principales familles des matrices. | 4 |
| Figure I.4 | Classification des fibres végétales. | 6 |
| Figure I.5 | Tissu d'aramide. | 6 |
| Figure I.6 | Tissu de carbone. | 7 |
| Figure I.7 | Schéma de fabrication de la fibre de verre. | 8 |
| Figure I.8 | La fibre de verre est disponible sous diverses formes : (a) brin coupé, (b) fil continu, (c) mèche, (d) tissu [avec l'aimable autorisation de Morrison Molded Fiber Glass Company]. | 9 |
| Figure I.9 | Fibres de verre continues (découpées en bobine) obtenues par la technique sol-gel [de Sakka (1985), utilisé avec permission]. | 10 |
| Figure I.10 | : Structure amorphe du verre : (a) une représentation bidimensionnelle du réseau de verre de silice et (b) un réseau modifié qui résulte de l'ajout de Na ₂ O | 11 |
| Figure I.11 | Renfort UD. | 13 |
| Figure I.12 | Renfort 2D. | 13 |
| Figure I.13 | Renfort taffetas. | 13 |
| Figure I.14 | Renfort sergé 2/2. | 13 |
| Figure I.15 | Renfort satin. | 14 |
| Figure I.16 | Tissu mat. | 14 |
| Figure I.17 | Tissu hybrides carbone-aramide. | 14 |
| Figure I.18 | Tissage tridimensionnel (3D). | 15 |
| Figure I.19 | Les types de charges. | 18 |
| Figure I.20 | La formation d'un ancrage mécanique à l'interface. | 19 |
| Figure I.21 | Mécanismes d'endommagement observé dans un composite stratifié. | 20 |
| Figure I.22 | Exemple de fissuration transverse de la matrice d'un stratifié carbone/époxyde. | 20 |
| Figure I.23 | Décohésion fibres matrice. | 21 |
| Figure I.24 | Exemple de traction monotone sur une rupture de la fibre de verre. | 21 |
| Figure I.25 | Délaminage des plis. | 21 |
| Figure I.26 | Exemple d'application composite dans l'aéronautique, transport, naval et industrie...23 | |
| Figure II.1 | Présentation d'un composite laminaire. | 25 |
| Figure II.2 | Mise en place d'un composite à la main. | 27 |
| Figure II.3 | Structure d'un matériau monocouche. | 28 |
| Figure II.4 | Constitution d'un stratifié. | 29 |
| Figure II.5 | Désignation d'un stratifié. | 29 |
| Figure II.6 | Constitution d'un matériau sandwich. | 30 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Figure II.7 | Géométrie d'une plaque. | 30 |
| Figure II.8 | Modules polaires dans la membrane et flexion du stratifié AERO. | 32 |
| Figure III.1 | Préparation de la résine. a) La matrice polymère thermodurcissable en Orthophthalic, b) le catalyseur utilisé - A50. | 34 |
| Figure III.2 | Test de viscosité et de la température de prise. c) viscosimètre Brook FIELD d) thermocouple | 35 |
| Figure III.3 | Les renforts utilisés : a) fibres de verre de type-A , b) fibres de verre de type-E pour mat. | 36 |
| Figure III.4 | Préparation des plaques à base de fibres type-A. | 36 |
| Figure III.5 | Préparation des plaques à base mat (fibres type-E). | 37 |
| Figure III.6 | Résumé des différentes étapes d'élaboration des éprouvettes. | 37 |
| Figure III.7 | Scie à disque de diamant utilisé pour le découpage des éprouvettes. | 38 |
| Figure III.8 | Polissage après découpage des éprouvettes. | 39 |
| Figure III.9 | Echantillon de l'essai de calcination. | 39 |
| Figure III.10 | Matériel utilisé pour l'essai de perte au feu : (a) Creuset, (b) balance de précision, (c) Four a moufle. | 39 |
| Figure III.11 | Machine universelle de type INSTRON 5969. | 41 |
| Figure III.12 | Mode de fixation des éprouvettes de traction entre mors. | 41 |
| Figure III.13 | Les dimensions des éprouvettes. | 42 |
| Figure III.14 | Eprouvettes réalisées pour l'essai de traction. | 42 |
| Figure III.15 | Essai de flexion 3 points. | 44 |
| Figure III.16 | Localisation de la rupture. | 45 |
| Figure III.17 | Les dimensions des éprouvettes de flexion. | 45 |
| Figure III.18 | Eprouvettes réalisées pour l'essai de flexion. | 45 |
| Figure III.19 | Déroulement de l'essai de flexion. | 47 |
| Figure IV.1 | Courbe moyenne en traction de la plaque 2. | 50 |
| Figure IV.2 | Courbe moyenne en traction de la plaque 9. | 50 |
| Figure IV.3 | Courbe moyenne en traction de la plaque 11. | 50 |
| Figure IV.4 | Courbe moyenne en traction de la plaque 12. | 51 |
| Figure IV.5 | Courbe moyenne en traction de la plaque 8. | 51 |
| Figure IV.6 | Courbe moyenne en traction de la plaque 13. | 51 |
| Figure IV.7 | Histogramme des contraintes maximales et module d'young pour (3plis). | 52 |
| Figure IV.8 | Histogramme des contraintes maximales et module d'young pour (6plis). | 53 |
| Figure IV.9 | Courbe moyenne de traction de la plaque 1. | 55 |
| Figure IV.10 | Courbe moyenne de traction de la plaque 5. | 55 |
| Figure IV.11 | Courbe moyenne de traction de la plaque 6. | 55 |
| Figure IV.12 | Courbe moyenne de traction de la plaque 7. | 56 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figure IV.13 | Courbe moyenne en flexion de plaque 1. | 57 |
| Figure IV.14 | Courbe moyenne en flexion de plaque 2. | 57 |
| Figure IV.15 | Courbe moyenne en flexion de plaque 9. | 57 |
| Figure IV.16 | Histogramme des contraintes maximales et module d'Young..... | 58 |
| Figure IV.17 | Courbe moyenne en flexion de plaque 1. | 59 |
| Figure IV.18 | Courbe moyenne en flexion de plaque 5. | 59 |
| Figure IV.19 | Courbe moyenne en flexion de plaque 6. | 59 |
| Figure IV.20 | Courbe moyenne en flexion de plaque 7. | 60 |

Liste des tableaux

| | | |
|----------------------|--|----|
| Tableau I.1 | Exemples de matériaux composites, pris au sens large..... | 2 |
| Tableau I.2 | Compositions chimiques approximatives de certaines fibres de verre (% en poids)... | 8 |
| Tableau I.3 | Propriétés typiques des fibres de verre E. | 12 |
| Tableau I.4 | Caractéristiques moyennes des fibres et renforts..... | 12 |
| Tableau II.1 | Propriétés élastiques comparatives du stratifié AERO et de QIQH en référence... | 32 |
| Tableau III.1 | Caractéristiques de la résine Orthophtalique. | 35 |
| Tableau III.2 | Propriétés de la résine Orthophtalique. | 35 |
| Tableau III.3 | les configurations d'échantillons élaborés. | 38 |
| Tableau III.4 | Dimensions des éprouvettes de traction. | 42 |
| Tableau III.5 | Dimensions des éprouvettes de flexion. | 46 |
| Tableau IV.1 | Taux de fibres pour les composites à 3, 4, 5 et 6 couches. | 49 |
| Tableau IV.2 | Résultats des propriétés mécaniques des 03 plis. | 52 |
| Tableau IV.3 | Résultats des propriétés mécaniques des 06 plis. | 52 |
| Tableau IV.4 | Résultats de traction selon la disposition des couches. | 56 |
| Tableau IV.5 | Résultats des propriétés mécaniques des 03 plis. | 58 |
| Tableau IV.6 | Résultats des propriétés mécaniques. | 60 |

Liste des symboles

ε : déformation (%)

σ : contrainte.

σ_{rup} : contrainte a la rupture.

E: le module de YOUNG.

Em: Module d'élasticité moyenne .

A : masse de l'échantillon avant la calcination en (g).

B : masse des fibres obtenues après calcination en (g).

Mf et Mm : fraction massique de fibre et de résine en (%).

Liste des abréviations

PRFV : plastique renforcé de fibre de verre.

PAN : Polyacrylonitrile.

HR : Fibres haute résistance.

HM : Fibres haut module.

FRP : Le polymère renforcé de fibres.

EP m : épissure moyenne d'éprouvette.

Larg m: largeur moyenne d'éprouvette.

Introduction générale

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre.

Un matériau composite résulte de l'association de deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour tenter d'accroître leurs performances. Les deux constituants du composite sont la matrice et le renfort, qui en se combinant donnent un matériau hétérogène souvent anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés diffèrent suivant les directions. Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple : les matériaux composites sont formés de plusieurs couches de fibres liées par une matrice, qui est souvent une résine polymérique. Cette structure sous forme d'empilement permet de maximiser certaines propriétés mécaniques dans les directions voulues. Ainsi, le ratio rigidité/poids de la structure peut être fortement amélioré si on le compare aux métaux comme l'aluminium ou l'acier, ce qui fait des composites, une classe de matériaux de plus en plus prisée dans le domaine aéronautique grâce à leurs propriétés mécaniques requises, la résistance à la chaleur ou à l'eau, ou même la méthode de mise en œuvre.

Cependant, les stratifiés sont particulièrement sensibles aux chargements, comme les impacts à basse vitesse, qui peuvent créer des dommages internes invisibles à l'œil nu (délaminage, rupture de matrice et de fibres). Beaucoup de travaux de recherche ont été dédiés à l'amélioration des propriétés des composites.

Dans ce mémoire, l'objectif fixé est l'élaboration d'un matériau composite stratifié à plusieurs couches différentes i.e. un composite laminaire multicouches à base de résine Orthophtalic comme matrice et un renfort de fibres de verre type A pour les couches multi angles et fibres de verre E-glass pour le mat. Pour réaliser cet objectif, des plaques en composite de diverses configurations ont été préparés et des échantillons de traction et de flexion ont été obtenus par découpage à l'aide d'une scie à disque de diamant. Des essais mécaniques de traction et de flexion ont été menés. Et les résultats ont été regroupés et traités en vue d'une conclusion.

Le mémoire récapitulatif du travail réalisé dans ce sens est organisé comme suit :

Le chapitre I apporte un aperçu général sur les matériaux composites leur constituants et les différents domaines d'utilisations ; Le chapitre II est consacré aux laminaires ; leur définitions et les processus de fabrication de ces composites

Le chapitre III sera consacré à la description des techniques expérimentales utilisées lors de l'élaboration du matériau multicouches et de la caractérisation par les essais mécaniques de traction et de flexion;

Le chapitre IV est dédié à la présentation des résultats des essais et de leurs interprétations. Nous terminons enfin par une conclusion générale.

Chapitre I.
GENERALITE SUR LES MATERIAUX
COMPOSITES

I.1 Introduction :

Les matériaux ont toujours joué un rôle majeur dans le développement et la croissance de la civilisation humaine. Les matériaux composites ne font pas exception. L'avènement des composites avancés a influencé presque tous les aspects de la vie moderne, des impacts majeurs se font sentir dans tous les secteurs aérospatial, aéronautique, l'automobile, l'industrie des articles de sport, les applications navales, le génie civil, etc.

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci exigent des matériaux performants, plus économiques et durables. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement revoir 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 l'objet de notre mémoire.

I.2 Historique des composites :

L'utilisation de matériaux composites remonte à 2000 avant JC ou même plus tôt. Des preuves de l'utilisation de chars se trouvent dans l'ancien Japon, où les samouraïs utilisaient des couches de métaux pour fabriquer des épées [1], et des briques de boue renforcées de paille en Égypte et en Mésopotamie et de la paille étaient utilisées pour fabriquer des poteries renforcées. Les arcs à poulies étaient utilisés dans l'ancienne Mongolie et ailleurs en Asie.

Le développement de composites modernes de pointe a été fortement influencé par les développements dans les domaines des matières premières. Les fibres de verre ont été produites commercialement pour la première fois dans les années 1930, et à peu près à la même époque, des résines de polyester insaturé ont également été développées et commercialisées. Les premiers bateaux radom ont été construits en plastique renforcé de fibre de verre (PRFV) au début des années 40. Des progrès rapides ont eu lieu dans les années 50 avec l'utilisation croissante du PRFV dans les coques de bateaux, les travaux de coque, les automobiles, les composants électriques, etc. Les produits PRFV ont été les premiers produits composites avancés, et ils dominent encore aujourd'hui le marché des matériaux composites.

La phase suivante de développement des composites a été marquée par le développement de composites hautes performances utilisant des fibres de carbone, de bore et d'aramide. Les fibres de carbone haute performance et les fibres de bore ont été introduites à peu près à la même époque à la fin des années 50 et au début des années 60. Ils ont été suivis par le développement des fibres d'aramide au début des années 1970. Les résines époxy sont disponibles depuis les années 1930, et avec l'avènement de ces fibres hautes performances, l'industrie des composites a reçu un coup de pouce majeur. Le développement de l'industrie des composites a également été fortement poussé par les demandes des secteurs de l'aérospatiale et de la défense pour des structures plus légères et plus efficaces. En outre, les développements technologiques concernant les équipements et machines de traitement tels que les bobineuses de filament, les commandes numériques par ordinateur, les autoclaves, etc. ont été quelques-unes des principales caractéristiques de la croissance des composites. Un autre point à noter est le développement dans le domaine des outils analytiques pour la conception et l'analyse de produits composites.

I.3 Définition et caractéristiques générales :

Une substance composite à l'état le plus général est constituée de plusieurs phases non continues réparties dans une phase continue, la phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le matériau de renforcement ou de renforcement (Fig. 1.1). Dans le cas de plusieurs phases discontinues de nature différente, le composé est dit hybride. La phase non continue est généralement plus dure avec de meilleures propriétés mécaniques que la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le matériau de renforcement ou de renforcement (Fig. 1.1). Une exception importante à ce que nous avons dit plus haut est le cas des polymères modifiés par des élastomères, dans lesquels une matrice polymère rigide est chargée de particules élastiques [2]. Pour ce type de matériau, les propriétés statiques du polymère (module d'Young, contrainte de traction, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'ajout de particules de caoutchouc synthétique, tandis que de nombreuses propriétés d'impact sont améliorées.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leurs interactions, etc.

Tableau.I.1 : Exemples de matériaux composites, pris au sens large [2].

| Type de composite | Constituants | Domaines d'application |
|--|--|---|
| 1. <i>Composites à matrice organique</i> Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés | Résine/charges/fibres cellulose-siques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères | Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples |
| 2. <i>Composites à matrice minérale</i> Béton Composite carbone-carbone Composite céramique | Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques | Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermomécaniques |
| 3. <i>Composites à matrice métallique</i> | Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone | Espace |

| | | |
|---|---|---------------------------|
| <p>4. Sandwiches Peaux Ames</p> | <p>Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.</p> | <p>Domaines multiples</p> |
|---|---|---------------------------|

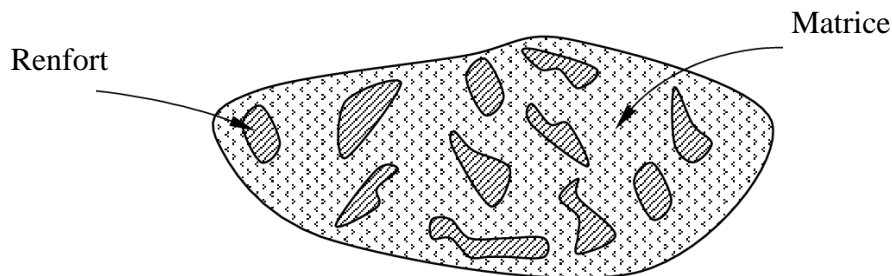


Figure.I.1 : Matériau composite.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie de l'armature est caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration de l'armature, sa disposition (direction), etc. Si tous ces paramètres contribuent à déterminer les propriétés d'un composé, alors les modèles descriptifs ne considéreront que certains paramètres, étant donné la complexité des phénomènes impliqués [2]. Par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approximée soit par des sphères, soit par des cylindres. La concentration du renfort est généralement mesurée par la fraction volumique (fraction volumique) ou la fraction massique (fraction massique). La concentration du renfort est un paramètre spécifique des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la répartition du renfort dans le volume du composé est également une information importante. La répartition uniforme assurera « l'homogénéité » du matériau : les propriétés du composé seront indépendantes. En cas de répartition inégale du renforcement, les ruptures de matériau dans les zones pauvres commenceront à se renforcer, réduisant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas des composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. Cet aspect constitue l'une des propriétés fondamentales des composites : la capacité à contrôler l'anisotropie du produit final grâce à une conception et une fabrication adaptées aux propriétés recherchées.

I.4. Classification des matériaux composites :

Les matériaux composites sont classés généralement selon la nature de ces deux éléments constitutants :

I.4.1. Selon le renfort :

C'est le principal élément constitutif dans le composite. Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté.

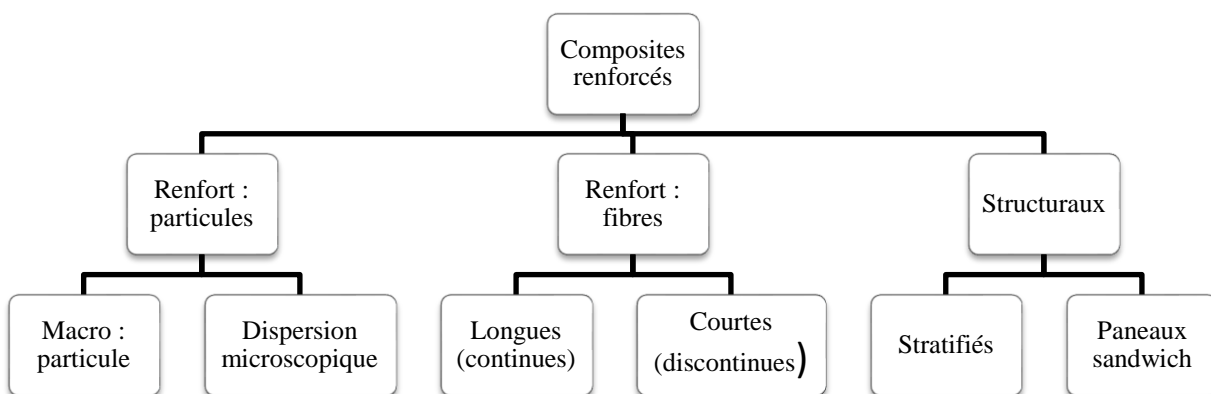


Figure I-2 : Organigramme de la classification des matériaux selon le renfort [3].

I.4.2. Selon la matrice :

Les matériaux composites sont classés en fonction de la nature de la matrice comme suit :

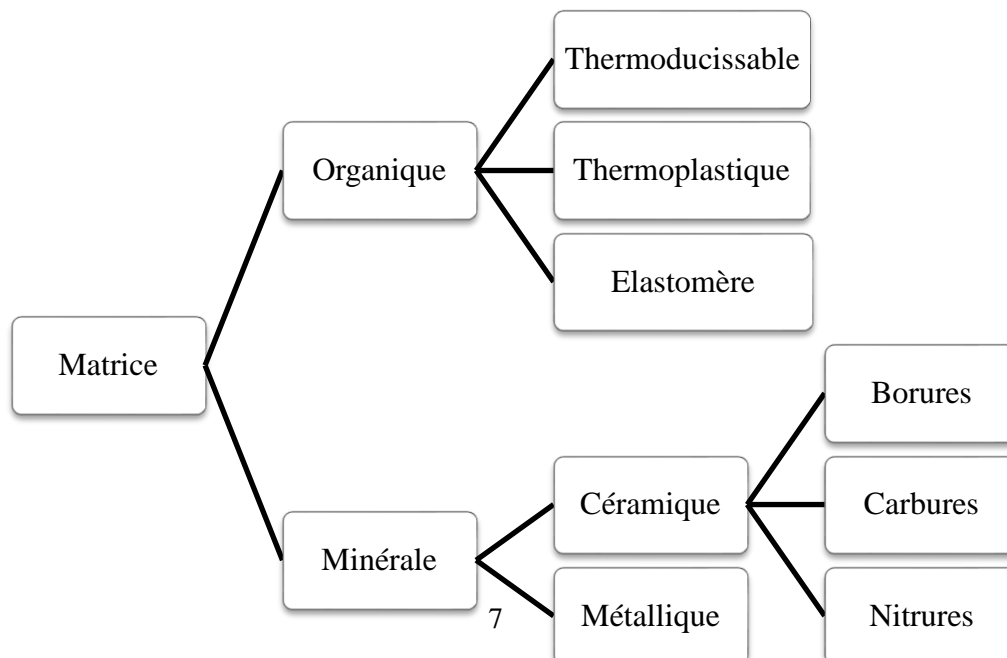


Figure I-3 : Organigramme des principales familles des matrices [3].

I.5. Constituants d'un matériau composite :

Un matériau composite est constitué principalement de :

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

I.5.1. Le renfort :

Comme son nom l'indique, il renforce les qualités mécaniques du composite. Le renfort se présente sous différentes formes. Le plus souvent en forme de fibres.

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 autre forme de matière, surtout en résistance de 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 du matériau, qui engendrent des concentrations de contrainte [5]. Les qualités souhaitées pour un renfort fibreux sont les suivantes :

- Résistance thermique ;
- Compatibilité avec les résines ;
- Bonnes caractéristiques mécaniques ;
- Légèreté. [6]

I.5.1.1 Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, des arbustes et des herbes. Sont susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables à la société.

La fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des filaments végétaux dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale.

Les fibres végétales sont également caractérisées par la diversité de l'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse.

La forme morphologique de la fibre végétale peut également être un facteur important dans la compréhension du transfert de contrainte aux interfaces fibre-matrice [7].

- **Classification des fibres végétales :**

Il existe une grande variété de fibres végétales qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges des matériaux composites. Elles sont classées suivant leur provenance et leur forme (Figure I.4).

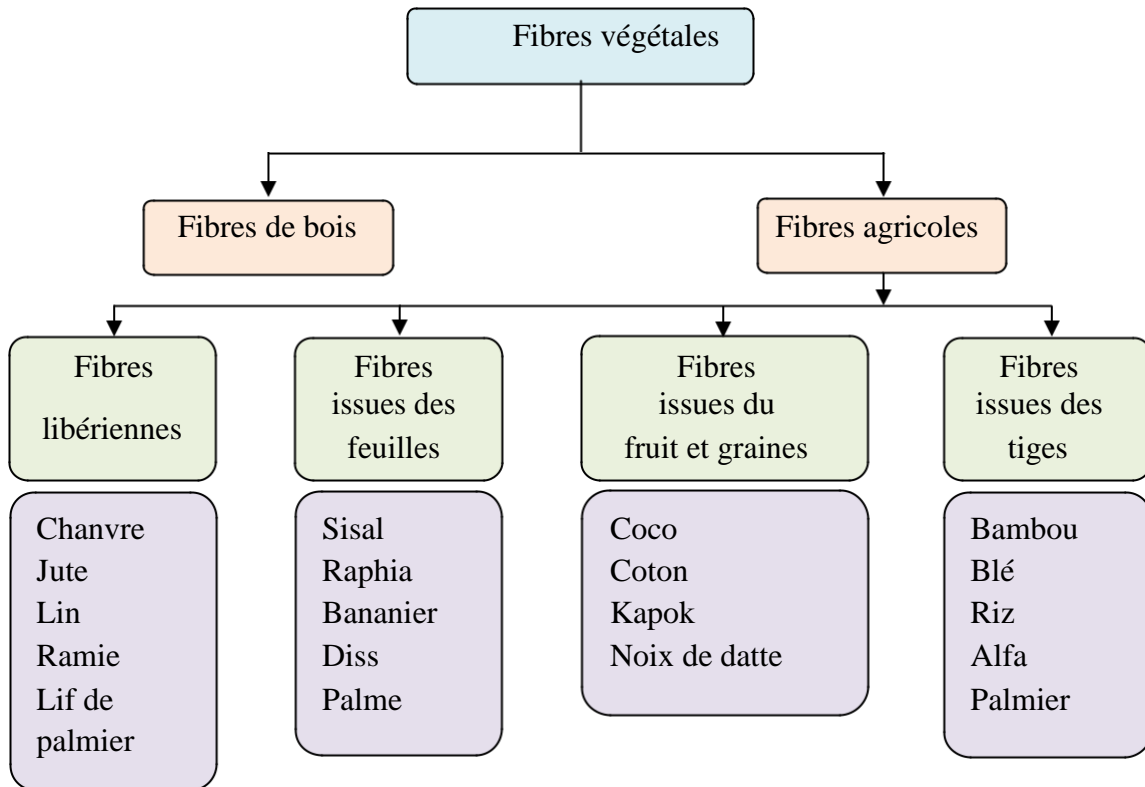


Figure I.4: Classification des fibres végétales [7].

I.5.1.2. Fibres aramide (kevlar) :

Une fibre d'aramide est un composé organique aromatique composé de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Ses avantages sont une faible densité, une résistance élevée à la traction, un faible coût et une résistance élevée aux chocs. Ses inconvénients incluent de faibles propriétés de compression et une dégradation au soleil [8].

Les deux principaux types de fibres d'aramide sont le Kevlar 29® et le Kevlar 49®. Les deux types de fibres de Kevlar ont des résistances spécifiques similaires, mais le Kevlar 49 a une rigidité spécifique plus élevée. Le Kevlar 29 est principalement utilisé dans les gilets pare-balles, les cordes et les câbles. Les applications hautes performances dans l'industrie aéronautique utilisent le Kevlar 49 [8].



Figure I-5 : Tissu d'aramide.

I.5.1.3. Fibres de carbone :

Les fibres de carbone sont principalement utilisées pour les composites « Hautes Performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs. Elles sont obtenues à partir d'une fibre « précurseur » Polyacrylonitrile (PAN). Selon la température de mise en œuvre (carbonisation [1100°C] ou graphitisation [2500°C]) [9], Il existe deux types de fibres [5].

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

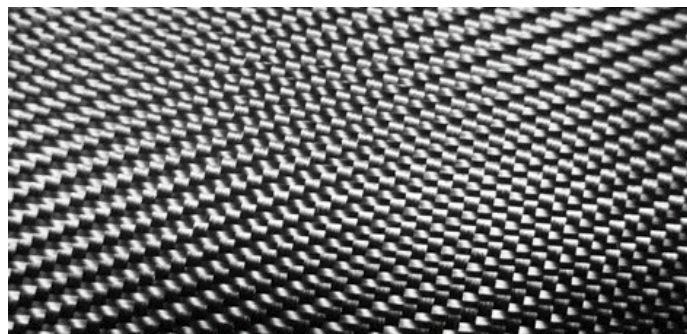


Figure I-6 : Tissu de carbone.

I.5.1.4. Fibres de polyéthylène haute ténacité :

Présentent les avantages suivants :

- Légèreté ($d = 0,95$ à comparer à celle de l'aramide $d = 1,44$) ;
- Haute capacité de conversion de l'énergie cinétique (par exemple celle d'un projectile) en énergie thermique.

Les composites à fibres de polyéthylène restent encore marginaux, malgré leur utilisation dans le domaine de la balistique et du blindage (gilets pare-balles de Arès, plaques de blindage), Leur portée est limitée par leurs principales faiblesses :

- Mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice ;
- Mauvaise résistance à la température (fluage à partir de 90 °C ; l'aramide ne se dégrade qu'à 400 °C) [10].

I.5.1.5. Fibre de bore :

Le bore est dur, fragile, rigide et ne peut pas être étiré. Par conséquent la fabrication des fibres de bore se fait par dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Les fibres de bore possèdent des propriétés élevées en traction mais il faut également noter leurs bonnes propriétés en compression [10].

I.5.1.6. Fibre de silice (ou de quartz) :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [4].

I.5.1.7. Aperçu sur les fibres de verre :

La fibre de verre est un nom générique comme la fibre de carbone ou l'acier. Comme diverses compositions d'alliages d'acier ou d'aluminium sont disponibles, il existe de nombreuses compositions chimiques différentes de fibre de verre qui sont disponibles dans le commerce. Les fibres de verre courantes sont à base de silice (~50-60% SiO₂) et contiennent une gamme d'oxydes de calcium, de bore, de sodium, d'aluminium et de fer, par exemple. Le tableau.I.2 donne les compositions de quelques fibres de verre couramment utilisées. La désignation E signifie électrique car le verre E est un bon isolant électrique en plus d'avoir une bonne résistance et un module de Young raisonnable; C signifie corrosion et le verre C a une meilleure résistance à la corrosion chimique que les autres verres ; S représente la teneur élevée en silice qui permet au verre S de résister à des températures plus élevées que les autres verres.

Il convient de souligner que la plupart de la fibre de verre continue produite est de type verre E mais, malgré la désignation E, les utilisations électriques de la fibre de verre E ne représentent qu'une petite fraction du marché total [11].

Tableau.I.2: Compositions chimiques approximatives de certaines fibres de verre (% en poids)

| Composition | E glass | C glass | S glass |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 55.2 | 65.0 | 65.0 |
| Al ₂ O ₃ | 8.0 | 4.0 | 25.0 |
| CaO | 18.7 | 14.0 | – |
| MgO | 4.6 | 3.0 | 10.0 |
| Na ₂ O | 0.3 | 8.5 | 0.3 |
| K ₂ O | 0.2 | – | – |
| B ₂ O ₃ | 7.3 | 5.0 | – |

a) Fabrication

La figure I-7 montre schématiquement le procédé de fabrication conventionnel des fibres de verre (en particulier les fibres de verre E qui constituent le cheval de bataille de l'industrie du renforcement en résine) (Loewenstein 1983 ; Parkyn 1970 ; Lowrie 1967). Les matières premières sont fondues dans une trémie et le verre en fusion est introduit dans le circuit électrique. [11]

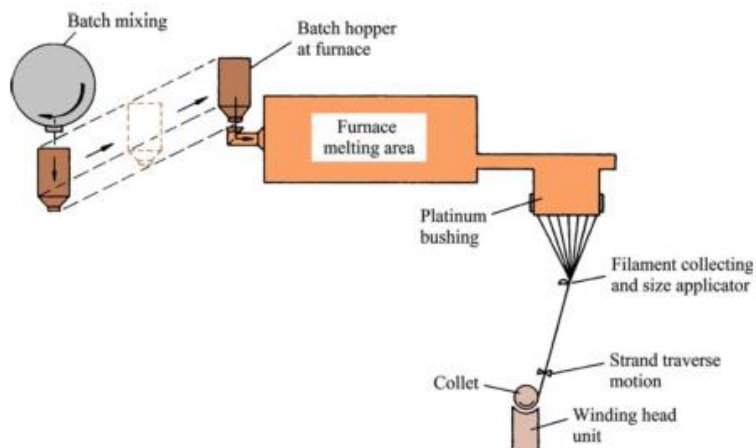


Figure I-7 : Schéma de fabrication de la fibre de verre. [11]

Douilles ou creusets en platine chauffés; chaque douille contient environ 200 trous à sa base [11] . Le verre fondu s'écoule par gravité à travers ces trous, formant de fins filaments continus ; ceux-ci sont rassemblés en un brin et une taille est appliquée avant qu'elle ne soit enroulée sur un tambour. Le diamètre de fibre finale est fonction du diamètre de l'orifice de la douille ; la viscosité, qui est fonction de la composition et de la température ; et la tête de verre dans la trémie. Dans de nombreuses anciennes installations industrielles, les fibres de verre ne sont pas produites directement à partir de verre fondu frais. Au lieu de cela, le verre fondu est d'abord transformé en billes qui, après inspection, sont fondues dans les douilles. Les usines modernes produisent des fibres de verre par étirage direct. La figure I.8 montre quelques formes sous lesquelles la fibre de verre est disponible dans le commerce. [11]

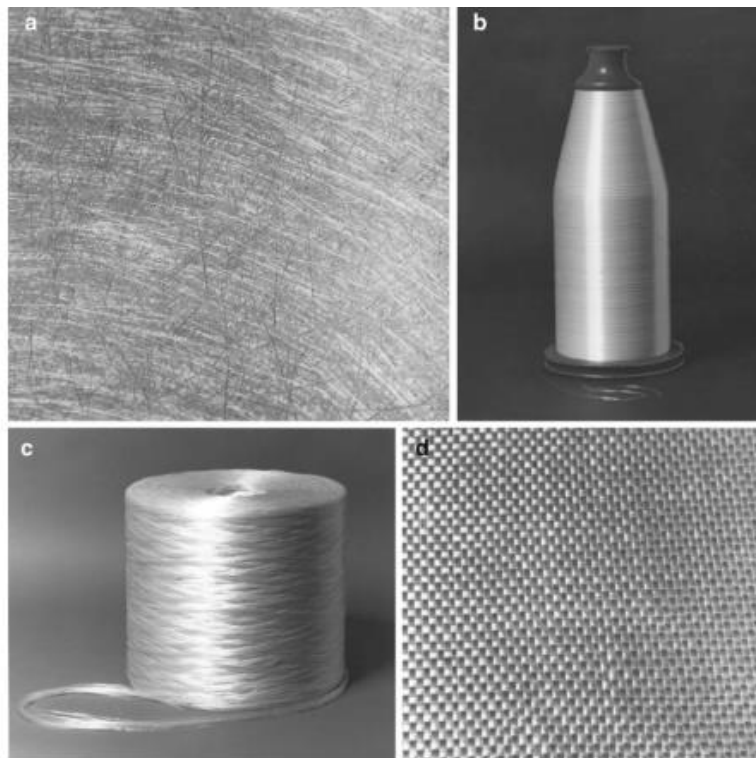


Figure I-8 : La fibre de verre est disponible sous diverses formes : (a) brin coupé, (b) fil continu, (c) mèche, (d) tissu [avec l'aimable autorisation de Morrison Molded Fiber Glass Company]. [11]

Les procédés conventionnels de fabrication de fibres de verre ou de céramique impliquent l'étirage à partir de masses fondues à haute température de compositions appropriées. Cette voie présente de nombreuses difficultés pratiques telles que la température de traitement élevée requise, l'immiscibilité des composants à l'état liquide et la cristallisation aisée lors du refroidissement. Plusieurs techniques ont été développées pour préparer les fibres de verre et de céramique (Chawla 1998). Une technique importante est appelée la technique sol-gel (Brinker et Scherer 1990; Jones 1989). Nous reviendrons sur cette technique sol-gel à divers endroits de ce livre. Ici, nous ne faisons qu'une brève description. [11]

Un sol est une suspension colloïdale dans laquelle les particules individuelles sont si petites (généralement de l'ordre du nm) qu'elles ne présentent aucune sédimentation. Un gel, quant à lui, est une suspension dans laquelle le milieu liquide est devenu suffisamment visqueux pour se comporter

plus ou moins comme un solide. Le processus sol-gel de fabrication d'une fibre implique une transformation de gels fibreux, extraits d'une solution à basse température, en fibres de verre ou de céramique à plusieurs centaines de degrés Celsius. La température de chauffage maximale dans ce procédé est bien inférieure à celle de la fabrication classique de fibres de verre. La méthode sol-gel utilisant des alcoxydes métalliques consiste à préparer une solution homogène appropriée, à changer la solution en sol, à gélifier le sol et à transformer le gel en verre par chauffage. La technique sol-gel est une technique très puissante pour la fabrication de fibres de verre et de céramique. La société 3M produit une série de fibres d'alumine et de silice-alumine, appelées fibres Nextel, à partir de solutions d'alcoxydes métalliques (voir section 2.6). La figure I.9 montre un exemple de fibres de silice étirées (découpées dans une bobine de fibre continue) obtenues par la technique sol-gel (Sakka 1985). [11]



Figure I-9 : Fibres de verre continues (découpées en bobine) obtenues par la technique sol-gel [de Sakka (1985), utilisé avec permission]. [11]

Les filaments de verre sont facilement endommagés par l'introduction de défauts de surface.

Pour minimiser cela et faciliter la manipulation de ces fibres, un traitement d'encollage est réalisé. L'ensimage, ou le revêtement, protège et lie les filaments en un brin.

b) Structure

Les verres inorganiques à base de silice sont analogues aux polymères vitreux organiques en ce qu'ils sont amorphes, c'est-à-dire dépourvus de tout ordre à longue distance caractéristique d'un matériau cristallin. La silice cristalline pure fond à 1800°C. Cependant, en ajoutant quelques oxydes métalliques, on peut rompre les liaisons Si-O et obtenir une série de verres amorphes avec des températures de transition vitreuse assez basses. La figure 2.6a montre un réseau bidimensionnel de verre de silice. Chaque polyèdre est constitué d'atomes d'oxygène liés de manière covalente au silicium. Ce qui arrive à cette structure lorsque Na₂O est ajouté au verre est illustré à la figure I.10. Les ions sodium sont liés ioniquement à l'oxygène mais ils ne rejoignent pas directement le réseau. Trop de Na₂O nuira à la tendance à la formation de structure vitreuse. L'ajout d'autres types d'oxydes métalliques sert à modifier la structure du réseau et la liaison et, par conséquent, les

propriétés. Notez la structure de réseau isotrope et tridimensionnelle du verre; ceci conduit aux propriétés plus ou moins isotropes des fibres de verre. Autrement dit, pour la fibre de verre, le module de Young et les coefficients de dilatation thermique sont les mêmes le long de l'axe de la fibre et perpendiculairement à celui-ci. Ceci est différent de beaucoup d'autres fibres, telles que l'aramide et le carbone, qui sont hautement anisotropes. [11]

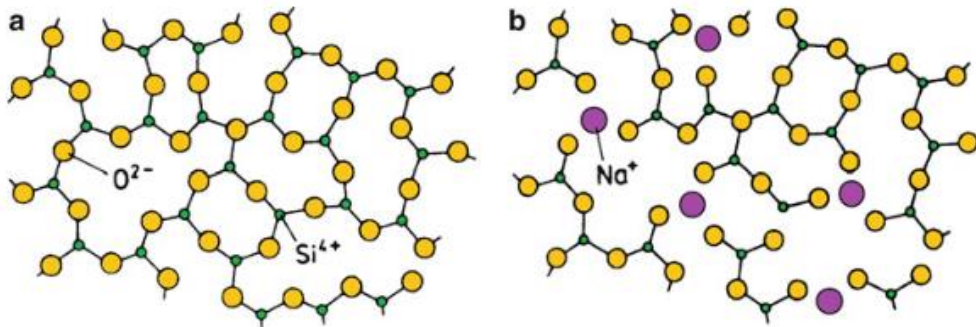


Figure I-10 : Structure amorphe du verre : (a) une représentation bidimensionnelle du réseau de verre de silice et (b) un réseau modifié qui résulte de l'ajout de Na_2O à (a). Notez que Na^+ est ioniquement lié à O^{2-} mais ne rejoint pas directement le réseau . [11]

c) Propriétés et applications :

Les propriétés mécaniques typiques des fibres de verre E sont résumées dans le tableau I.3. Notez que la densité est assez faible et la résistance est assez élevée ; Module d'Young, cependant, n'est pas très élevé. Ainsi, alors que le rapport résistance/poids des fibres de verre est assez élevé, le rapport module/poids n'est que modéré. C'est cette dernière caractéristique qui a conduit l'industrie aérospatiale à d'autres fibres dites avancées (par exemple, le bore, le carbone, l' Al_2O_3 et le SiC). Les fibres de verre continuent d'être utilisées pour le renforcement de résines polyester, époxy et phénoliques. C'est assez bon marché, et c'est disponible sous diverses formes (voir Fig. 2.4). Le brin continu est un groupe de fibres individuelles ; le roving est un groupe de brins parallèles; Les fibres coupées sont constituées de torons ou de mèches coupés à des longueurs comprises entre 5 et 50 mm. Les fibres de verre sont également disponibles sous forme de tissus tissés ou de nattes non tissées. [11]

L'humidité diminue la résistance des fibres de verre. Les fibres de verre sont également sensibles à ce qu'on appelle la fatigue statique ; c'est-à-dire que lorsqu'elles sont soumises à une charge constante pendant une période de temps prolongée, les fibres de verre peuvent subir une croissance de fissures sous-critique. Cela conduit à une défaillance au fil du temps à des charges qui pourraient être sûres lorsque l'on considère un chargement instantané.

Les résines renforcées de fibres de verre sont largement utilisées dans l'industrie du bâtiment et de la construction. Communément, ceux-ci sont appelés plastiques renforcés de verre, ou GRP. Ils sont utilisés sous forme de bardage pour d'autres matériaux de structure ou comme partie intégrante d'un panneau mural structurel ou non porteur ; les cadres de fenêtres, les réservoirs, les unités de salle de bain, les tuyaux et les conduits sont des exemples courants. Les coques de bateaux, depuis le milieu des années 1960, sont principalement fabriquées en PRV. L'utilisation de GRP dans l'industrie chimique (par exemple, comme réservoirs de stockage, pipelines et cuves de

traitement) est assez courante. L'industrie du transport ferroviaire et routier et l'industrie aérospatiale sont d'autres grands utilisateurs de PRV. [11]

Tableau.I.3 : Propriétés typiques des fibres de verre E. [11]

| Density (g/cm ³) | Tensile strength (MPa) | Young's modulus (GPa) | Coefficient of thermal expansion (K ⁻¹) |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------|--|
| 2.55 | 1,750 | 70 | 4.7 × 10 ⁻⁶ |

I.5.1.8. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts :

Il existe différents types des fibres et renfort, et chaque un a son propriété. Le tableau I-4 montre les caractéristiques moyennes des différents fibres et renforts.

Tableau I-4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [4].

| Renfort | Diamètre de filament [µm] | Masse volumique [kg/m ³] | Module de Young [MPa] | Coefficient de Poisson | Module de Cisaillement [MPa] | Contrainte de Rupture [MPa] | Allongement à la rupture [%] | Coefficient de dilatation °C ⁻¹ |
|--------------|------------------------------|---|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| | d | ρ | E | ν | G | Cr | A | α |
| Verre E | 16 | 2600 | 74000 | 0,25 | 30000 | 2500 | 3,5 | 0,5×10 ⁵ |
| Verre R | 10 | 2500 | 8600 | 0,2 | | 3200 | 4 | 0,3×10 ⁵ |
| Carbon HM | 6.5 | 1800 | 390000 | 0,35 | 20000 | 2500 | 0,6 | 0,08×10 ⁵ |
| Carbon HR | 7 | 1750 | 230000 | 0,3 | 50000 | 3200 | 1,3 | 0,02×10 ⁵ |
| Kevlar 49 | 12 | 1450 | 130000 | 0,4 | 120000 | 2900 | 2,3 | -0,2×10 ⁵ |
| Bore | 100 | 2600 | 400000 | | | 3400 | 0,8 | 0,4×10 ⁵ |
| Polyéthylène | | 960 | 100000 | | | 3000 | | |

I.5.1.9. Architecture des renforts :

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. I-11 existe différentes géométries et textures de renforts :

a) **Les formes unidirectionnel (UD)** : Les fibres sont orientées dans une même direction; Elles sont parallèles et peuvent se présenter sous deux formes :

- Sans liaison particulière (roving) : le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.

- Reliées par un fil (nappes).



Figure I-11 : Renfort UD [4].

- b) Les formes bidirectionnel (2D) :** Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame, tel que les fils de chaîne sont assemblés parallèlement les uns par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Le taux de déséquilibre très grand. Suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.

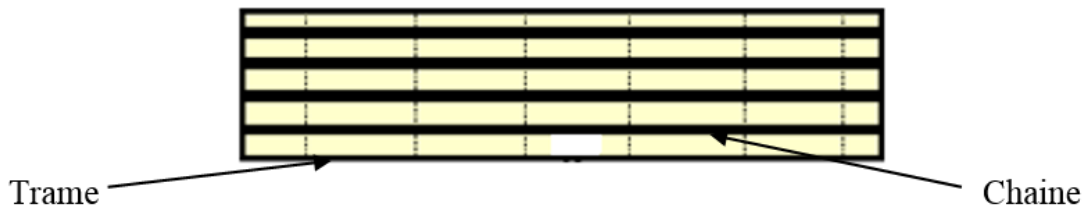


Figure I-12 : Renfort 2D [10].

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

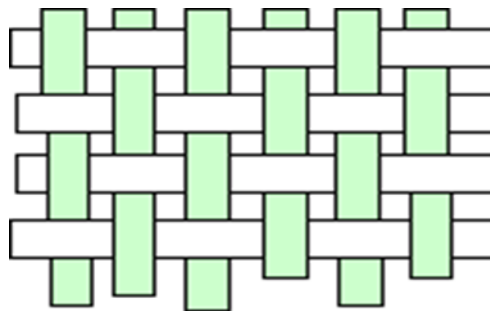


Figure I-13 : Renfort taffetas [4].

- **Sergé :** Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.

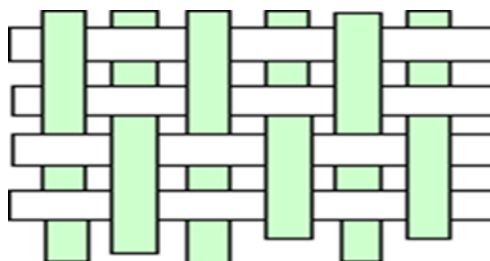


Figure I-14 : Renfort sergé 2/2 [4].

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

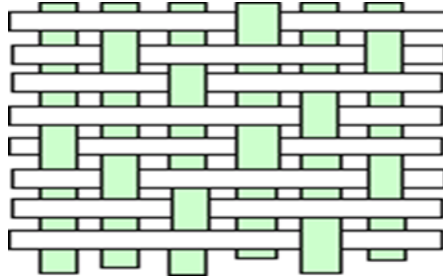


Figure I-15 : Renfort satin [4].

- **Les mats** : Les mats sont constitués d'un ensemble de fils continus ou discontinus disposés aléatoirement dans toutes les directions et maintenus par un liant. La dispersion des fibres suivant toutes les directions et l'absence d'une direction préférentielle font que le matériau est isotrope dans son plan. Les mats sont utilisés lorsqu'il faut coupler légèreté et isotropie, mais avec des caractéristiques mécaniques non exceptionnelles. Leurs avantages sont surtout la facilité d'élaboration, l'adaptabilité aux formes les plus variées et leur coût plus faible par rapport aux stratifiés à fibres longues orientées.



Figure I-16 : Tissu mat [6].

- **Hybride** : Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



Figure I-17 : Tissu hybrides carbone-aramide [5].

c) **Forme multidimensionnelle** : 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 [10]. Elles peuvent se présenter sous différentes formes :

- Fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ;
- Feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes (Longueur inférieure à 50 mm) sans orientation particulière ou à fibres continues.

Ils existent aussi d'autres tissages volumiques comme le 4D (dans ce cas, les fils sont orientés suivant 4 directions différentes) .

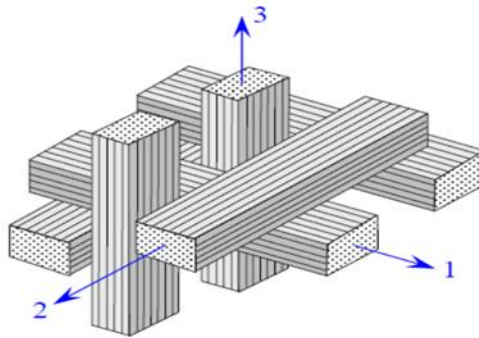


Figure I-18 : Tissage tridimensionnel (3D) [6].

I.5.1.10. Ensimage :

Les renforts destinés à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles [4] :

- Compatibilité de la liaison fibre - matrice ;
- Cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable ;
- Protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques) élimination des charges électrostatiques dues aux frottements ;
- Augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation.

I.5.2. Matrice :

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère, elle permet de lier et de maintenir les fibres entre elles, répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres [12].

Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est

requis, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes [13].

Actuellement, les résines thermodurcissables (TD) sont principalement utilisées qui sont combinées avec des fibres longues, mais l'utilisation de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe rapidement [6].

I.5.2.1. La matrice organique

a) Les résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température et possèdent la propriété de pouvoir être mise en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissements successifs. Elles peuvent donc être récupérées et facilement recyclées. Ce type de résine peut être séparé en plastique de grande diffusion et plastique technique [12].

b) Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables ont des très hautes propriétés mécaniques. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables [13]. Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- **Résines phénoliques** : Sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol, elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée, c'est pour cette raison qu'on les utilise dans les transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre [12].
- **Polyimides** : Ces résines sont principalement utilisées dans les composites HP, lorsqu'une bonne stabilité à haute température (> 250 ° C) est recherchée. Cependant, ils restent très coûteux et difficiles à mettre en œuvre [4].
- **Résines polyesters** : Se présentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker [12].
- **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre [4].
- **Résines époxydes** : L'époxy ou scientifiquement nommé polyépoxyde est un thermodurcissable composé d'une résine appelée prépolymère qui possède des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères.

En raison 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.) [14].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes:

- 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 ;
- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa ;
- Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³ ;
- Allongement à la rupture 2 à 5 % ;
- Température de fléchissement sous charge 290 °C [14].

c) Résines thermostables :

Ces types de résines se distinguent des autres résines par leurs performances thermiques qui gardent leurs propriétés mécaniques pour des températures supérieures à 200 ° C. Parmi les résines thermostables les plus utilisées, les résines Bismaléimides et Polyimides [12].

I.5.2.2 La matrice minérale :

a) la matrice céramique :

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé.

b) la matrice métallique :

Les composites à matrice métallique possèdent une bonne tenue en température ainsi que de bonnes propriétés électrique et thermique. Par rapport aux métaux, ils ont une meilleure stabilité dimensionnelle, ainsi qu'une meilleure résistance à l'usure [15].

I.5.3. Les charges et les additifs :

I.5.3.1. Les charges :

Les charges sont des particules solides non miscibles ajoutées en quelques dizaines de % à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les caractéristiques mécaniques, électriques ou thermiques, d'amélioration l'aspect de surface ou bien de réduire le prix de revient du matériau transformé, comme le montre dans la figure I.19:

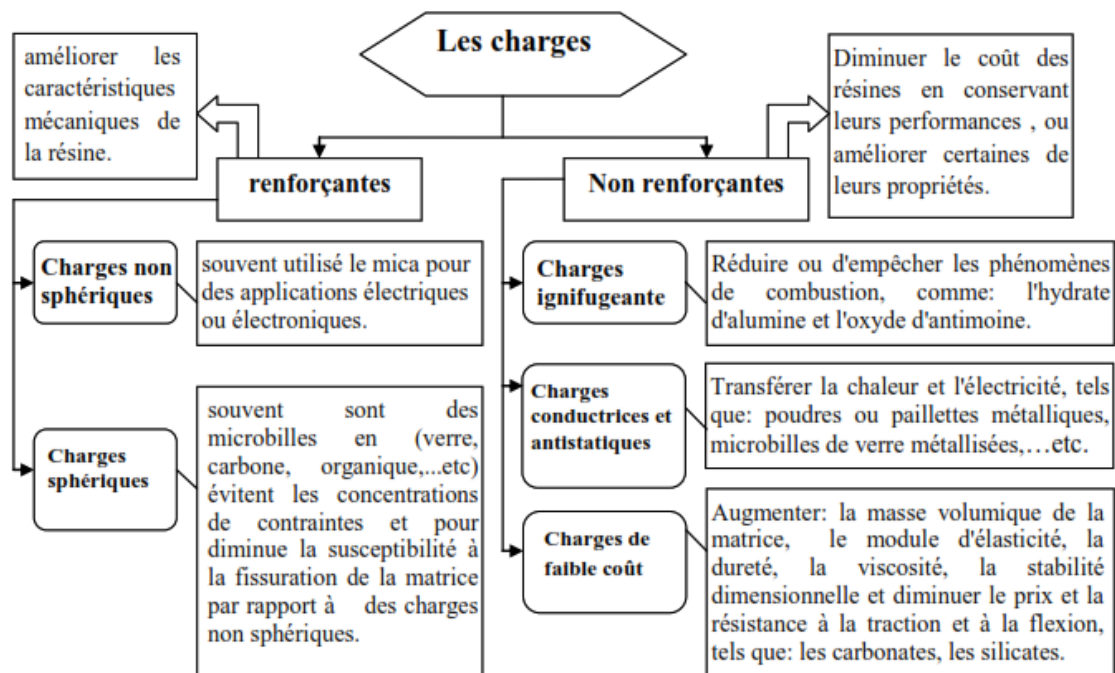


Figure I-19 : Les types de charges [16].

I.5.3.2. Les additifs:

La Commission européenne définit les additifs comme des substances incorporées dans les résines pour obtenir un effet technique sur le produit fini et de meilleure performance lorsqu'il est utilisé, ces substances sont ajoutées en faible quantité de quelques % et moins, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique en machine de transformation, ou bien d'assurer une adhérence adéquate entre le renforcement et la matrice.

Suivant les cas, on ajoute généralement: des lubrifiants et agents de démoulage, des pigments et colorants, des agents anti-retraits, des agents anti-ultraviolets, des accélérateurs, des catalyseurs...etc. [16]

I.5.4. L'interface fibre/matrice et l'adhésion mécanique :

En effet, un des modes d'endommagement dans les composites est la rupture à l'interface, cette dernière est une surface de contact entre la matrice et le renfort et joue un rôle très important pour comprendre le comportement mécanique et la durabilité des matériaux, mais n'intervient pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. Où la transmet les contraintes entre la matrice et le renfort lors d'une sollicitation et sans déplacement relatif .

Au niveau de la surface des fibres naturelles (en particulier de la fibre végétale de cellulose), il y a toujours des saillies, des cavités et des pores aident à l'occurrence d'adhésion en couche fine. Lors de l'élaboration du composite, la matrice à l'état liquide visqueux peut pénétrer dans les cavités et les pores de la surface du fibres pour former une intégration structurelle (voire la figure I.20, où le taux d'encrages mécaniques augmentent avec la porosité de surface.

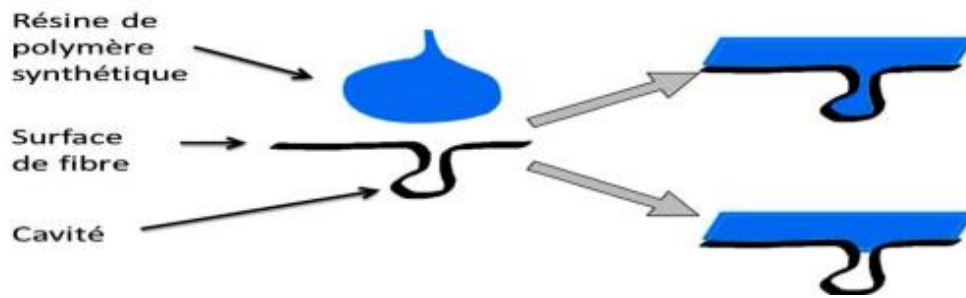


Figure I-20: La formation d'un ancrage mécanique à l'interface [17].

L'interface peut être considérée comme un point faible du composite d'un point de vue mécanique [18], son comportement mécanique est influencé par des nombreux facteurs conduisent au vieillissement du composites, comprennent la température, l'UV et l'humidité qui diminue les modules et augmenter la déformation [19].

Le moulage par centrifugation est le procédé permettant l'obtention de corps creux en disposant le renfort et la résine à l'intérieur d'un moule mis en rotation à grande vitesse. On utilise l'effet de la force centrifuge pour l'application et le maintien des constituants sur la paroi intérieure du moule, et surtout pour l'imprégnation du renfort par la résine [20].

I.6. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites :

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui consiste en l'apparition de micro-défauts locaux. Dans un composite, les premiers endommagements détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique, lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture de l'un des constituants ou celle de l'interface les reliant. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du matériau. Ainsi, un nombre important de ces microfissures s'accumulent dans le matériau avant la rupture finale. Les paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la progression de l'endommagement. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites stratifiés en tant que matériaux d'étude dans notre travail [21].

I.6.1. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés :

Lorsqu'ils sont soumis à des contraintes externes, les matériaux composites (fibres/matrice) subissent différents types de dégradation résultant de l'endommagement local au niveau de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice. Généralement, ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. Les mécanismes de dégradation se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitation mécanique imposées. Pour les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, l'expérience a montré que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement : la fissuration matricielle, la rupture de l'interface fibre/matrice (la décohésion), la rupture des fibres et le délaminage inter-plis .

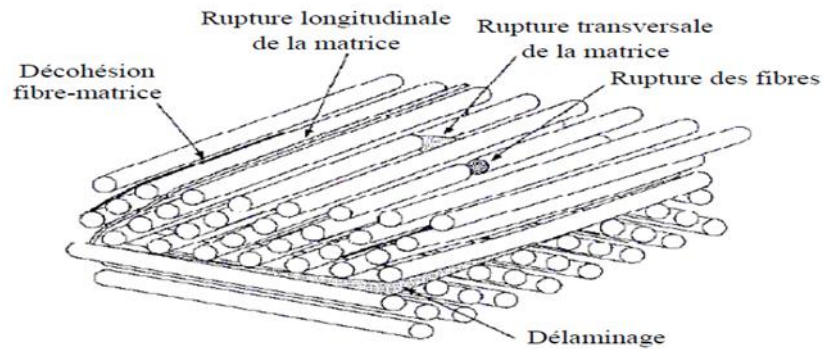


Figure I-21 : Mécanismes d'endommagement observé dans un composite stratifié [21].

I.6.1.1. Fissuration matricielle :

Les microfissures qui se produisent au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions, soit par fissuration transversale, soit par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Dans ce cas, les fissures sont orientées dans la direction de la sollicitation. La fissuration transversale se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre/matrice [21].

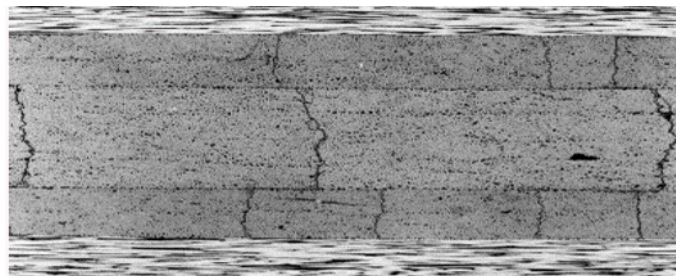


Figure I-22 : Exemple de fissuration transverse de la matrice d'un stratifié carbone/époxyde [22].

I.6.1.2. Décohésion fibre/matrice :

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers les fibres ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre/matrice [22]. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants :

- ✓ **Cas d'une interface très forte** : si l'adhérence entre les fibres et la matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle. La rupture observée sera de type fragile.
- ✓ **Cas d'une interface très faible** : la fissuration matricielle est déviée à l'interface et la décohésion fibre/matrice s'étend sur une très grande distance.

- ✓ **Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires** : la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

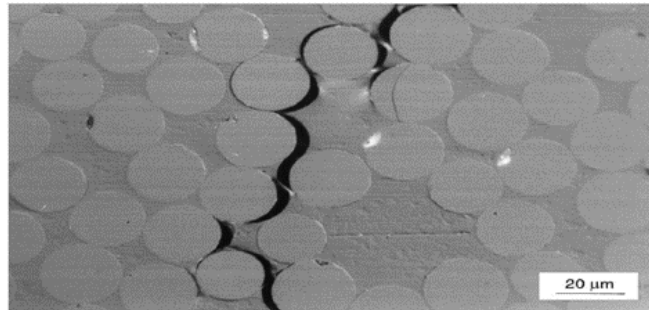


Figure I-23 : Décohésion fibres matrice [22].

I.6.1.3. Rupture de fibre :

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint sa contrainte à la rupture. Elle se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation. Ce mode d'endommagement est la conséquence de concentrations de contraintes dues aux deux types d'endommagement précédents. Lorsqu'une fissure apparaît dans une fibre, son instabilité devient grande, entraînant ainsi sa rupture complète .

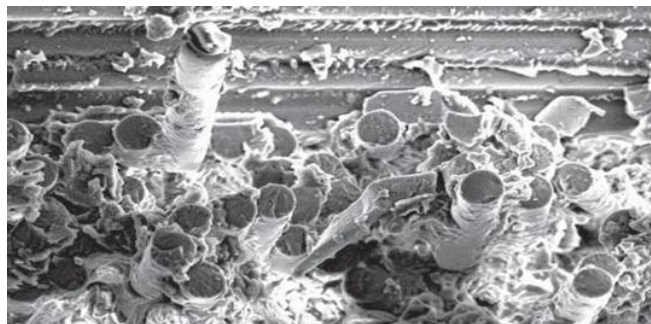


Figure I-24 : Exemple de traction monotone sur une rupture de la fibre de verre [22].

I.6.1.4. Délaminage :

Dans le cas de stratifiés à plis croisés, aux mécanismes décrits précédemment (fissuration matricielle, décohésion et rupture de fibres), s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couches appelé délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Le délaminage est donc une séparation locale de deux plis du composite. Elle est due soit à une concentration de contraintes locale près des bords, soit à une densité de fissurations transversales très importante. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure.



Figure I-25 : Délaminage des plis [18].

I.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

I.7.1. Les avantages :

Il existe plusieurs avantages associés aux matériaux composites qui les rendent plus attrayants que d'autres matériaux traditionnels dans de nombreuses applications où des performances élevées et un poids léger sont des exigences essentielles. Ceux-ci sont brièvement discutés ci-dessous[1] :

1. Haute résistance à la traction et rigidité
2. Haute résistance spécifique et rigidité spécifique
3. Haute résistance à la fatigue
4. Amortissement matériel inhérent et bonnes propriétés d'impact
5. Propriétés personnalisables
6. Flexibilité de conception
7. Moins de corrosion
8. Techniques de fabrication simples
9. Pièce de forme presque nette et nombre de pièces inférieures
10. Développement de produits rentables

I.7.2. Inconvénients :

Bien qu'il existe une longue liste d'avantages associés aux composites, il existe également certains inconvénients. Des précautions particulières doivent être prises pour surmonter ces limitations. Ils sont énumérés ci-dessous [1]:

1. Basse température de service
2. Sensibilité au rayonnement et à l'humidité.
3. Faibles propriétés élastiques dans le sens transversal.
4. Conception et analyse complexes.
5. Caractérisation mécanique complexe.
6. Coût élevé des matières premières et de la fabrication.
7. Difficulté d'assemblage

I.8. Domaines d'utilisation des matériaux composites :

Les composites sont largement utilisés dans différents domaines tel que l'aéronautique, le transport, l'industrie naval et les bâtiments, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et la résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique.

L'adaptation de composites, dans l'industrie maritime, permet de diminuer le poids des structures de bateaux rapides (patrouilleurs, bateaux d'intervention ou de service) tout en ayant une résistance suffisante afin d'avoir pour résultat soit une augmentation de la vitesse pour une puissance donnée, soit une meilleure rentabilité pour la même vitesse ou soit l'utilisation d'une motrice moins puissante et moins onéreuse.

L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et l'équipement électronique, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel plurifonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) y est important. En électronique, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Egide, récemment introduits au Nouveau Marché, sont utilisés dans le monde entier [10]. Du point de vue écologique, les fibres naturelles utilisées comme renfort dans les composites prennent une place croissante et sont de nouveau d'actualité.

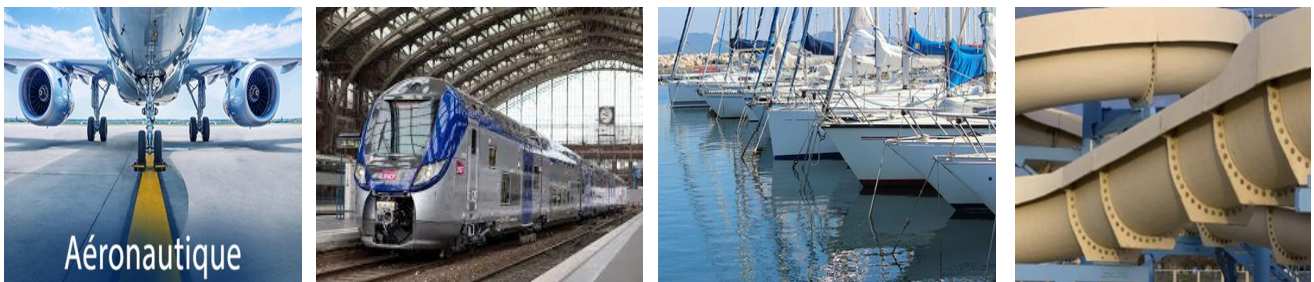


Figure I-26- : Exemple d'application composite dans l'aéronautique, transport, naval et industrie [10].

I.9. Conclusion :

A travers ce premier chapitre consacré aux matériaux composites, nous avons voulu donner un aperçu général et théorique sur ces matériaux et leur constituant pour mettre en évidence la variété du choix du renfort et de la matrice et l'impact de ce choix sur les qualités souhaitées derrière la processus d'élaboration du matériau composite suivant les exigences imposées au départ.

CHAPITRE II. LES LAMINAIRES

II .1 Introduction :

Les composites stratifiés ou laminaires sont l'un des composites structurels les plus couramment utilisés qui utilisent des feuilles stratifiées de matériaux en tissu noyées dans la matrice polymère. Les composites stratifiés sont un assemblage de couches de matériaux composites qui sont jointes pour répondre aux exigences techniques spécifiques telles que représentées (figure II.1). Dans un stratifié hybride, des couches de matériaux différents peuvent être utilisées. Les couches individuelles des stratifiés sont généralement isotropes transversalement (propriétés isotropes dans le plan transversal) ou orthotropes (propriétés normales dans les directions orthogonales), ce qui fait que le stratifié présente des propriétés orthotropes, anisotropes ou quasi-isotropes. Le stratifié peut présenter un couplage entre une réponse hors plan et dans le plan en fonction de la séquence d'empilement des stratifiés. La rigidité et la résistance accrues pour un poids spécifique, l'amortissement mécanique, la ténacité et l'augmentation de la résistance à la corrosion et aux produits chimiques par rapport au métal conventionnel sont quelques-unes des principales raisons qui ont conduit à l'amélioration des composites stratifiés.

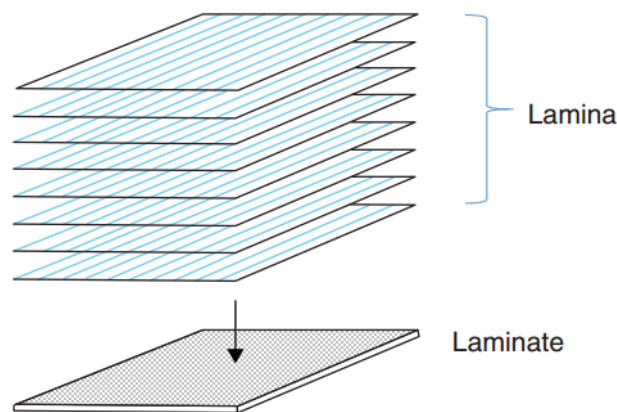


Figure II.1 Présentation d'un composite laminaire [23].

Ces dernières années, la croissance significative de la part de marché des composites FRP est due à leurs hautes performances et aux progrès des techniques de fabrication. Un aspect important de la fabrication de pièces composites est le placement et la direction de fibre, qui fournit les caractéristiques requises. La fabrication composite est un processus complexe impliquant divers paramètres tels que les types de matrice et de renforcement, le volume de production, la géométrie des pièces et les exigences de processus et d'outillage. Bien que les propriétés de la matrice et de la

phase de renfort aient une et significatif sur les propriétés finales des composites, la technique de fabrication choisie pour fabriquer les composites influence également les performances des matériaux composites. La disponibilité de nombreux choix fait qu'il est préférable que les facteurs de conception, d'économie et de fabrication soient intégrés dans le processus de développement lui-même. Les progrès dans le processus de fabrication et la technologie des composites stratifiés ont changé l'utilisation des composites des composants structurels secondaires aux composants primaires [23].

II .2 Processus de fabrication :

Le choix du procédé de fabrication des composites est devenu l'un des défis majeurs dans le domaine des matériaux composites. La technique de fabrication des stratifiés composites dépend de nombreux facteurs tels que les caractéristiques de la matrice et du renfort (type de fibre / matrice, teneur en fibre, orientation de la fibre, longueur de fibre, etc.), la géométrie des produits (forme, taille, etc.), et son utilisation finale. Un bref aperçu des différentes techniques de fabrication pour les composites stratifiés FRP est décrit ci-dessous [23].

II.2.1 Processus de mise en place des mains :

La méthode la plus simple et la plus couramment utilisée pour fabriquer des stratifiés composites est le processus de stratification à la main. Elle utilise généralement des fibres continues sous la forme de tissus unidirectionnels, tissés, tricotés ou cousus. Sur la base de l'application, le stratifié composite peut être fabriqué par une combinaison de couches de différentes orientations de fibres.

Dans cette méthode, des couches alternatives de matrice et de renforcement sont placées dessus. Généralement, un agent de démoulage est utilisé sur la surface du moule pour empêcher le collage et permettre un retrait facile de la pièce finie. La matrice est pressée sur les renforts par un rouleau pour éliminer le surplus de résine de chaque couche et pour assurer une répartition uniforme de la résine sur la surface. Le processus est répété pour toutes les couches de renforcement jusqu'à ce que l'épaisseur souhaitée soit obtenue. L'ensemble du processus est effectué manuellement à la main. Le durcissement des stratifiés composites à lieu à la température atmosphérique standard. Enfin, la pièce finie est retirée après durcissement complet. Les performances et la qualité des produits composites fabriqués par le procédé de stratification à la main sont influencées par de nombreux paramètres tels que le type de fibre, la teneur en fibre, l'orientation de la fibre, le type de matrice, la pression et le temps de durcissement. La figure II.2

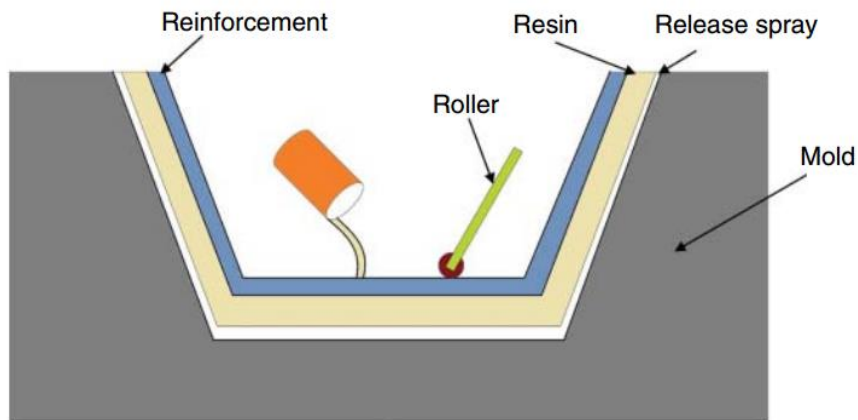


Figure II.2 : Mise en place d'un composite à la main [23].

Les avantages de cette méthode comprennent un investissement en capital moindre, un moule / conception facile à changer et pratiquement aucune limite à la taille de la pièce qui peut être produite. Cependant, quelques limitations de ce procédé comprennent les suivantes:

Le procédé convient pour une fraction / concentration de faible volume de phase de renforcement;

- Il prend beaucoup de temps; il a une teneur élevée en vides et / ou en porosité;
- Une seule surface finie (qui est en contact avec le moule) est possible;
- L'obtention d'un produit acceptable demande beaucoup de travail;
- Le contrôle de l'épaisseur n'est pas très précis;
- Il est difficile d'obtenir un rapport fibre / résine uniforme;
- Ne convient pas non plus à la production à grand volume.

Cette méthode convient à la fabrication de pales d'éoliennes, de réservoirs, de navires, de coques de bateaux, etc. [23].

De nombreux chercheurs ont réalisé leur études sur les stratifiés composites fabriqués par la technique de stratification à la main [24,25]. Fong et al. [26] ont réalisé une étude sur les fibres de fil pour les sutures revêtues de polymère et les stratifiés composites polymères à superposition à la main ou l'on étudia l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques des fibres de fil et la dépendance éventuelle de la géométrie des nœuds. Garcia et al. [27]. Ont mené une enquête sur la fabrication et les propriétés multifonctionnelles d'un stratifié hybride avec des nanotubes de carbone alignés cultivés in situ est réalisée par stratification en utilisant la technique de stratification à la

main avec des tests mécaniques et électriques sont effectués. Sapuan et Maleque [28, 29]. Ont développé un support téléphonique réalisé avec des composites de pseudo-fibre de tige / époxy de banane. De même, ils ont réalisé une table polyvalente à base du même composite en utilisant la technique de superposition à la main est réalisée. Banakar et coll. [30] ont étudié l'influence de l'orientation et de l'épaisseur des fibres sur les propriétés de traction des composites de verre FRP stratifiés et ont conclut que la résistance à la traction dépend principalement de l'orientation et de l'épaisseur de la fibre. Misri et coll. [31] ont étudié le comportement mécanique du verre tissé / fibre de palmier à sucre renforcée petit bateau à base de composite hybride de polyester insaturé fabriqué à la main. Des recherches sur les propriétés thermiques et flexurales des composites de nanocargile carbone / époxy à armure toile fabriqués à la main sont réalisées par Chowdhury et al. [32].

II.3 Architecture des matériaux composites

II.3.1 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 longues (unidirectionnelles UD ou réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

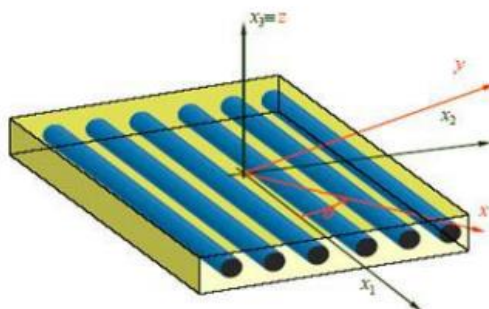


Figure II.3: Structure d'un matériau monocouche [33].

II.3.2 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches, et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure II.4). Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. On pourra avoir des stratifiés du type : $+\theta$.

- a) **Equilibré** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction que de $-\theta$ couches orientées suivant la direction.
- b) **Symétrique** : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.

- c) **Antisymétrique** : stratifié comportant des couches disposées non symétriquement par rapport à un plan moyen.
- d) **Croisé** : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .
- e) **Hybride** : les couches successives comportent des fibres de natures différentes, il s'agit d'un stratifié hybride.

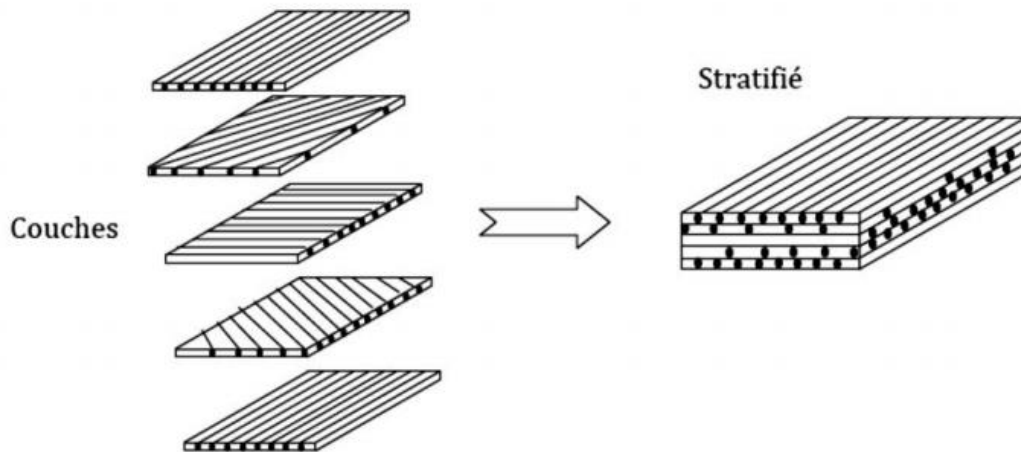


Figure II.4: Constitution d'un stratifié [34].

• **Désignation des structures stratifiées**

Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. Par exemple, un stratifié de type $(90^\circ, 0^\circ)_2s$ est constitué en fait de 8 couches orientées comme suit : deux groupes de plis à 90° et 0° , puis par symétrie de deux groupes de plis à 0° et 90° . L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure.

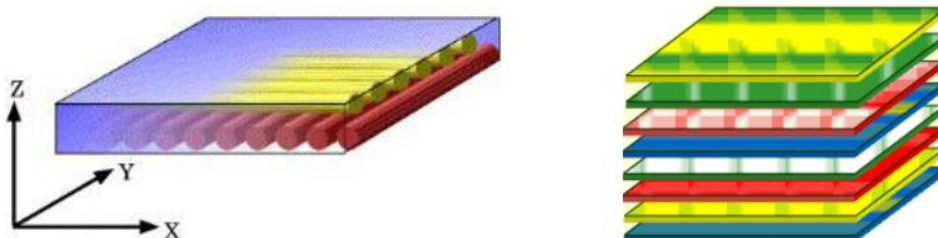


Figure II.5: Désignation d'un stratifié [35].

II.3.3 Les matériaux Sandwich

Les matériaux sandwich résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux à haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité (Figure II.6). Ils ont pour avantages : une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associées à un faible poids par unité de surface. Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement resté peu connu. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique [34].

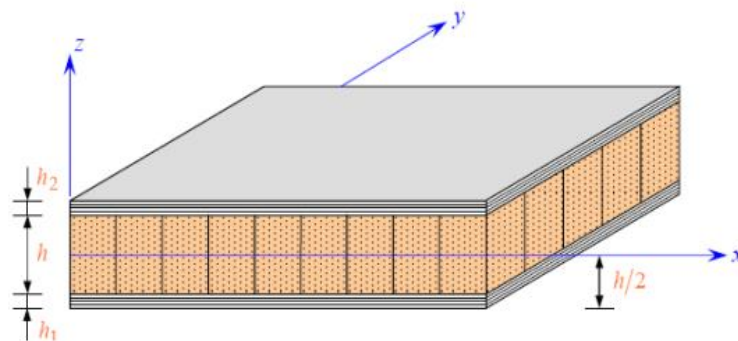


Figure II.6: Constitution d'un matériau sandwich [36].

II.4 Comportement mécanique des matériaux composites stratifiés :

Le comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux composites est généralement analysé par la théorie des plaques stratifiées, prenant en compte le cisaillement transverse qui est basé sur une évaluation des champs des déplacements qui considère qu'une normale au plan moyen d'un stratifié reste un segment de droite lors de la déformation. Cette déformée ne restant toutefois pas normale à la déformée du plan moyen.

La théorie des plaques sandwiches considère que seule l'âme du matériau sandwich est soumise à une déformation en cisaillement transverse. La théorie des stratifiés avec cisaillement transverse et la théorie des plaques sandwiches sont les outils qui peuvent être utilisés usuellement pour analyser le comportement élastique des structures en matériaux composites : soit par une approche analytique ou par une analyse par éléments finis [35].

II.5 Définition d'une plaque

Une plaque est un solide élastique dont une dimension selon l'épaisseur est plus petite par rapport aux deux autres dimensions, et qui possède généralement un plan moyen ou plan de symétrie. Elle peut être constituée d'un seul matériau, comme les plaques classiques ou de plusieurs matériaux, comme les plaques composites (stratifiées ou sandwichs).

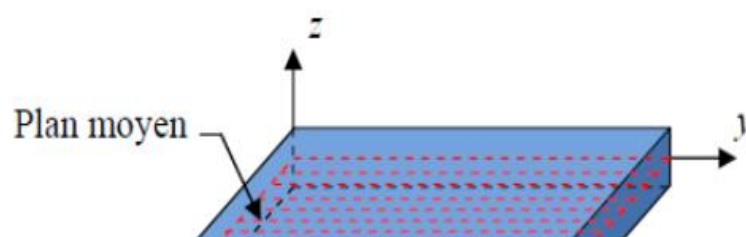


Figure II.7: Géométrie d'une plaque [37].

II.6 : Lay-up classique

Le deuxième type de séquence d'empilement est la séquence appelée « quasi isotropic » [38] qui est composée de plis répétés 0° , 45° , 90° et -45° . Le principe est d'utiliser chacune de ces orientations le même nombre de fois, en faisant varier l'orientation de 45° entre deux plis successifs, et d'imposer la symétrie de la séquence. On obtient des séquences de type $[45/90/-45/0]_N$, N peut prendre n'importe quelle valeur entière en fonction de l'épaisseur souhaitée.

La succession des plis en variant jusqu'à 45° permet un meilleur comportement au délaminage, tel Comme impact, en ne créant pas trop de variation de rigidité en flexion entre deux plis (incompatibilité de flexion). La distribution en nombres égaux de chaque orientation permet une isotropie dans la membrane, et la symétrie supprime tous les couplages possibles.

L'intérêt de cet isotrope est qu'il ne bouleverse pas les principes de conception utilisés en rigidité dans les travaux de conception. Dans l'industrie aéronautique, ces séquences, lorsqu'elles sont utilisées avec des fibres de carbone, sont appelées «black metal» [39]. ce qui illustre des propriétés privilégiées: des structures légères, sans remettre en cause les méthodologies. Cependant, la particularité de ce type de séquence n'est pas ses propriétés d'isotropie en flexion, contrairement aux séquences présentées ci-dessus. En effet, la condition de symétrie exige que les deux couches externes de l'empilement soient nécessairement orientées dans le même sens. Du point de vue du comportement en flexion, cela entraînera un raidissement dans cette direction particulière.

L'intérêt de ce type de séquence, c'est d'étudier les interactions entre les effets de l'empilement et les effets globaux dus à l'anisotropie de la rigidité en flexion. Et en Comparant les résultats avec ceux obtenus pour QIQH [A], une séquence à 24 plis : $[0/45/90/-45]_{3S}$ appelée séquence AERO.

AERO : [0 45 90 -45/ 0 45 90 -45/ 0 45 90 -45/45 90 45 0/ -45 90 45 0/ -45 90 45 0]
QIQH[A]: [0 45 90 -45/ 90 -45 45 -45/ 0 90 0 45/0 45 -45 45/ 90 0 90 -45/ 90 -45 0 45]

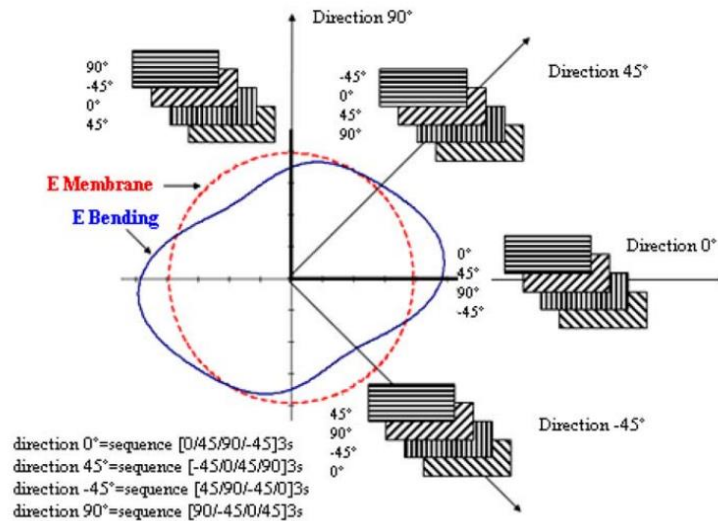


Figure II.8. Modules polaires dans la membrane et flexion du stratifié AERO.

Tableau II.1. Propriétés élastiques comparatives du stratifié AERO et de QIQH en référence

| | Membrane (GPa) | Bending (GPa) |
|-----------------|----------------|---------------|
| Reference QIQH | 78.5 | 78.5 |
| E@ tension 0° | 78.5 | 97.6 |
| E@ tension 45° | 78.5 | 82.2 |
| E@ tension 90° | 78.5 | 69.7 |
| E@ tension -45° | 78.5 | 61.0 |

Pour la séquence $[0/45/90/-45]_3S$, la figure II.8. Montre la représentation polaire des modules d'élasticité en flexion et des empilements de membranes AERO obtenue à partir de la théorie classique des stratifiés. Il existe une membrane isotrope et une flexion anisotrope. Sur cette figure sont également répertoriées les différentes directions des joints adhésifs à simple recouvrement et les orientations rencontrées à partir de la surface du stratifié. Les valeurs de module attendues dans ces directions sont données dans le tableau II.1. On constate que le module de flexion est maximal dans la direction 0° , et minimum dans la direction -45° [40].

CHAPITRE III :
TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III .1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des matériaux utilisés et leur caractéristique, ainsi que l'ensemble des techniques et méthodes expérimentales mise en œuvre pour la préparation et la caractérisation du composite laminaire. A savoir que tous les matériaux utilisés et les travaux et essais ont été réalisés dans les laboratoires de MAGREB PIPE COMPANY dont le complexe est situé dans la zone industrielle de M'sila.

III.2. Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés pour l'élaboration des éprouvettes en composite sont comme suit:

- La matrice : la résine Orthophtalic.
- Le renfort : les fibres de verre type A et E-glass (pour le mat).

III.2.1. La matrice :

La résine Orthophtalique est un polyester insaturé, pré-accélérée et thixotrope. La résine est formulée pour changer de couleur dès l'ajout du catalyseur.

La matrice est préparée par mélange de 03 produits ; la résine, 0.2% de catalyseur (A50) et 0,15% d'accélérateur (le cobalt 6%) qui réagissent pour donner lieu à un corps solide après réaction figure III.1. Lors du mélange l'ajout du durcisseur à la résine se fait progressivement, en contrôlant la viscosité au cours du malaxage pour garder une coulabilité admissible afin d'avoir un bel aspect des éprouvettes après séchage. Pour contrôler la viscosité au cours du mélange et le pic exothermique de réaction, on a utilisé un Viscosimètre Brook FIELD avec un outil de type S62 et un thermocouple plongé Figure III.2.



Figure. III.1 : Préparation de la résine. a) La matrice polymère thermodurcissable en Orthophtalic, b) le catalyseur utilisé - A50

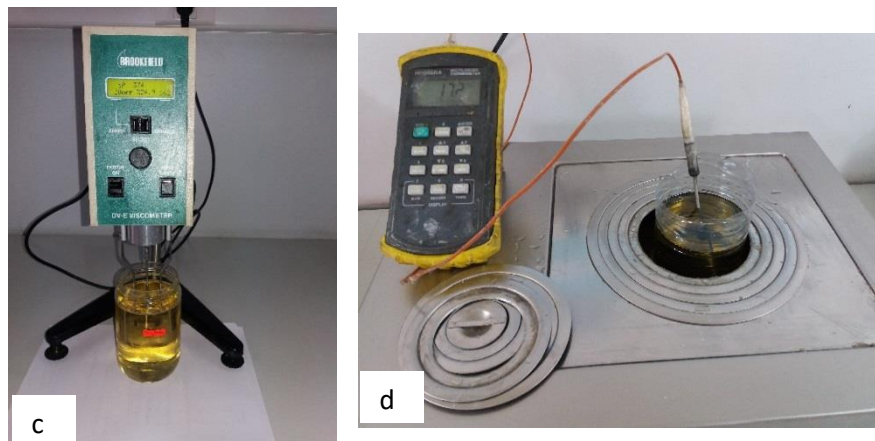


Figure. III.2 Test de viscosité et de la température de prise. c) viscosimètre Brook FIELD
d) thermocouple.

III.2.1.1. Caractéristiques mécaniques et avantages de la matrice :

Tableau.III.1 : Caractéristiques de la résine Orthophtalique : [1]

| <i>Caractéristique</i> | <i>Valeur</i> | <i>Unité</i> |
|------------------------------------|---------------|---------------------|
| Masse spécifique du liquide à 25°C | 1.12 | gr/cm ³ |
| Masse spécifique du solide à 25°C | 1.16 | gr/.cm ³ |
| Viscosité à 25°C | 400 | MPa. sec |
| Temps de gel | 14 | min |
| Temps du pic de gel | 7 | min |
| Température de pic | 185 | °C |
| Résistance à la traction | 72 | MPa |
| Module de traction | 3.100 | MPa |
| Allongement à la rupture | 4 | % |
| Résistance à la flexion | 90 | MPa |
| Module de flexion | 3.900 | MPa |
| Absorption d'eau | 0.45 | % poids |

Tableau.III.2 : Propriétés de la résine Orthophtalique [1].

| Propriétés | Avantages |
|-----------------------|--|
| faible viscosité | Imprégnation rapide du renfort |
| Durcissement rapide | Rotation rapide des moules |
| Pic exotherme calmé | Production de stratifié et épais |
| Changement de couleur | Sécurité quant à l'ajout de catalyseur |

III.2.2. Le renfort :

Les renforts utilisés sont les fibres de verre de type A et les fibres de verre de type E pour les mat. ce sont des fibres blanches et lisses, Figure. III.3, le choix de ce type de fibres est justifié par leur disponibilité et l'étendue utilisation dans l'industrie.



Figure. III.3 : Les renforts utilisés : a) fibres de verre de type-A , b) fibres de verre de type-E pour mat.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre de type A utilisé sont fournies par le fournisseur et sont déterminées conformément à la norme ASTM D2343 :

- Résistance à la traction de 2741 MPa
- Module de Young E 81,232 GPa

III.3. Procédé de fabrication des plaques stratifiées :

L'élaboration des plaques stratifiées est réalisée par la technique d'imprégnation. Elle consiste à découper les fibres ou le mat selon les dimensions requises et a les disposer et selon l'orientation désirée. Après avoir déposé la 1ere couche sur un film plastique on procède à leur imprégnation de résine en pressant à l'aide d'un rouleau. Le dépôt suivi d'imprégnation est repris pour chaque nouvelle couche. Ainsi le composite est fabriqué couche par couche. Figure III. 4 et figure III.5.



Figure III. 4. Préparation des plaques à base de fibres type-A.



Figure III. 5. Préparation des plaques à base mat (fibres type-E).

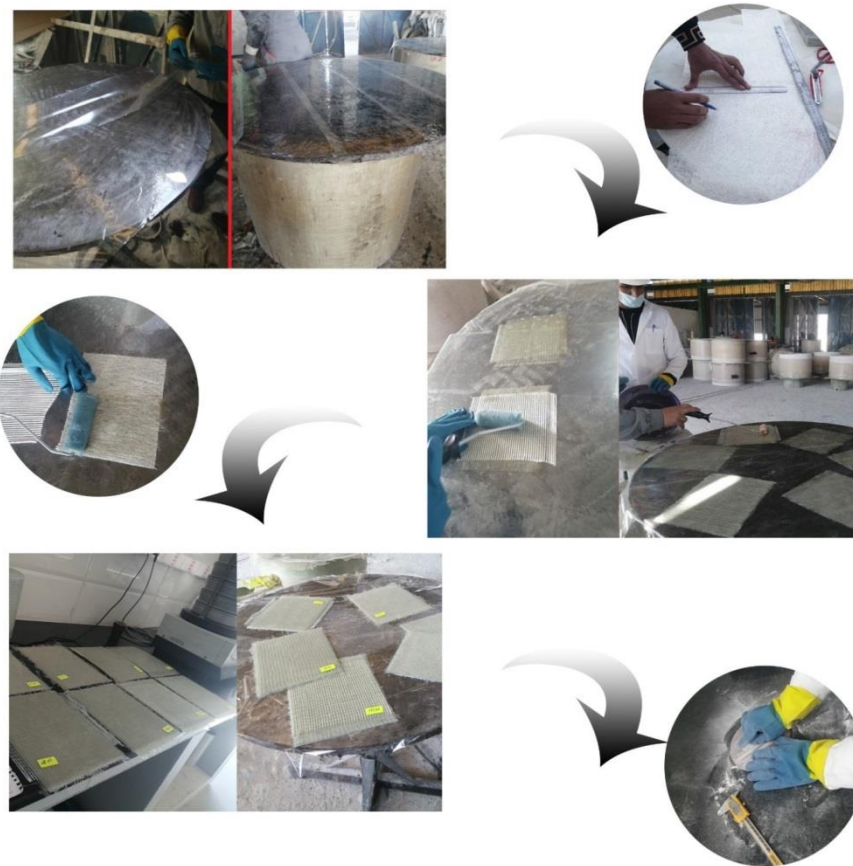


Figure. III.6: Résumé des différentes étapes d'élaboration des éprouvettes.

III.4. Préparation des éprouvettes :

Lors de la réalisation des plaques composites, nous avons considéré les angles $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ]$ et $[90^\circ]$, avec 3, 5 et 6 plis. L'ensemble des plaques réalisés est présenté dans le tableau III.3 ont été préparées.

Tableau. III.3: les configurations d'échantillons élaborés.

| Echantillons | Configuration |
|--------------|---|
| plaque 1 | $0^\circ / M300 / 90^\circ$ |
| plaque2 | $90^\circ / M300 / 0^\circ$ |
| plaque 3 | $M300 / 0^\circ / M300$ |
| plaque 4 | $M300 / 90^\circ / M300$ |
| plaque 5 | $M300 / 0^\circ / 90^\circ / M300$ |
| plaque 6 | $0^\circ / 90^\circ / M300 / 0^\circ / 90^\circ$ |
| plaque 7 | $0^\circ / M300 / 90^\circ / 90^\circ / M300 / 0^\circ$ |
| plaque 8 | $90^\circ / M300 / 0^\circ / 0^\circ / M300 / 90^\circ$ |
| plaque 9 | $45^\circ / M300 / 45^\circ$ |
| plaque 10 | $+45^\circ / M300 / -45^\circ / -45^\circ / M300 / +45^\circ$ |
| plaque 11 | $90^\circ / M300 / 90^\circ$ |
| plaque 12 | $0^\circ / M300 / 0^\circ$ |
| plaque 13 | $-45^\circ / M300 / +45^\circ / +45^\circ / M300 / -45^\circ$ |

- a) **Découpage des échantillons** : La préparation des échantillons est obtenue par découpage des plaques en languettes selon les dimensions désirées à l'aide d'une scie à disques de diamant Figure.III.7.



Figure III. 7. Scie à disque de diamant utilisé pour le découpage des éprouvettes.

b) Polissage : Une fois le découpage achevé on procède à la rectification des défauts par ébarbage manuel à l'aide de papier verre P800.



Figure III. 8. Polissage après découpage des éprouvettes.

III.5. Détermination du taux de fibres

Pour déterminer le taux de fibre dans un composite, des échantillons sont découpés puis sont soumises à l'essai de perte au feu (ou calcination) dans un moufle. Figure. III.9.



Figure. III.9: Echantillon de l'essai de calcination.

III.5.1. Matériel utilisé :

La détermination du taux des fibres nécessite l'utilisation de l'appareillage suivant :

- Creuset pour mettre les échantillons dedans (Figure. III .10.a),
- Une balance de précision 0.0001 g (Figure. III.10.b),
- Un four a moufle dont la température est réglée à 625°C (Figure. III.10.c).



(a) (b) (c)

Figure. III.10 : Matériel utilisé pour l'essai de perte au feu : (a) Creuset, (b) balance de précision, (c) Four a moufle.

III.5.2. Déroulement de l'essai de calcination

La procédure consiste à relever par pesée le poids du creuset vide, puis le poids du creuset avec l'échantillon dedans. Après avoir placé le creuset dans le four réglé à une température de 625°C durant 3heures entières ce qui permet de calciner la résine, une pesée des résidus calcines après refroidissement est préconisée dans les mêmes conditions.

III.5.2.1 Mesure du taux de verre :

Le taux massique de fibres de verre dans les éprouvettes calcinées est déterminé en fonction du calcul des fractions massiques entre les échantillons avant calcination (A) et après calcination (B). Le taux massique de fibres est calculé en utilisant les formules suivantes :

$$M_f = \frac{B}{A} \times 100\% \quad \text{avec} \quad M_m = 100 - M_f$$

Ou

A : masse de l'échantillon avant la calcination en (g).

B : masse des fibres obtenues après calcination en (g).

Mf et Mm : fraction massique de fibre et de résine en (%).

III.6. Les essais mécaniques :

III.6.1 Essais de traction :

III.6.1.1 Principe d'essai : L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction suivant son axe, généralement jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques [27].

III.6.1.2 La machine de traction :

L'essai de traction est effectué sur une machine d'essais universelle de type INSTRON-5969 de capacité maximale 50 KN, proposant une vitesse constante de déplacement des points de charge. Pour des essais de traction et compression, on a adopté une vitesse de 3 mm/min. Cette machine est constituée d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile est pilotée par un ordinateur. Figure III.11. La figure III-12 montre la fixation des éprouvettes de traction liée directement sur les deux mors.



Figure III-11 : Machine universelle de type INSTRON 5969.



Figure III-12 : Mode de fixation des éprouvettes de traction entre mors.

III.6.1.3 Les Forme géométriques de l'éprouvette :

Le découpage détermine l'orientation des fibres par rapport à l'axe de sollicitation. La Figure.III.13 et Figure.III.14 présentent respectivement les dimensions et la géométrie des éprouvettes utilisées dans l'essai de traction.

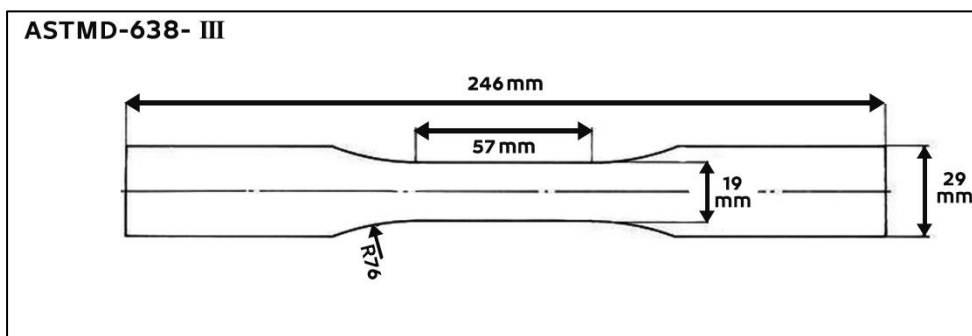


Figure III.13. Les dimensions des éprouvettes.



Figure III.14: Eprouvettes réalisées pour l'essai de traction.

La mesure des éprouvettes est enregistrée dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Dimensions des éprouvettes de traction.

| Échantillon | N : eprv | EP(mm) | Larg (mm) | EP m (mm) | Larg m (mm) |
|-------------|----------|--------|-----------|--------------|---------------|
| plaque 1 | EP 1/1 | 2,8 | 21,56 | 2,726 | 21,66 |
| | EP 1/2 | 2,57 | 21,8 | | |
| | EP 1/3 | 2,7 | 21,35 | | |
| | EP 1/4 | 2,81 | 21,33 | | |
| | EP 1/5 | 2,75 | 22,26 | | |
| plaque 2 | EP 2/1 | 2,37 | 20,43 | 2,402 | 21 |
| | EP 2/2 | 2,43 | 20,92 | | |
| | EP 2/3 | 2,46 | 21,42 | | |
| | EP 2/4 | 2,26 | 21,45 | | |
| | EP 2/5 | 2,49 | 20,78 | | |
| plaque 3 | EP 3/1 | 1,87 | 22,34 | 1,922 | 21,34 |
| | EP 3/2 | 2,21 | 20,55 | | |
| | EP 3/3 | 1,86 | 21,5 | | |
| | EP 3/4 | 1,91 | 21,45 | | |
| | EP 3/5 | 1,76 | 20,86 | | |
| plaque 4 | EP 4/1 | 2,12 | 21,43 | 2,034 | 21,242 |
| | EP 4/2 | 2,02 | 21,68 | | |
| | EP 4/3 | 1,96 | 21,69 | | |
| | EP 4/4 | 2,09 | 20,44 | | |
| | EP 4/5 | 1,98 | 20,97 | | |
| plaque 5 | EP 5/1 | 2,27 | 20,78 | 2,444 | 20,97 |
| | EP 5/2 | 2,37 | 20,89 | | |
| | EP 5/3 | 2,94 | 21,67 | | |
| | EP 5/4 | 2,31 | 21,2 | | |
| | EP 5/5 | 2,33 | 20,31 | | |
| plaque 6 | EP 6/1 | 3,5 | 21,5 | 3,24 | 21,524 |
| | EP6/2 | 3,2 | 21,9 | | |
| | EP 6/3 | 3,1 | 21,77 | | |
| | EP 6/4 | 3,13 | 21,71 | | |
| | EP 6/5 | 3,27 | 20,74 | | |
| plaque 7 | EP 7/1 | 3,83 | 20,8 | 3,76 | 21,434 |
| | EP 7/2 | 3,63 | 21,89 | | |
| | EP 7/3 | 3,79 | 21,76 | | |
| | EP 7/4 | 3,88 | 20,9 | | |
| | EP 7/5 | 3,67 | 21,82 | | |
| plaque 8 | EP 8/1 | 3,87 | 20,88 | 3,766 | 20,824 |
| | EP 8/2 | 3,67 | 20,8 | | |
| | EP 8/3 | 3,69 | 20,76 | | |
| | EP 8/4 | 3,81 | 20,82 | | |
| | EP 8/5 | 3,79 | 20,86 | | |

| | | | | | |
|-----------|---------|------|-------|--------------|---------------|
| plaque 9 | EP 9/1 | 2,39 | 20,17 | 2,286 | 19,764 |
| | EP 9/2 | 2,25 | 19,2 | | |
| | EP 9/3 | 2,37 | 19,76 | | |
| | EP 9/4 | 2,23 | 20,49 | | |
| | EP 9/5 | 2,19 | 19,2 | | |
| plaque 10 | EP 10/1 | 4,25 | 20,17 | 3,93 | 20,244 |
| | EP 10/2 | 3,73 | 19,72 | | |
| | EP 10/3 | 3,57 | 20,64 | | |
| | EP 10/4 | 4,1 | 20 | | |
| | EP 10/5 | 4 | 20,69 | | |
| plaque 11 | EP 11/1 | 2,47 | 20,10 | 2,59 | 20,55 |
| | EP 11/2 | 2,43 | 20,51 | | |
| | EP 11/3 | 2,60 | 20,53 | | |
| | EP 11/4 | 2,68 | 20,86 | | |
| | EP 11/5 | 2,76 | 20,75 | | |
| plaque 12 | EP 12/1 | 2,05 | 19,64 | 2,27 | 20,01 |
| | EP 12/2 | 2,17 | 20,12 | | |
| | EP 12/3 | 2,30 | 20,14 | | |
| | EP 12/4 | 2,48 | 20,11 | | |
| | EP 12/5 | 2,37 | 20,03 | | |
| plaque 13 | EP 13/1 | 4,40 | 20,00 | 4,35 | 20,22 |
| | EP 13/2 | 4,37 | 20,38 | | |
| | EP 13/3 | 4,44 | 20,45 | | |
| | EP 13/4 | 4,17 | 20,05 | | |
| | / | / | / | | |

III.6.2 Essai de flexion 3 points:

Le type d'essais le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques et le comportement des matériaux composites est en fait la flexion. Ce choix correspond souvent aux sollicitations auxquelles sont soumises les pièces réelles, mais surtout offre l'avantage de diminuer considérablement les difficultés de réalisation de l'essai par l'utilisation d'éprouvettes simples sans avoir la difficulté du collage des étalons ni le problème rencontré lors du serrage des mors dans le cas des essais de traction (sur contraintes locales conduisant à des ruptures prématurées de l'éprouvette). De plus, selon que l'opérateur travaillera en flexion 3 points ou 4 points et, suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction-compression ou en cisaillement.

III.6.2.1 Principe d'essai :

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté. Il consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre, comme illustré à la figure III-15.

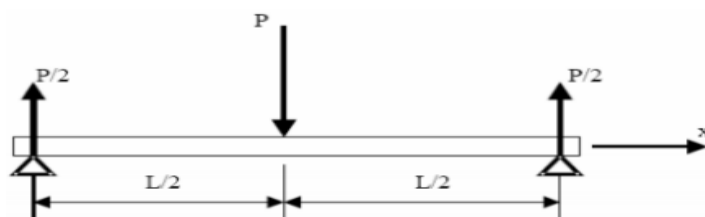


Figure III-15 : Essai de flexion 3 points.

II.6.2.2 Mécanisme de rupture :

Dans cet essai normalisé, trois types d'endommagement peuvent être rencontrés, dont deux seulement sont recevables : endommagement en traction et endommagement en compression. Ils sont liés à l'effet d'une flexion et donc permettent de quantifier la contrainte maximale. Si un endommagement de cisaillement est observé, alors cette quantification n'est plus possible, et on constate que les hypothèses de l'essai ne sont pas remplies. La rupture est due à la création et à la propagation de fissures, généralement localisées sur la fibre externe la plus sollicitée en extension figure III-16. Quand une contrainte locale devient égale à la résistance de cohésion de la matière, les liaisons interatomiques de cette région se rompent [6].

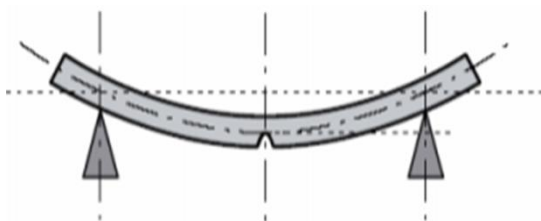


Figure III-16 : Localisation de la rupture.

III.6.2.3 Les Forme géométriques de l'éprouvette :

Les dimensions et la géométrie sont représentées sur la figure III.15 et le Tableau III.4

ASTMD-790-10

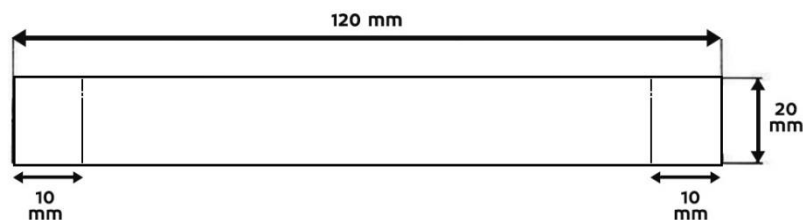
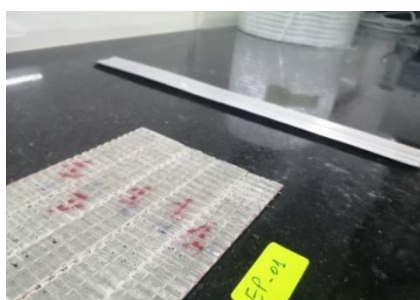


Figure III.15. Les dimensions des éprouvettes de flexion



48



Figure III.16: Epruvettes réalisées pour l'essai de flexion

Tableau III.4. Dimensions des éprouvettes de flexion

| | N :eprv | EP(mm) | Larg (mm) | EP m(mm) | Larg m (mm) |
|----------|----------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|
| plaque 1 | EP 1/1 | 2,09 | 20,43 | 2,20 | 20,31 |
| | EP 1/2 | 2,28 | 20,33 | | |
| | EP 1/3 | 2,17 | 19,44 | | |
| | EP 1/4 | 2,11 | 20,6 | | |
| | EP 1/5 | 2,36 | 20,77 | | |
| plaque 2 | EP 2/1 | 2,36 | 20,43 | 2,27 | 20,25 |
| | EP 2/2 | 1,86 | 19,62 | | |
| | EP 2/3 | 2,49 | 20,27 | | |
| | EP 2/4 | 2,28 | 20,42 | | |
| | EP 2/5 | 2,34 | 20,53 | | |
| plaque 3 | EP 3/1 | 1,74 | 20,82 | 1,90 | 20,44 |
| | EP 3/2 | 2,02 | 20,36 | | |
| | EP 3/3 | 1,91 | 20,25 | | |
| | EP 3/4 | 1,92 | 20,58 | | |
| | EP 3/5 | 1,89 | 20,2 | | |
| plaque 4 | EP 4/1 | 1,93 | 20,2 | 1,99 | 20,27 |
| | EP 4/2 | 1,92 | 20,77 | | |
| | EP 4/3 | 2,17 | 19,75 | | |
| | EP 4/4 | 2,02 | 20,06 | | |
| | EP 4/5 | 1,89 | 20,55 | | |
| plaque 5 | EP 5/1 | 2,53 | 20,63 | 2,49 | 20,34 |
| | EP 5/2 | 2,67 | 20,09 | | |
| | EP 5/3 | 2,17 | 20,52 | | |
| | EP 5/4 | 2,53 | 20,25 | | |
| | EP 5/5 | 2,56 | 20,23 | | |

| | | | | | |
|-----------|---------|------|-------|------|-------|
| plaque 6 | EP 6/1 | 3,1 | 20,84 | 3,37 | 20,49 |
| | EP6/2 | 3,4 | 20,42 | | |
| | EP 6/3 | 3,39 | 19,96 | | |
| | EP 6/4 | 3,39 | 20,76 | | |
| | EP 6/5 | 3,55 | 20,47 | | |
| plaque 7 | EP 7/1 | 4,18 | 20,64 | 4,25 | 20,59 |
| | EP 7/2 | 3,84 | 20,71 | | |
| | EP 7/3 | 4,5 | 20,38 | | |
| | EP 7/4 | 4,37 | 20,7 | | |
| | EP 7/5 | 4,35 | 20,51 | | |
| plaque 8 | EP 8/1 | 3,53 | 20,79 | 3,60 | 20,57 |
| | EP 8/2 | 3,88 | 20,66 | | |
| | EP 8/3 | 3,53 | 20,75 | | |
| | EP 8/4 | 3,45 | 20,51 | | |
| | EP 8/5 | 3,59 | 20,12 | | |
| plaque 9 | EP 9/1 | 2,26 | 19,35 | 2,25 | 20,19 |
| | EP 9/2 | 2,1 | 20,52 | | |
| | EP 9/3 | 2,33 | 20,55 | | |
| | EP 9/4 | 2,21 | 20,8 | | |
| | EP 9/5 | 2,33 | 19,74 | | |
| plaque 10 | EP 10/1 | 3,75 | 20,85 | 4,01 | 20,66 |
| | EP 10/2 | 4,1 | 20,65 | | |
| | EP 10/3 | 4,03 | 20,94 | | |
| | EP 10/4 | 4,31 | 20,47 | | |
| | EP 10/5 | 3,85 | 20,39 | | |



Figure III.17: Déroulement de l'essai de flexion.

CHAPITRE IV:
RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés sur un composite laminaire élaboré à la base d'une résine Orthophtalique et de la fibre de verre, Nous débuterons par la présentation des résultats de calcination pour déterminer les taux de fibres dans le composite. Nous analysons en suite les résultats des essais mécaniques notamment l'évolution des courbes contraintes-déformation (σ - ϵ) des éprouvettes lisses sollicitées en traction et flexion de flexion en 3 points.

IV.2. Détermination du taux de fibres

Les résultats obtenus suite à la calcination des éprouvettes de composite ont été reportés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1 : Taux de fibres pour les composites à 3, 4, 5 et 6 couches.

| Configuration | Poids avant calcination(g) | Poids après calcination(g) | Mf % | Mm % |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 1 [MAT] + 2 [FIBRE] | 3,212 | 1,335 | 41,56 | 58,44 |
| 1 [MAT] + 4 [FIBRE] | 3,865 | 2,114 | 54,70 | 45,30 |
| 2 [MAT] + 1 [FIBRE] | 2,711 | 1,049 | 38,69 | 61,31 |
| 2 [MAT] + 2 [FIBRE] | 2,841 | 1,579 | 55,58 | 44,42 |
| 2 [MAT] + 4 [FIBRE] | 5,301 | 2,405 | 45,37 | 54,63 |

A l'issue des essais de calcination on a regroupé résultats obtenus dans le tableau.IV.1. A la lumière de ces résultats, on constate qu'il y a une divergence du taux de fibres de verre pour les différentes laminaires. Cela peut être attribué à l'hétérogénéité des plaques composites à cause de la technique de mise en œuvre manuelle du matériau.

IV.3. Résultats des essais de traction :

IV.3.1 Influence de l'orientation des fibres :

Les résultats obtenus suite à une série d'essais mécaniques de traction réalisés pour deux types de 3 et 6 plis pour différentes orientations de fibres 0° , $\pm 45^\circ$ et 90° ont été représentés sous forme de courbes moyennes contraintes-déformation (σ - ϵ) ici-bas. La synthèse des résultats des propriétés mécaniques est présenté dans les histogrammes figure IV.7.

IV.3.1.1. Composites à 3 plis:

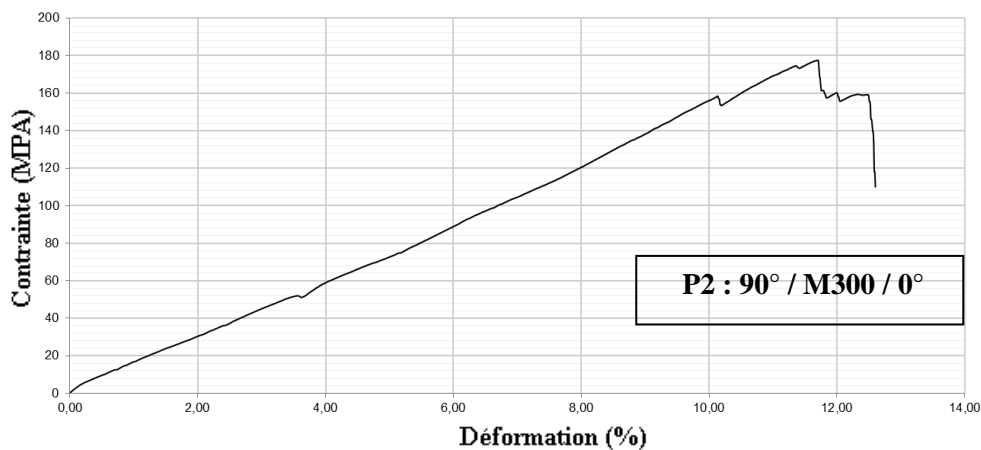


Figure IV-1 : Courbe moyenne en traction de la plaque 2

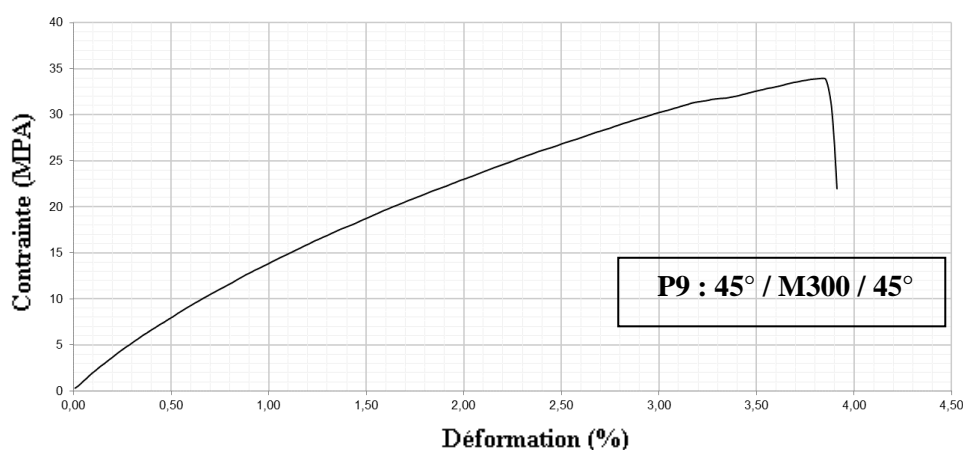
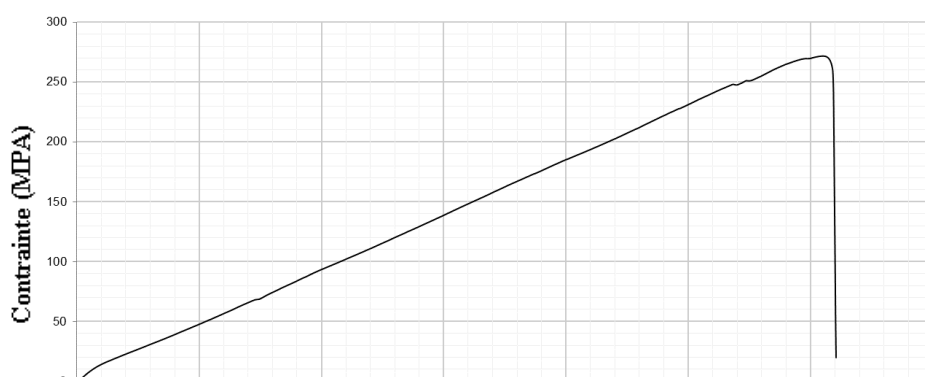


Figure IV-2 : Courbe moyenne en traction de la plaque 9



P11 : 90° / M300 / 90°

Déformation (%)

Figure IV-3: Courbe moyenne en traction de la plaque 11

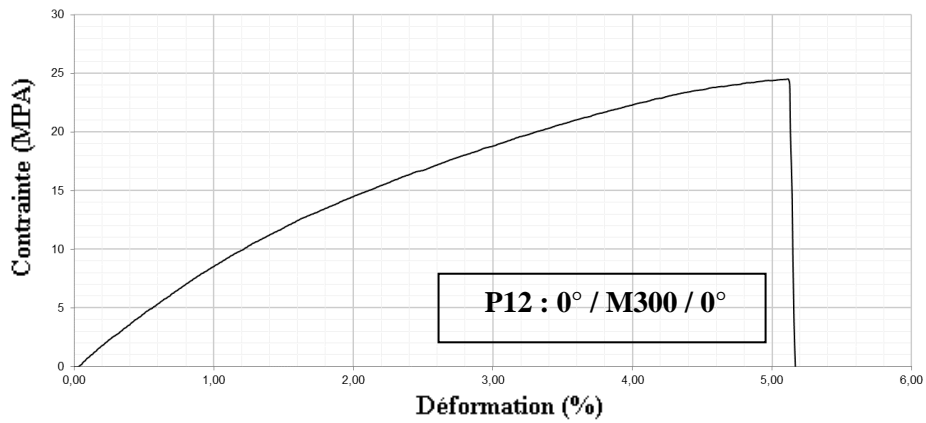


Figure IV-4: Courbe moyenne en traction de la plaque 12

IV.3.1.2 composites à 6 plis:

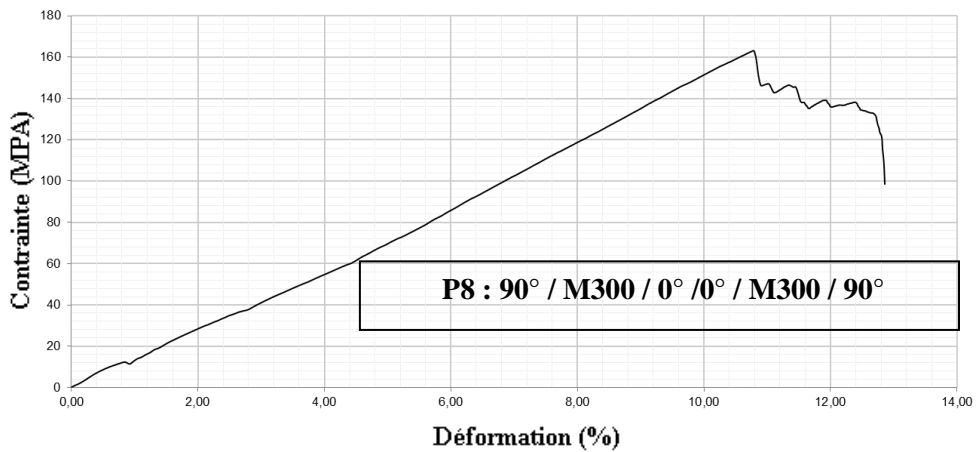
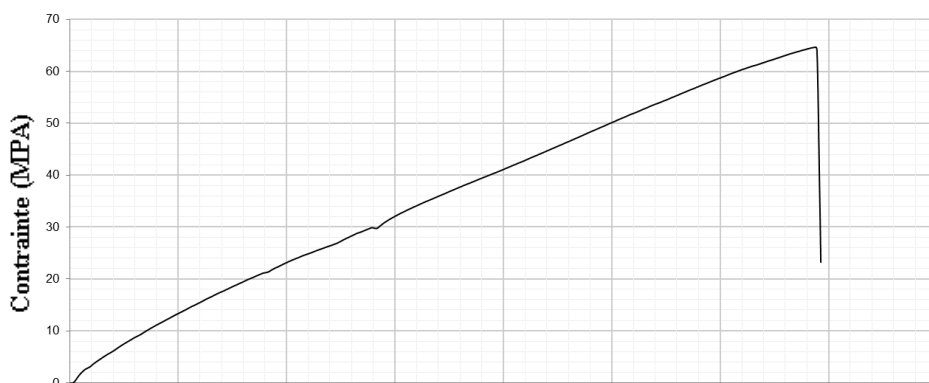


Figure IV-5: Courbe moyenne en traction de la plaque 8



P13 : -45° / M300 / +45° / +45° / M300 / -45°

Déformation (%)

Figure IV-6: Courbe moyenne en traction de la plaque 13

Les tableaux.IV.2 et tableaux IV.3 montrent une comparaison entre les essais expérimentaux de traction pour un matériau composite avec différents angles.

Tableau IV.2 : Résultats des propriétés mécaniques des 03 plis

| N° de plaque | configuration | $\sigma_{rup\ m}$ (MPa) | E m (MPa) |
|--------------|------------------|-------------------------|-----------|
| plaque 02 | 90° / M300 / 0° | 179.3 | 15,70 |
| plaque 09 | 45° / M300 / 45° | 32.01 | 8,05 |
| plaque 11 | 90° / M300 / 90° | 277.6 | 25,42 |
| plaque 12 | 0° / M300 / 0° | 25.87 | 6,79 |

Tableau IV.3 : Résultats des propriétés mécaniques des 06 plis

| N° de plaque | configuration | $\sigma_{rup\ m}$ (Mpa) | E m (MPa) |
|--------------|---|-------------------------|-----------|
| plaque 8 | 90° / M300 / 0° / 0° / M300 / 90° | 168,32 | 16,12 |
| plaque 13 | -45° / M300 / +45° / +45° / M300 / -45° | 53,01 | 8,06 |

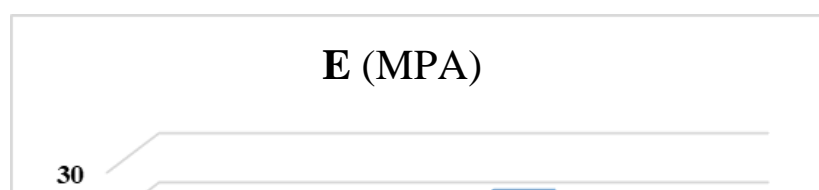
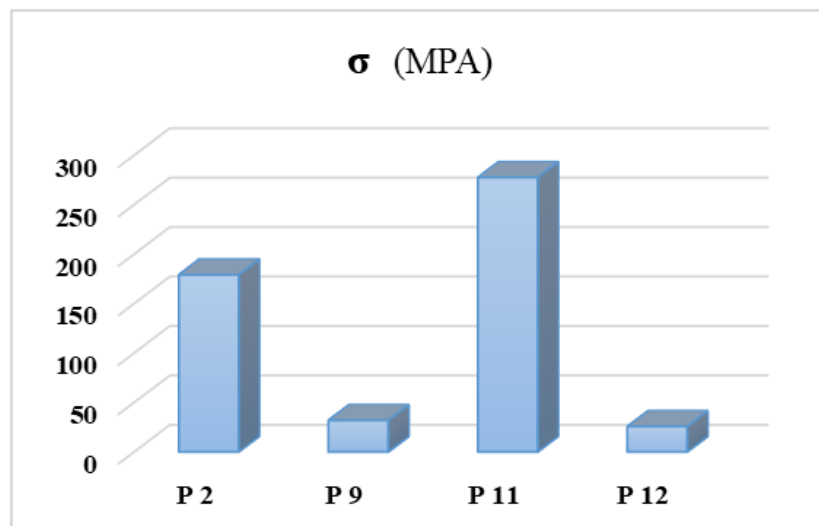


Figure IV.7 Histogramme des contraintes maximales et module d'Young pour (3plis)

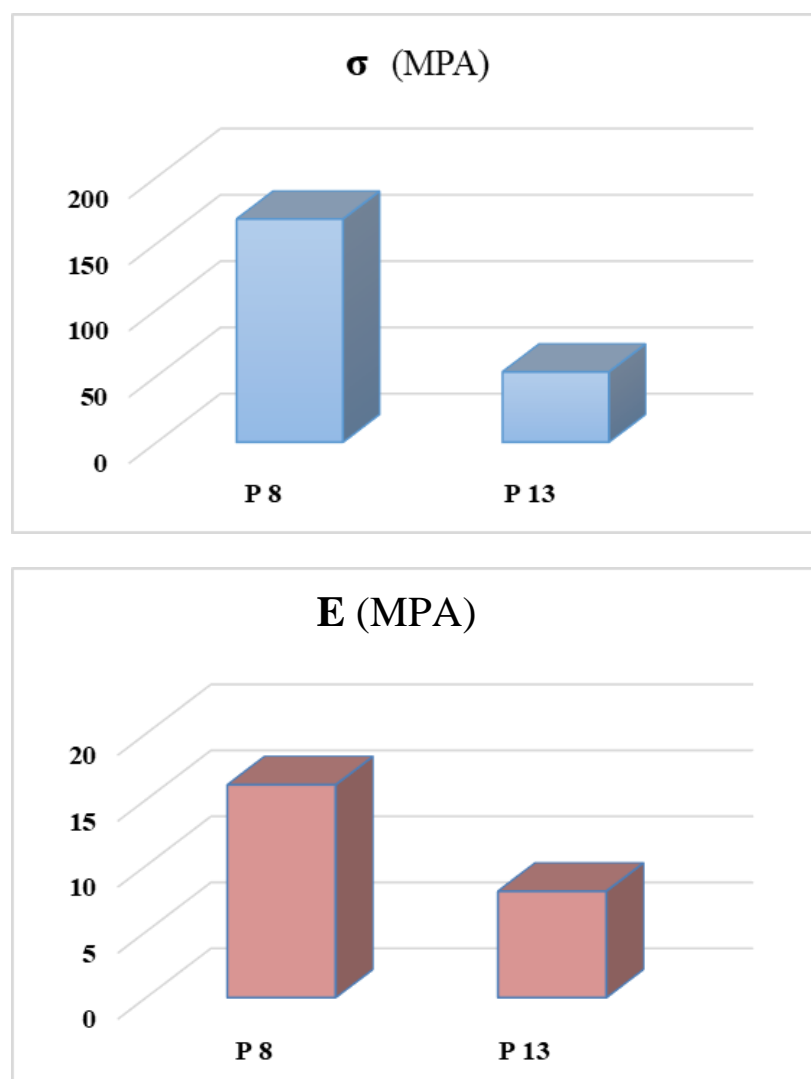


Figure IV.8 Histogramme des contraintes maximales et module d'Young pour (6plis)

À partir des résultats obtenus et des histogrammes récapitulatifs, on constate que la résistance maximale à la traction pour la plaque 11 avec une orientation des fibres de

90° est de 277,6 MPA avec un module d'Young de 25,42MPa et chute quand l'orientation des fibres est de 0° à 25,87 MPA avec $E = 6,79$ MPA dans le cas de la plaque 12, de plus les valeurs de R_{rup} et E pour la plaque 9 dont l'orientation des fibres est de 45° qui se trouve être une orientation moyenne par rapport à 0 et 90° sont de 32,01 MPA et 8,05MPa.

Pour la plaque 9 qui est une sorte de composite de configuration située entre la plaque 11 et la plaque 12, les résultats affichent 179,3 MPA et 15,70 MPA. ce qui est assez remarquable du moment que ce composite est formé seulement d'une couche orientée à 90° associée à une couche à 0° est capable de procurer des propriétés proches de celle de 2 couches à 90°.

IV.3.2. Influence du nombre de plis :

Compte tenu des résultats obtenus pour la plaque 8 et la plaque 13 qui sont regroupés dans les tableaux et histogrammes. On constate bien que la résistance maximale à la traction pour la plaque 8 qui est le double de la plaque 2 ; la valeur baisse à 168,32MPa sans effet sur le module d'Young qui est de 16,12 MPA. En ce qui concerne la plaque 13 qui est le double de la plaque 9, sa résistance maximale à la traction s'améliore légèrement vers 53,01MPa au lieu de 32.01MPa pour un module d'Young constant de $E = 8,06$ MPa.

A partir de ces valeurs on constate qu'il y a une faible influence du nombre de couches sur la résistance à la rupture et sans effet sur le module d'Young.

Synthèse :

Ces résultats sont liés à la capacité des fibres à résister aux charges affectives, ils reflètent bien l'influence du changement d'orientation sur les caractéristiques mécaniques du composite est permettent de conclure que l'augmentation de l'angle d'orientation contribue à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du composite laminaire formé de mat dans la couche médiane et de fibres multidirectionnels dans les couches périphériques. Alors que l'orientation des fibres est particulièrement importante dans les propriétés mécaniques du composite; les fibres continues alignées ont une résistance à la traction beaucoup plus élevée lorsqu'une charge est appliquée le long de la direction des fibres. Il y a une faible influence du nombre de couches sur la résistance à la rupture mais reste sans effet sur le module d'Young.

Il semble clairement que la capacité du matériau composite à supporter les contraintes est affectée par la technique d'élaboration, car cette capacité commence à diminuer avec la diminution de l'angle d'orientation de la fibre et avec l'augmentation du nombre de couches ce qui semble paradoxal.

IV.3.3 influence de la disposition des couches :

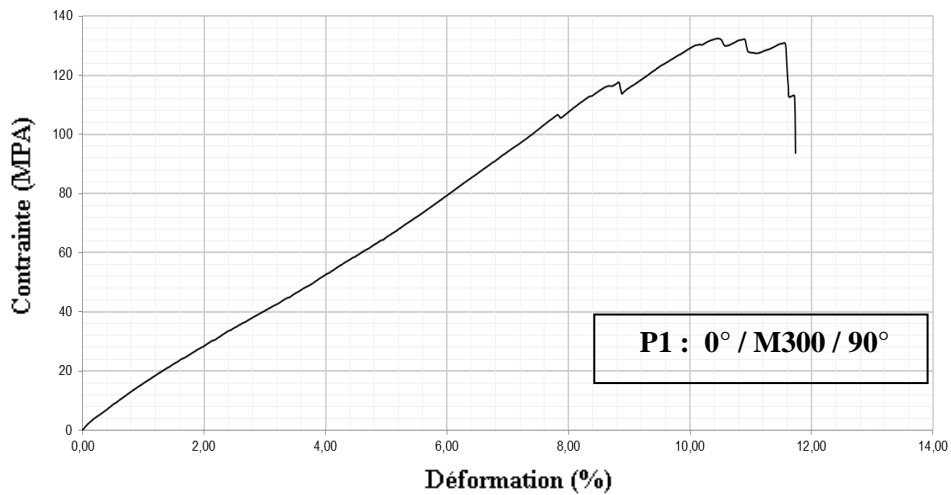


Figure IV-7: Courbe moyenne de traction de la plaque 1

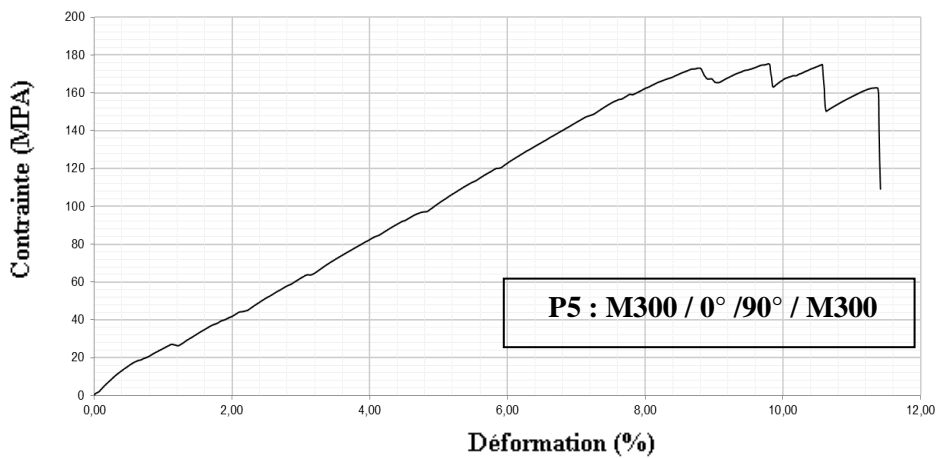


Figure IV-8: Courbe moyenne de traction de la plaque 5



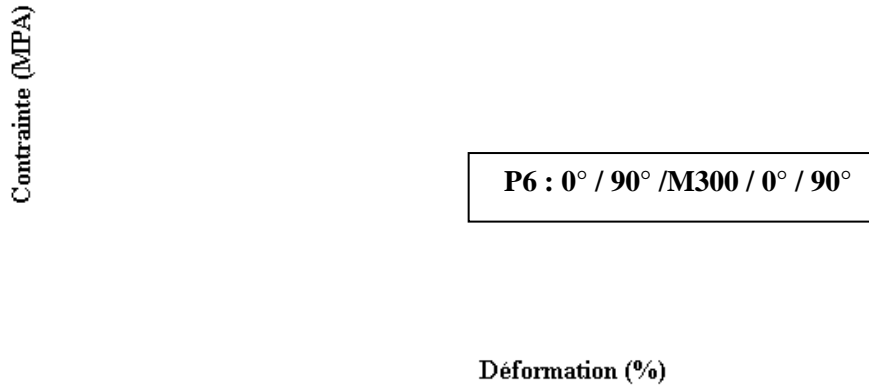


Figure IV-9: Courbe moyenne de traction de la plaque 6

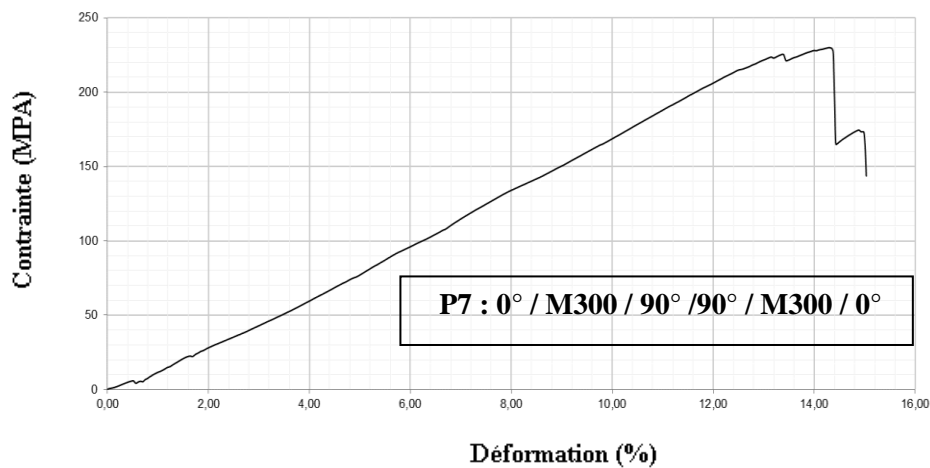


Figure IV-10: Courbe moyenne de traction de plaque 7

Tableau IV-4: résultats de traction selon la disposition des couches

| N° de plaque | configuration | $\sigma_{rup m}$ (Mpa) | E m (MPA) |
|--------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|
| plaque 1 | 0° / M300 / 90° | 130,12 | 13,79 |
| plaque 5 | M300 / 0° / 90° / M300 | 179,08 | 19,38 |
| plaque 6 | 0° / 90° / M300 / 0° / 90° | 207,58 | 16,38 |
| plaque 7 | 0° / M300 / 90° / 90° / M300 / 0° | 230,52 | 18,52 |

En inversant la position des couches par rapport au mat on constate que, pour la la plaque 1 ou le mat se situe au milieu et les couches de 0° et 90° sont de part et d'autre offre une résistance de 130.12MPa comparé à la plaque 5 ou les couches périphériques d'orientation des fibres de 0° / 90° et le mat au milieu avec la résistance maximale à la traction est de 179.08 MPa, ces valeurs encore améliorées pour la plaque 6 avec un mat

est à la périphérie et 2 couches avec l'orientation des fibres de $0^\circ / 90^\circ$ de part et d'autre avec une résistance maximale à la traction qui chute à 207.58MPa. Cette amélioration semble affecter la résistance mécanique uniquement et n'affecte pas le module d'Young.

IV.3.3.1. Influence du nombre de plis :

Compte tenu des résultats obtenus pour Par comparaison ente la résistance maximale à la traction de la plaque 1 qui est 130.12 MPA avec un module d'Young de 13.79MPa et la plaque 7 qui est le double de la plaque1 les valeurs 230,52 MPA avec $E=18.52$ MPA on constate que le nombre de couches améliore la résistance et le module d'Young.

IV.4. Résultats des essais de flexion :

IV.4.1 Influence de l'orientation des fibres :

Les résultats obtenus suite à une série d'essais mécaniques de flexion réalisés de 3 plis pour différentes orientations de fibres 0° , $\pm 45^\circ$ et 90° ont été représentés sous forme de courbes moyennes contraintes-déformation (σ - ϵ) ici-bas. La synthèse des résultats des essais mécaniques est présenté dans les histogrammes figure IV.14.

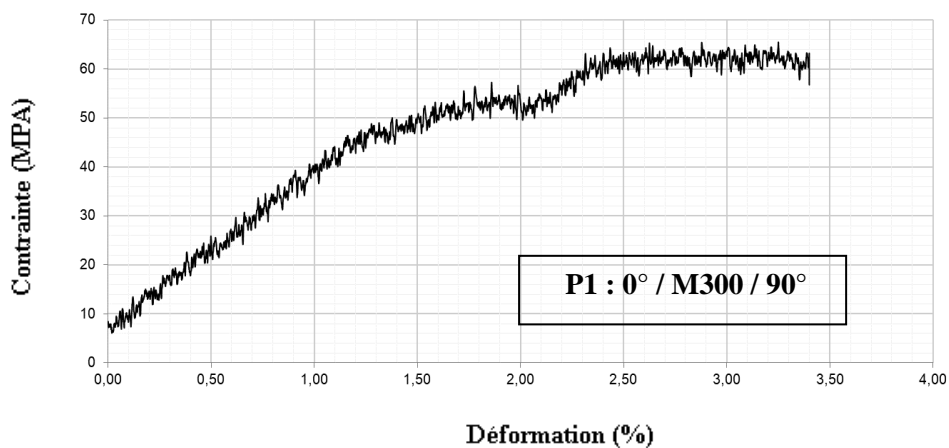


Figure IV-11 : Courbe moyenne en flexion de plaque 1

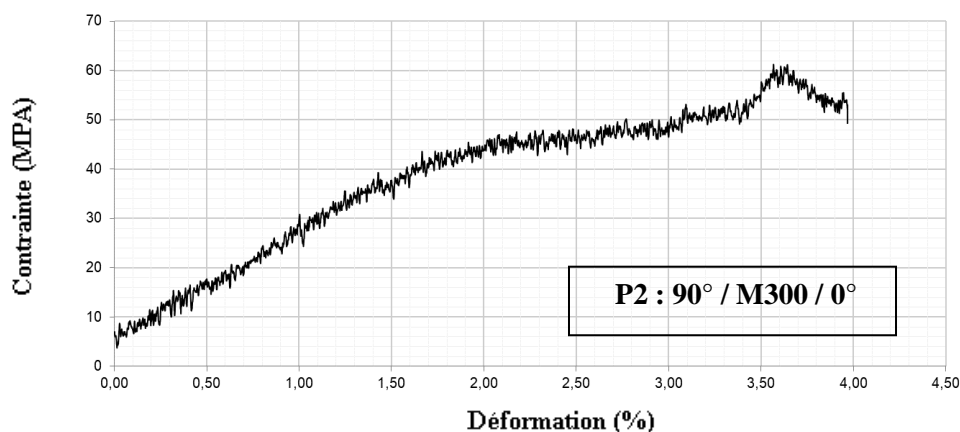


Figure IV-12 : Courbe moyenne en flexion de plaque 2

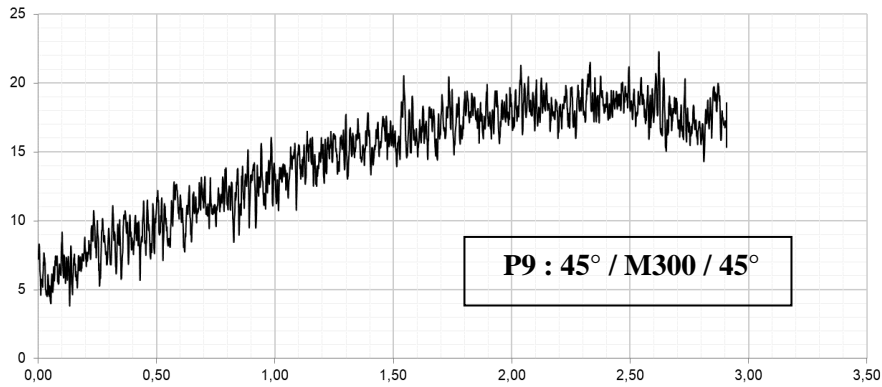


Figure IV-13 : Courbe moyenne en flexion de plaque 9

Le tableau.IV.5 montre une comparaison entre les essais expérimentaux de traction pour un matériau composite avec différents angles.

Tableau IV.5 : Résultats des propriétés mécaniques des 03 plis

| N° de plaque | configuration | $\sigma_{rup\ m}$ (MPa) | E_m (MPa) |
|--------------|------------------|-------------------------|-------------|
| plaque 01 | 0° / M300 / 90° | 64,44 | 34,001 |
| plaque 02 | 90° / M300 / 0° | 61,35 | 33,39 |
| plaque 09 | 45° / M300 / 45° | 22,77 | 12,56 |

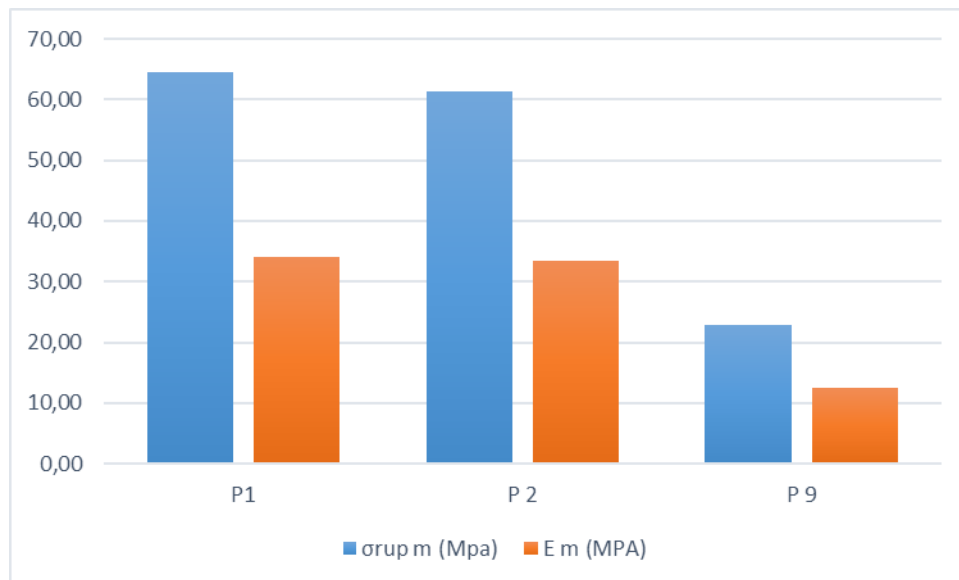


Figure IV.14 Histogramme des contraintes maximales et module d'Young.

À partir des résultats obtenus et des histogrammes récapitulatifs, on constate que la résistance maximale à la flexion pour la plaque 1 avec une orientation des fibres de 0° est de 64,44 MPA avec un module d'Young de 34 MPA et chute quand l'orientation des fibres est de 90° à 61,35 MPA avec $E= 33,39$ MPA dans le cas de la plaque 2, de plus les valeurs de R_{rup} et E pour la plaque 9 dont l'orientation des fibres est de 45° qui est une configuration moyenne par rapport aux orientation 0 et 90° sont de 22,77 MPA et 12,56 MPA.

IV.3.2 Résultats par rapport l'augmentation du nombre de couches :

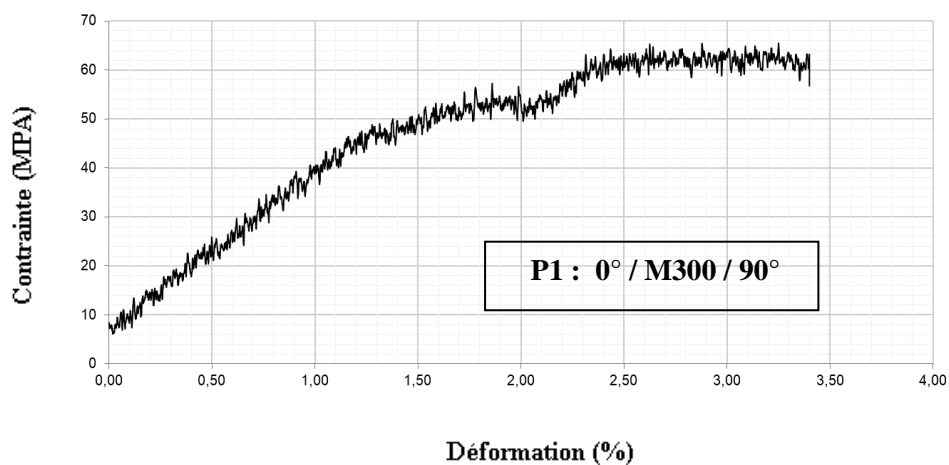


Figure IV-15: Courbe moyenne de traction de plaque 1

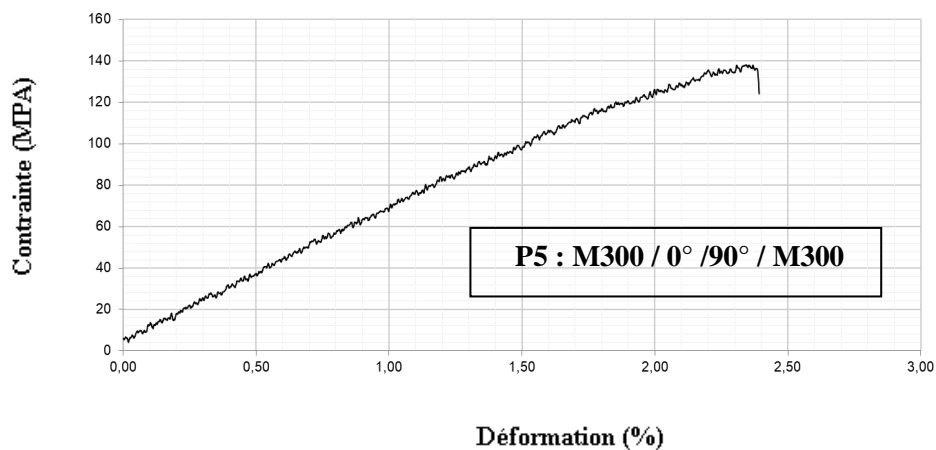
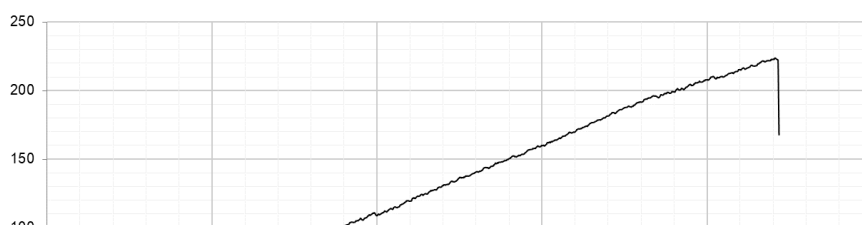


Figure IV-16: Courbe moyenne de traction de plaque 5



Contrainte (MPa)

P6 : 0° / 90° / M300 / 0° / 90°

Déformation (%)

Figure IV-17: Courbe moyenne de traction de plaque 6

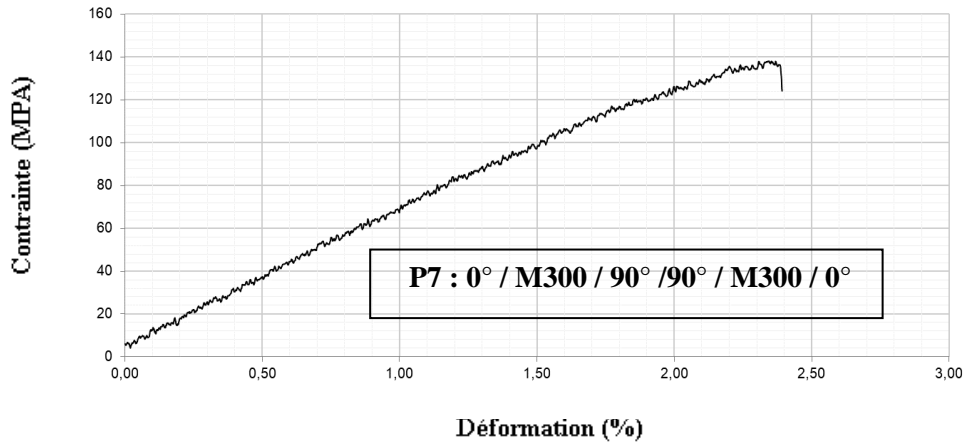


Figure IV-18: Courbe moyenne de traction de plaque 7

Le tableau IV.6 montre une comparaison entre les essais expérimentaux de flexion pour un matériau composite avec différents nombres de couches.

Tableau IV.6 : Résultats des propriétés mécaniques

| N° de plaque | configuration | Résistance à la flexion (Mpa) | E m (MPa) | Nbre de couches |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------------|
| plaque 1 | 0° / M300 / 90° | 64,44 | 34,001 | 3 |
| plaque 5 | M300 / 0° / 90° / M300 | 103,56 | 76,59 | 4 |
| plaque 6 | 0° / 90° / M300 / 0° / 90° | 220,62 | 113,13 | 5 |
| plaque 7 | 0° / M300 / 90° / 90° / M300 / 0° | 116,41 | 27,50 | 6 |

La plaque 1 avec une configuration hybride formée d'un mat disposé entre deux couches d'orientations de fibres distinctes entre 0° et 90° semble présenter les résultats les plus bas en ce qui concerne la résistance à la rupture et du module d'Young.

Par comparaison des résultats relatifs à la plaque 1 et la plaque 5, On constate que lorsque le mat est placé à la périphérie du composite et les résultats sont presque le double. Une nette amélioration de ces valeurs de l'ordre de 2 peut être apportée en ramenant ce mat au milieu entre deux couches de cette même configuration comme le cas de la plaque 6

La plaque 7 représente la résistance lorsqu'on dispose 2 couches identiques à la plaque 1. Dans ce cas (2 couches) les résultats sont plutôt logiques du moment qu'on double la résistance.

Bibliographie

- [1] **Manoj Kumar Buragohain**, « Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing », CRC Press taylor & francis group , pp. 3–4, 2017.
- [2] **J. M. Berthelot**, « Comportement mécanique et analyse des structures de matériaux composites », ISMANS, Le Mans, France.
- [3] **J. M. Berthelot**, « Comportement mécanique et analyse des structures de matériaux composites », Ed. Masson Paris (1996).
- [4] **CARMA** « Glossaire des matériaux composites », Actualisation octobre 2006, Composites, pp. 1–34, 2006
- [5] **M. BENAÏSSA**, « Comportement des matériaux composites aux choc », Université Abdelhamid ibn badis, Mostaganem, 2012.
- [6] **Ben hammouda, M. Lakhdari**, « Étude de l'influence du gradient de propriétés sur le comportement d'un matériau composite verre/époxy renforcé par des poudre » Ecole militaire polytechnique, Bordj el bahri, 2019 ,
- [7] **DJEBLOUN Youcef** , « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra , pp 3-4, 2018.
- [8] **J. Aboudi, S. Arnold, B. Bednarczyk**, « Micromechanics of Composite Materials », 2013.
- [9] **J.-L. Serré** , « Les matériaux composites », Matériaux Tech., vol. 53, no. 2, pp. 39–41, 1970.

- [10] **P. M. Aillerie, P. Jean, P. Charles**, « Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM », Université AbouBakr BELKAID de Tlemcen, 2010.
- [11] **Krishan K. Chawla**, « Composite Materials - Science and Engineering», Third Edition University of Alabama at Birmingham, Birmingham, AL 35294, USA , pp. 11–16 , 2011.
- [12] **S. BRAHIMI, S. BOUCHENEB**, « Détermination des propriétés physico mécaniques d' un matériau composite stratifié », Université de Bouira, 2016 .
- [13] **S. Abdeljalil and R. Nabil**, « Comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles (fibre de cactus) », 2013.
- [14] **B. BAKHOUCHE**, « Caractérisation d 'un matériau composite stratifié à fibre de verre / époxy en flexion 3 points statique », Université de Badji Moukhtar, Annaba, 2018.
- [15] **Marianne le Troedec** , « caractérisation des interactions physico-chimique dans un matériau composite à base phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques », thèse doctorat école science et technologies, université de Limoges, décembre 2009.
- [16] **BOUGHEDIRI Sara**, « Réalisation d'un nouveau matériau biocomposite à base de matrice résine », mémoire de master, université Mohamed Khider de Biskra, 2019. p.12.
- [17] **Nardin, M**, « Interfaces fibre-matrice dans les matériaux composites. Application aux fibres végétales », revue des composites et des matériaux avancés, 2006. p. 49.
- [18] **Khavandi, A**, Etude de la déformation non élastique de composites unidirectionnel verre-résine époxyde: prévision du comportement mécanique (module dynamique, fluage), 1997, Lyon, INSA.
- [19] **Nguyen, D.C**, Caractérisation de l'interface fibre/matrice: application aux composites polypropylène/chanvre, 2016, Troyes.
- [20] **BERBAIN, F., A. CHEVALIER, and C. Choudin**, Mise en œuvre des composites: Méthodes et matériels. Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, 1997(A3720): p. A3720. 1-A3720. 34.
- [21] **M, Sahir** , « Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite », Université du Maine, 2013.
- [22] **J. Payan**, « Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue », Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2004.
- [23] **Sandhyarani Biswas and Jasti A nurag** National Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Rourke la 769008, India 39-50
- [24] **Biswas, S., Deo, B., Patnaik, A., and Satapathy, A.** (2011). Effect of fiber loading and orientation on mechanical and erosion wear behaviors of glass-epoxy composites. *Polymer Composites* 32 (4): 665–674.

- [25] **Mishra, V. and Biswas, S.** (2016). Three-body abrasive wear behavior of short jute fiber reinforced epoxy composites. *Polymer Composites* 37 (1): 270–278.
- [26] **Fong, T.C., Saba, N., Liew, C.K.** et al. (2015). Yarn flax fibres for polymer-coated sutures and hand layup polymer composite laminates. In: *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, 155–175. Cham: Springer.
- [27] **Garcia, E.J., Wardle, B.L., John Hart, A., and Yamamoto, N.** (2008). Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ. *Composites Science and Technology* 68 (9): 2034–2041.
- [28] **Sapuan, S.M. and Maleque, M.A.** (2005). Design and fabrication of natural woven fabric reinforced epoxy composite for household telephone stand. *Materials and Design* 26 (1): 65–71.
- [29] **Sapuan, S.M., Harun, N., and Abbas, K.A.** (2007). Design and fabrication of a multipurpose table using a composite of epoxy and banana pseudostem fibres. *Journal of Tropical Agriculture* 45 (1–2): 66–68.
- [30] **Banakar, P., Shivananda, H.K., and Niranjana, H.B.** (2012). Influence of fiber orientation and thickness on tensile properties of laminated polymer composites. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology* 9 (1): 61.
- [31] **Misri, S., Leman, Z., Sapuan, S.M., and Ishak, M.R.** (2010). Mechanical properties and fabrication of small boat using woven glass/sugar palm fibres reinforced unsaturated polyester hybrid composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 11 (1): 1–13.
- [32] **Chowdhury, F.H., Hosur, M.V., and Jeelani, S.** (2007). Investigations on the thermal and flexural properties of plain weave carbon/epoxy-nanoclay composites by hand-layup technique. *Journal of Materials Science* 42 (8): 2690–2700.
- [33] **Mecheb Ismail** «Etude des structures composites en utilisant les théories d'ordre élevé sous chargement thermomécanique» Thèse de Doctorat de l'université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2008.
- [34] **Bennai Riadh** «Contribution à l'étude de la vibration et la stabilité des structures fonctionnellement graduées» Thèse de Doctorat de Université Hassiba Ben Bou Ali de Chlef, 2016.
- [35] **Benatta Mohamed Atef** « Contribution du phénomène de gauchissement dans les poutres courtes en FGM par les théories d'ordre élevé » Thèse de Doctorat de l'université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [36] **Zine ali** « Modélisation d'une plaque rectangulaire en composite en vibration sous effet thermique avec variation linéaire d'épaisseur » Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Doctorale de la Mécanique & Ingénierie des Systèmes, de l'université de M'hamed Bougara Boumerdes, 2011.

[37] **Aguib Salah** « Identification des propriétés dynamiques et simulation du comportement vibratoire des plaques en matériaux composites adaptatifs » Thèse de Doctorat de l'université de M'hamed Bougara-Boumerdes, 2014.

[38] **Berthelot J.** Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures. 2e ed. Paris:Masson; 1996.

[39] **Bloomfield MW, Herencia JE, Weaver PM.** Analysis and benchmarking of meta-heuristic techniques for lay-up optimization. *Comput. Struct.* 2010;88:272–282.

[40] Publication details, including instructions for authors and subscription information: <http://www.tandfonline.com/loi/tacm20>

Conclusion générale :

Le polymère renforcé de fibres FRP sont des matériaux composites constitués d'une matrice polymère renforcée de fibres. Ces matériaux composites sont très réputés pour leur utilisation dans des applications d'ingénierie à cause de leurs propriétés mécaniques très satisfaisantes du point de vue rapports résistance élevés / poids et rigidité / poids en plus de résistance à la corrosion et le bel aspect.

Le but poursuivi dans ce modeste travail et présenté dans ce mémoire est l'élaboration d'un matériau composite laminaire c'est-à-dire un stratifié multicouches à base de résine Orthophtalic comme matrice et Le renfort sous forme de fibres de verre type A pour l'élaboration des couches multi angles et E-glass pour le mat.

Des plaques en composite de diverses configurations ont été préparés et des échantillons de traction et de flexion ont été réalisés par découpage à l'aide d'une scie à disque de diamant. Des essais mécaniques de traction et de flexion ont été menés. À la lumière des résultats obtenus et après analyse les conclusions tirées sont comme suit :

- Il y a une influence du changement d'orientation sur les caractéristiques mécaniques du composite de manière que l'augmentation de l'angle d'orientation contribue à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du composite laminaire

formé de mat dans la couche médiane et de fibres multidirectionnels dans les couches périphériques.

- Il y a une influence du nombre de couches sur la résistance à la rupture
- La technique d'élaboration affecte négativement la capacité du matériau composite à supporter les contraintes, car cette capacité commence à diminuer avec la diminution de l'angle d'orientation de la fibre et avec l'augmentation du nombre de couches.

- une amélioration significative de la résistance à la rupture est obtenue en disposant des couches de fibres à orientations différentes $0^\circ / 90^\circ$ de part et d'autre par rapport au mat à la couche médiane mais l'amélioration n'affectera pas le module d'Young.