

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

DÉPARTEMENT DE GENIE MÉCANIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULÉ

**Comportement mécanique d'un matériau composite stratifié à
fibres de verre tressés en taffetas et résine époxyde en flexion trois
(03) points statique**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PRÉSENTÉ PAR : ATTAB ABDERRAHMANE

ENCADREUR : Pr. BEY. Kamel

CO-ENCADREUR : Mr. BOULKRA. Mohamed

DEVANT LE JURY

Président :	Pr. BEY. Kamel	UNIVERSITE D'ANNABA
Membres :	Dr. BENAMIRA. M	UNIVERSITE D'ANNABA
	Dr. CHEMAMI. A	UNIVERSITE D'ANNABA
	Dr. BOUARICHA. A	UNIVERSITE D'ANNABA
	Pr. HAIAHEM. A	UNIVERSITE D'ANNABA

Année : 2018/2019

Remerciements

Je remercie Allah tout-puissant qui m'a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de fin d'études.

En premier lieu, je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mon encadreur Pr. BEY. Kamel pour la confiance, les encouragements et les précieux conseils qu'il m'a accordés durant ce travail.

Je tiens à remercier vivement Monsieur BOULKRA Mohamed Chercheur à l'unité de recherche en matériaux avancés URMA/CRTI Annaba, pour avoir contribué à la formulation du thème, son assistance son accueil et le partage de son expérience durant la durée d'essais. Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du laboratoire de recherche en matériaux avancés d'une manière générale.

Je tiens également à remercier le Dr. BENAMIRA M., Dr. CHEMAMI, A., Dr. BOUARICHA, A., et le Pr. HAIHAEM. A., pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes remerciements les plus s'adressent à ma mère et mon père qui a beaucoup sacrifié pour que puisse atteindre mon but, celui de réaliser ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant toutes mes années d'études,

Toute ma famille,

Tous mes amis qui m'ont partagés mes soucis,

Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et tous les employés de l'administration de département de Génie Mécanique.

Résumé

Ce travail a pour but d'abord de rechercher toute la littérature concernant les matériaux composites à savoir notamment leurs composants de base avec leurs caractéristiques, leurs modes de fabrication ainsi que leurs domaines d'utilisation. Le comportement mécanique des matériaux composites stratifiés sous différentes sollicitations et particulièrement en flexion trois (03) points statique ainsi que leurs endommagements, sont mis en exergue dans le but d'une approche expérimentale.

Les résultats expérimentaux du comportement mécanique des stratifiés à fibres de verre tressés en taffetas et résine époxyde sollicités en flexion trois (03) points statique, ont mis en évidence un comportement linéaire élastique suivi d'une dégradation brusque ce qui dénote fortement la rigidité de ces stratifiés.

Ainsi, différents mécanismes et modes d'endommagements sont induits : la fissuration de la matrice et la rupture des fibres ainsi que le délaminage des plis stratifiés.

Mots clés : stratifiés, fibres, matrice, flexion trois (03) points statique, comportement, endommagement.

Abstract

This work has for goal first of all to search all the literature concerning composite materials, namely their basic components with their characteristics, their manufacturing methods as well as their areas of use. The mechanical behavior of stratified composite materials under different stresses and particularly in bending three (03) static points and their damages, are highlighted for the purpose of an experimental approach.

The experimental results of the mechanical behavior of the glass fiber laminates braided in taffeta and epoxy resin bent three (03) static points revealed an elastic linear behavior followed by a sudden degradation which strongly indicates the rigidity of these laminates.

Thus, different mechanisms and modes of damage are induced : the cracking of the matrix and the rupture of the fibers as well as the delamination of the stratified folds.

Key words : laminates, fibers, matrix, bending three (03) points static, behavior, damage.

ملخص

يهدف هذا العمل أولاً وقبل كل شيء إلى البحث في جميع الأدبيات المتعلقة بالمواد المركبة، أي مكوناتها الأساسية بخصائصها وطرق تصنيعها وكذلك مناطق استخدامها. يتم تسليط الضوء على السلوك الميكانيكي للمواد المركبة الطبقية تحت ضغوط مختلفة وخاصة في الانحناء ثلاثي (03) النقط في حالة السكون بالإضافة إلى أضرارها، وذلك بغرض إتباع نهج تجريبي.

كشفت النتائج التجريبية للسلوك الميكانيكي للرقائق المصنوعة من الألياف الزجاجية المصفورة في شكل تافنا ومصفوفة الإيبوكسي المعرضة للانحناء ثلاثي (03) النقط في حالة السكون حيث أوضحت سلوك خطي مرن يتبعه تدهور مفاجئ مما يشير إلى صلابة هذه الرقائق.

وبالتالي، أدت إلى إحداث آليات وطرق مختلفة من الضرر : تكسير المصفوفة والألياف وكذلك التثوه بين الطيات.

الكلمات المفتاحية : رقائق، ألياف، مصفوفة، انحناء ثلاثي (03) النقط في حالة السكون، سلوك، ضرر.

Table des matières

Introduction générale

Introduction	02
--------------------	----

Chapitre 1 : Étude bibliographique

1. Généralités sur les matériaux composites	05
1.1 Historique	05
1.2 Définition	06
1.3 Caractéristiques générales	06
1.4 Classification des matériaux composites	06
1.4.1 Classification suivant la forme des constituants	06
1.4.1.1 Composites à fibres	07
1.4.1.2 Composites à particules	07
1.4.2 Classification suivant la nature des constituants	07
1.4.2.1 Composites à matrice organique	07
1.4.2.2 Composites à matrice métallique	08
1.4.2.3 Composites à matrice minérale	08
1.4.3 Classification suivant la performance et la diffusion	08
1.4.3.1 Composites à grandes diffusions (GD)	08
1.4.3.2 Composites à hautes performances (HP)	08
1.5 Éléments constitutifs d'un matériau composite	08
1.5.1 Matrice (Résine)	09
1.5.1.1 Résines thermodurcissables	10
A) Résines polyesters	10
B) Résines de condensation	10
C) Résines époxydes	10
1.5.1.2 Résines thermoplastiques	11

1.5.1.3	Résines thermostables	12
1.5.1.4	Résines naturelles	12
1.5.2	Renforts (Fibres) et tissus	13
1.5.2.1	Formes commerciales des renforts fibres	13
A)	Formes linéiques	13
B)	Formes surfaciques	13
1.5.2.2	Principales fibres	16
A)	Fibre de verre	16
B)	Fibre de carbone	20
C)	Fibres aramides	20
D)	Fibres céramiques	20
E)	Fibres synthétiques thermostables	21
F)	Autres fibres	21
1.5.3	Charges et additifs	21
1.5.3.1	Charges	21
A)	Charges renforçantes	21
B)	Charges non renforçantes	21
1.5.3.2	Additifs	22
1.6	Mise en œuvre des matériaux composites	22
1.6.1	Moulages sans pression	22
1.6.1.1	Moulage au contact	22
1.6.1.2	Moulage par projection simultanée	22
1.6.2	Moulage sous vide	23
1.6.2.1	Principe	23
1.6.2.2	Avantages	23
1.6.2.3	Inconvénients	24
1.6.3	Moulage par compression	24
1.6.3.1	Moulage par injection de résine	24
1.6.3.2	Moulage par compression à froid	24

1.6.3.3	Moulage par compression à chaud	25
1.6.3.4	Moulage par injection	25
1.6.4	Moulage en continu	25
1.6.5	Moulage par pultrusion	26
1.6.6	Moulage par centrifugation	27
1.6.7	Moulage par enroulement filamentaire	27
1.7	Structure des matériaux composites	27
1.7.1	Monocouches	27
1.7.2	Stratifiés	28
1.7.2.1	Orientations normalisées	29
1.7.2.2	Angles positifs et négatifs	29
1.7.3	Sandwiches	30
1.7.3.1	Avantages et inconvénients	30
1.8	Loi de mélange pour les composites stratifiés	30
1.9	Avantages et inconvénients des matériaux composites	31
1.9.1	Avantages	31
1.9.2	Inconvénients	32
1.10	Applications commerciales et industrielles des matériaux composites	32
1.11	Environnement	33

Chapitre 2 : Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

2.1	Théorie des poutres stratifiées sollicitées en flexion trois (03) points	35
2.1.1	Principe d'essai de flexion trois (03) points	35
2.1.2	Mécanisme de rupture	36
2.1.3	Machines de flexion	36
2.1.4	Application à la flexion trois (03) points	37

2.2	Analyse du comportement mécanique	39
2.2.1	Constitution d'un matériau composite unidirectionnel	40
2.2.2	Caractéristiques du mélange renfort-matrice	40
2.2.3	Composition du composite (fibre, matrice)	41
2.2.3.1	Fractions volumiques et massiques	41
A)	Fractions massiques	41
B)	Fractions volumiques	41
C)	Présence de porosités	42
2.2.4	Calcul des caractéristiques mécaniques de composite	43
2.2.4.1	Modules d'élasticité	43
A)	Module de cisaillement	43
B)	Module de compressibilité	44
C)	Module de compression latérale	44
D)	Modules d'Young longitudinal	44
E)	Coefficient de Poisson longitudinal	46
F)	Module de cisaillement longitudinal	47
G)	Module de compression latéral	48
H)	Module de cisaillement transversal	49
I)	Module d'Young transversal	50
2.3	Rupture et endommagement des matériaux composites	52
2.3.1	Divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel	52
2.3.1.1	Rupture des fibres	52
2.3.1.2	Rupture de la matrice	53
2.3.1.3	Décohésion fibre-matrice	54
2.3.1.4	Rupture des stratifiés	55
2.3.2	Critères de rupture	56
2.3.3	Observations des mécanismes de rupture	57
2.3.3.1	Observation par microscopie	57

Chapitre 3 : Étude expérimentale (Essai en flexion trois (03) points statique)

3.1	Position du problème	59
3.2	Caractéristiques mécaniques du stratifié étudié	59
3.3	Pyrolyse de matériau étudié	59
3.3.1	Découpage des échantillons avant pesage	60
3.3.2	Pesage et calcination des échantillons	60
3.3.3	Détermination de la perte de résine par calcination, taux de résine en pour cent, et taux de fibres de verre en pour cent	63
3.3.4	Détermination de la fraction massique	64
3.3.5	Détermination de la fraction volumique	65
3.3.6	Détermination des modules d'élasticité	66
3.3.6.1	Modules des fibres et de la matrice	66
A)	Pour les fibres	67
B)	Pour la matrice	68
3.3.6.2	Module d'élasticité longitudinal	69
3.3.6.3	Coefficient de poisson longitudinal	69
3.3.6.4	Module de cisaillement longitudinal	70
3.3.6.5	Module de compression latérale	70
3.3.6.6	Module de cisaillement transversal	70
3.3.6.7	Module d'élasticité transversal	71
3.4	Essais mécaniques	71
3.4.1	Préparation et découpage des éprouvettes d'essais	71
3.4.2	Bancs d'essais/conditions expérimentales	72
3.4.3	Éprouvettes d'essais	73
3.4.4	Mise en place des éprouvettes	73
3.4.5	Éprouvettes après la déformation	75
3.5	Courbes de comportement en flexion trois (03) points statique	76

3.6	Interprétation des résultats obtenus	78
3.6.1	Calcul de la contrainte à la rupture et modules d'élasticité en flexion trois (03) points statique	79
3.6.1.1	Calcul de la contrainte à la rupture	79
3.6.1.2	Calcul du module d'élasticité	79
A)	Calcul de $\Delta F / \Delta \delta$	79
B)	Calcul de E_f	80
3.7	Analyse des résultats au point de vue comportement	81
3.8	Observation des faciès de rupture après essais en flexion trois (03) points statique	82
3.9	Interprétation des résultats au point de vue endommagement	84

Conclusion générale

Conclusion	86
------------------	----

Références bibliographiques

Bibliographie	88
---------------------	----

Annexe

Annexe	91
--------------	----

Table des figures

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Figure 1.1 : Arc sino-mongol	05
Figure 1.2 : Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants	07
Figure 1.3 : Constituants d'un matériau composite	09
Figure 1.4 : Classification des types de résines	09
Figure 1.5 : Chaîne et trame d'un tissu	14
Figure 1.6 : Différentes armures classiques utilisées	15
Figure 1.7 : Structures tissées multidirectionnelles	16
Figure 1.8 : Classification des renforts	16
Figure 1.9 : Fibre de verre	17
Figure 1.10 : Schéma d'élaboration des fibres de verre	19
Figure 1.11 : Fibre de carbone	20
Figure 1.12 : Fibre aramide	20
Figure 1.13 : Principe du moulage au contact	22
Figure 1.14 : Principe du moulage par projection simultanée	23
Figure 1.15 : Principe du moulage sous vide	23
Figure 1.16 : Moulage par injection de résine	24
Figure 1.17 : Principe du moulage par compression à froid	24
Figure 1.18 : Principe du moulage par compression à chaud	25
Figure 1.19 : Moulage par injection	25
Figure 1.20 : Moulage en continu de plaques	26
Figure 1.21 : Moulage en continu de panneaux ondulés	26
Figure 1.22 : Moulage par pultrusion	26
Figure 1.23 : Moulage par centrifugation	27
Figure 1.24 : Pli unidirectionnelle	28

Figure 1.25 : Plaque stratifiée	28
Figure 1.26 : Désignation d'un stratifié	29
Figure 1.27 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés	29
Figure 1.28 : Composite sandwich	30
Figure 1.29 : Planches de ski	32
Figure 1.30 : Boeing 787 50% de composite	33

Chapitre 2 : Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Figure 2.1 : Flexion trois (03) points	35
Figure 2.2 : Localisation de la rupture	36
Figure 2.3 : Machine universelle de flexion	36
Figure 2.4 : Sollicitation d'une poutre en flexion 3-points	37
Figure 2.5 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite	39
Figure 2.6 : Composite unidirectionnel	40
Figure 2.7 : Schéma d'un pli de composite unidirectionnel	40
Figure 2.8 : Schéma simplifié d'une traction longitudinale	44
Figure 2.9 : Schéma par couches d'une traction longitudinale	46
Figure 2.10 : Schéma par couches d'un essai de cisaillement longitudinal	47
Figure 2.11 : Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre	48
Figure 2.12 : Modèle cylindrique à trois phases	49
Figure 2.13 : Schématisation par couches d'un composite unidirectionnel	50
Figure 2.14 : Rupture de fibre	53
Figure 2.15 : Rupture transverse de la matrice	53
Figure 2.16 : Rupture longitudinale de la matrice	54
Figure 2.17 : Décohésion fibre-matrice	54
Figure 2.18 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés	56
Figure 2.19 : Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone	57

Chapitre 3 : Étude expérimentale (Essai en flexion trois (03) points statique)

Figure 3.1 : Échantillons après la découpe	60
Figure 3.2 : Balance électronique	61
Figure 3.3 : Four à moufle	61
Figure 3.4 : Échantillons dans un four à moufle	62
Figure 3.5 : Échantillons après la calcination	62
Figure 3.6 : Plis du matériau étudié	63
Figure 3.7 : Dimensions de l'éprouvette	71
Figure 3.8 : Machine universelle MTS 43	72
Figure 3.9 : Éprouvettes d'essais	73
Figure 3.10 : Mise en place de l'éprouvette	74
Figure 3.11 : Déformation de l'éprouvette	74
Figure 3.12 : Vue de face de l'éprouvette après la déformation	75
Figure 3.13 : Vue de coté de l'éprouvette après la déformation	75
Figure 3.14 : Courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion trois (03) points statique du stratifié	76
Figure 3.15 : Courbe moyenne de comportement expérimental charge-déplacement en flexion trois (03) points statique du stratifié	76
Figure 3.16 : Courbes de comportement expérimental contrainte-déformation en flexion trois (03) points statique du stratifié	77
Figure 3.17 : Courbe moyenne de comportement expérimental contrainte-déformation en flexion trois (03) points statique du stratifié	77
Figure 3.18 : Microscope optique	82
Figure 3.19 : Rupture de la matrice et de fibres	83
Figure 3.20 : Rupture de la matrice	83
Figure 3.21 : Rupture de fibres	84

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Étude bibliographique

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables	10
Tableau 1.2 : Caractéristiques mécaniques générales de la résine époxyde	11
Tableau 1.3 : Principales caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques ...	12
Tableau 1.4 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	17

Chapitre 3 : Étude expérimentale (Essai en flexion trois (03) points statique)

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques de la résine époxyde	59
Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques de fibre de verre	59
Tableau 3.3 : Caractéristiques géométriques des échantillons	60
Tableau 3.4 : Taux de résine et taux de fibres de verre (%)	64
Tableau 3.5 : Résultats obtenus de la pyrolyse du stratifié	65
Tableau 3.6 : Calcul de la fraction volumique	66
Tableau 3.7 : Modules d'élasticité des fibres de verre	67
Tableau 3.8 : Modules d'élasticité de la matrice	68
Tableau 3.9 : Caractéristiques mécaniques du matériau étudié (Stratifié en taffetas) ...	71
Tableau 3.10 : Dimensions des éprouvettes	73
Tableau 3.11 : Résultats obtenus des courbes	78
Tableau 3.12 : Calcul de $\Delta F / \Delta \delta$	80
Tableau 3.13 : Contrainte à la rupture et module d'élasticité en flexion trois (03) points	81

Introduction générale

Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs ou des constructeurs. Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de ces matériaux. En effet, on a créé des nouvelles associations de ces matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite.

En outre, 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.

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 par rapport aux métaux comme l'aluminium ou l'acier, ce qui fait ces matériaux composites, une classe de matériaux de plus en plus prisée dans le domaine aéronautique.

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 propriétés mécaniques requises, la résistance à la chaleur ou à l'eau, ou même la méthode de mise en œuvre.

Il n'est plus à démontrer l'engouement et l'innovation créés par les matériaux composites dans les secteurs de la construction et du transport. Les matériaux composites répondent parfaitement à ces critères, et le large choix des constituants nécessaires à leur élaboration ouvre un vaste spectre de propriétés mécaniques.

Introduction générale

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 cette étude nous présentons une recherche bibliographique et les résultats expérimentaux du comportement mécanique en statique des stratifiés à fibres de verre tressés en taffetas et résine époxyde sollicités en flexion trois (03) points statique. Ainsi, une observation des faciès de rupture du matériau étudié.

Chapitre 1

Étude bibliographique

1. Généralités sur les matériaux composites

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites, etc. Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont tous temps été utilisés par l'homme, citons par exemple le bois, le béton et le béton armé.

Un des objectifs de ce premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constituants, de leurs propriétés et de leurs structures. Étant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tout type de composites. Ce chapitre est consacré à la présentation des différents constituants des matériaux composites et les procédés de fabrication de ce type de matériaux et leurs structures.

1.1 Historique

Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve aussi les arcs Mongols (2 000 ans av. J. -C.), leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne [1].



Figure 1.1 : Arc sino-mongol [1].

1823 : Charles Macintosh crée l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus comme le coton.

1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé avec le béton qui forme la matrice et l'acier qui forme le renfort.

Les matériaux composites artificiels : les plus primitives sont les briques, consistées en paille et boue combinées ensemble. D'autres matériaux composites ont été mis au point, est compris le contre-plaqué, le béton, et le béton armé.

1.2 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels [2].

1.3 Caractéristiques générales

Les propriétés des matériaux composites sont différentes et dépendent de beaucoup de facteurs. Ces caractéristiques résultent des propriétés de la nature et de la quantité des matériaux constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort, de leurs interactions, et de la nature de l'interface matrice-renfort, etc. [3].

Les principales caractéristiques des matériaux composites sont :

- La bonne tenue en fatigue ;
- L'absence de corrosion ;
- L'absence de plasticité dont leur limite élastique correspond à la limite de rupture ;
- La résistance au vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur ;
- L'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, pétroles, etc.).

Pour élaborer ces matériaux, il est demandé les conditions suivantes : la nature, la texture et la forme du renfort, le taux de renforcement, la nature de la résine et les charges ou additifs, la qualité de l'interface renfort-matrice, la géométrie de la pièce à réaliser, et le procédé de mise en œuvre utilisé [4].

1.4 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés suivant la forme ou la nature des composants.

1.4.1 Classification suivant la forme des constituants

Suivant de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes les composites à fibres et les composites à particules.

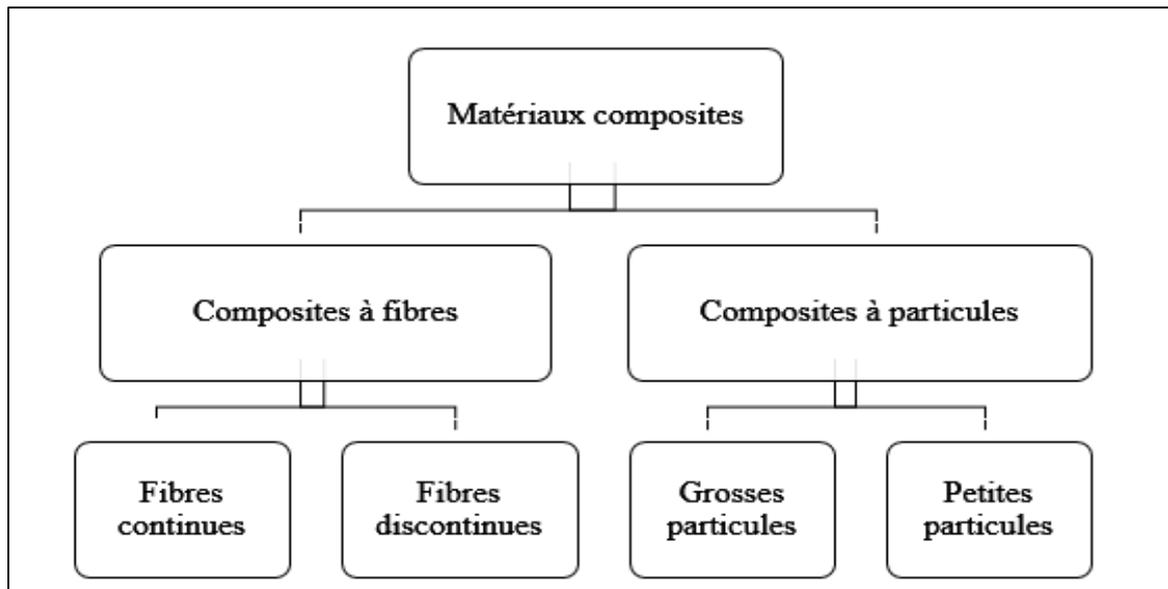


Figure 1.2 : Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants [1].

1.4.1.1 Composites à fibres

On appelle un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues (fibres coupées, fibres courtes, etc.) [2]. Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes.

1.4.1.2 Composites à particules

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des renforts ou des matrices. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse.

1.4.2 Classification suivant la nature des constituants

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en composites : - à matrice organique, - à matrice métallique ou - à matrice minérale.

1.4.2.1 Composites à matrice organique

Composites à matrice organique (résine, charges), avec des fibres minérales (verre, carbone, etc.), des fibres organiques (Kevlar, polyamides, etc.) et des fibres métalliques (bore, aluminium, etc.). Ils sont utilisés à des températures ne dépassant pas 200 à 300°C.

1.4.2.2 Composites à matrice métallique

Les composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec des fibres minérales (carbone, carbure de silicium SiC), des fibres métalliques (bore) et des fibres métallo-minérales (fibres de bore revêtues de carbure de silicium BorSiC) sont utilisés à des températures jusqu'à 600 °C.

1.4.2.3 Composites à matrice minérale

Les composites à matrice minérale (céramique), avec des fibres métalliques (bore), des particules métalliques (cermets) et des particules minérales (carbures, nitrures) sont utilisés à des températures jusqu'à 1000 °C.

1.4.3 Classification suivant la performance et la diffusion

Parmi les composites, on distingue deux types : les composites à grandes diffusions (GD) et les composites à hautes performances (HP).

1.4.3.1 Composites à grandes diffusions (GD)

Les GD représentent 95% des composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés, avec un taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants des bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Ils offrent des avantages essentiels, qui sont l'optimisation des coûts et la diminution des prix de revient, etc. [4].

1.4.3.2 Composites à hautes performances (HP)

Les HP, principalement utilisés dans l'aéronautique, sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux [4].

1.5 Éléments constitutifs d'un matériau composite

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont (Figure 1.3) :

- ❖ La matrice (Résine) ;
- ❖ Le renfort ;
- ❖ Les charges et les additifs.

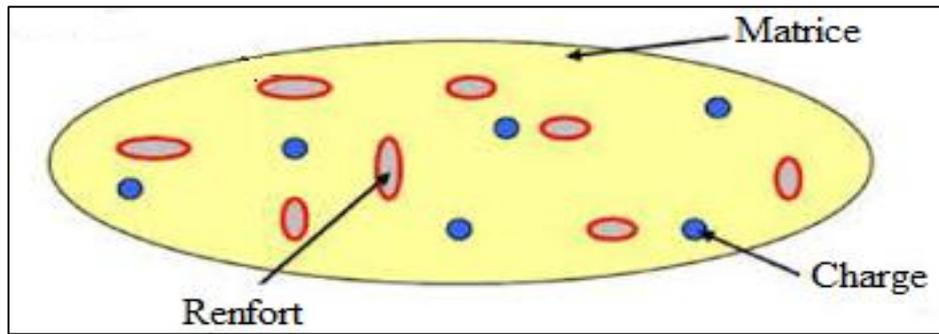


Figure 1.3 : Constituants d'un matériau composite [1].

1.5.1 Matrice (Résine)

La résine est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts et assure la protection chimique des fibres et les protège de l'environnement extérieur. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé.

Les résines doivent être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres, mais elles doivent avoir une masse volumique faible pour qu'elles conservent les caractéristiques mécaniques spécifiques élevées aux matériaux composites. On retrouve ces contraintes dans les polymères modifiés par des adjuvants et des additifs (agent de démoulage, stabilisants, pigments, etc.), ces polymères se retrouvent sous forme de solution.

Les différentes familles de matrices sont présentées selon l'organigramme ci-dessous :

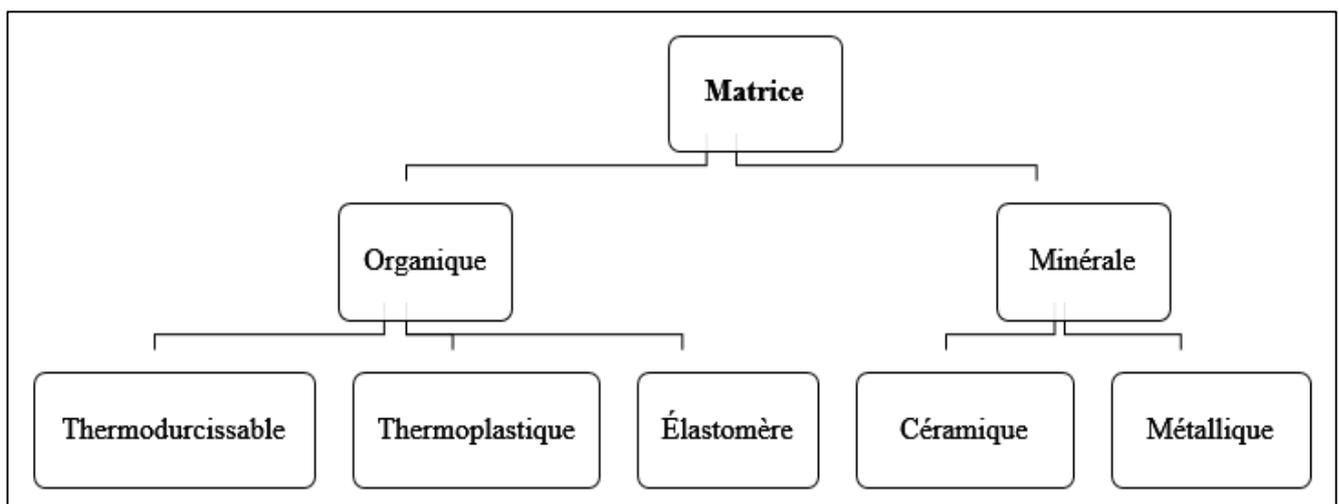


Figure 1.4 : Classification des types de résines [1].

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

1.5.1.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel de macromolécules qui ne peut pas être déformé par chauffage comme les thermoplastiques. Leurs mise en œuvre se fait par réaction chimique. Les composants de base peuvent être liquides, en poudre, plus ou moins fine, ou en pâte. Leurs utilisations s'accompagnent toujours avec des fibres longues.

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables [5].

Résines TD	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (MPa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	ρ	E	G	ν	σ_1	A	α
Époxyde	1200	2800	1600	0,3	130	2	11×10^{-5}
Phénolique	1300	3000	1100	0,4	70	2,5	1×10^{-5}
Polyester	1200	4000	1400	0,4	80	2,5	8×10^{-5}
Polycarbonate	1200	2400	-	0,35	60	-	6×10^{-5}
Vinylester	1150	3300	-	-	75	4	5×10^{-5}
Silicone	1100	2200	-	0,5	35	-	-
Uréthane	1100	700 à 7000	-	-	30	100	-
Polyamide	1400	4000 à 19000	1100	0,35	70	1	8×10^{-5}

Parmi ces résines on trouve :

A) Résines polyesters ;

B) Résines de condensation

- ❖ Les résines phénoliques ;
- ❖ Les résines aminoplastes ;
- ❖ Les résines furaniques.

C) Résines époxydes

Ce sont les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées, ne représentant que 5% du marché à cause de leurs coûts élevés. Ces résines possèdent les performances élevées à condition d'avoir des durées de transformation et surtout de

recuison très longues allant de quelques heures à plusieurs dizaines d'heures et à des températures de 50 à 100 °C [2].

Tableau 1.2 : Caractéristiques mécaniques générales de la résine époxyde [2].

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

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons [2] :

- Des bonnes propriétés mécaniques supérieures à celles des polyesters ;
- Une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 à 190 °C en continu ;
- Une excellente résistance chimique ;
- Un faible retrait au moulage ;
- Une très bonne mouillabilité des renforts ;
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- Un temps de polymérisation long ;
- Un coût élevé ;
- La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre ;
- Une sensibilité à la fissuration.

1.5.1.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques, en général conditionnées en granulés sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié.

Cependant, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

Parmi leurs avantages : faible coût résultant, matières premières disponibles et procédés de fabrication. Mais leurs propriétés mécaniques et thermomécaniques sont faibles.

Parmi ces résines, on distingue divers types : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéther-sulfone (PES), le polyéther-imide (PEI), le polyéther-éther-cétone (PEEK), le polypropylène (PP), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), etc. [2].

Tableau 1.3 : Principales caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques [5].

Résines TP	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (MPa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	ρ	E	ν	C₁	A	α
PP	900	1200	0,4	30	20 à 400	9×10^{-5}
PPS	1300	4000	-	65	100	5×10^{-5}
PA	1100	2000	0,35	70	200	8×10^{-5}
PES	1350	3000	-	85	60	6×10^{-5}
PEI	1150	3300	-	105	60	6×10^{-5}
PEEK	1300	4000	-	90	50	5×10^{-5}

1.5.1.3 Résines thermostables

Ce sont des résines présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures supérieures à 200 °C. Elles sont développées dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires de recherche tendent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi ces résines, on distingue les résines bismaléimides et polyimides les plus utilisées.

1.5.1.4 Résines naturelles

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

1.5.2 Renforts (Fibres) et tissus

Les renforts sont l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques. Ils confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques. Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique de 0,3 à 0,7 [2]. Ils permettent l'amélioration de certaines propriétés physiques la tenue au feu, la tenue en température, les propriétés électriques, le comportement thermique, et la résistance à l'abrasion. Ils peuvent être d'origine organique, végétale, minérale, synthétique, artificielle, etc. Les plus employées sont les fibres de verre et les fibres de carbone sont privilégiées.

1.5.2.1 Formes commerciales des renforts fibres

Les renforts fibres se présentent sous différentes formes commerciales : forme linéique, forme de tissus surfaciques, et forme multidirectionnelle.

A) Formes linéiques

Les fibres de quelques micromètres de diamètre ne peuvent être utilisées sous forme unitaire. On trouve en général des fils ou mèches de différentes formes. Ils présentent d'excellentes propriétés mécaniques dans la direction des fibres.

B) Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types mats, tissus ou rubans.

❖ Mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant qui peut être soluble ou non dans les résines [2].

L'absence d'orientation donne une isotropie des caractéristiques mécaniques du mat dans son plan.

❖ Tissus et rubans

Un tissu (ruban) ou un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser [2]. Il est constitué de : une chaîne, ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant la longueur du tissu et une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne. Les tissus différents par le type de fils ou mèches utilisés, donc par la

masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement des fils de chaînes et des fils de trames.

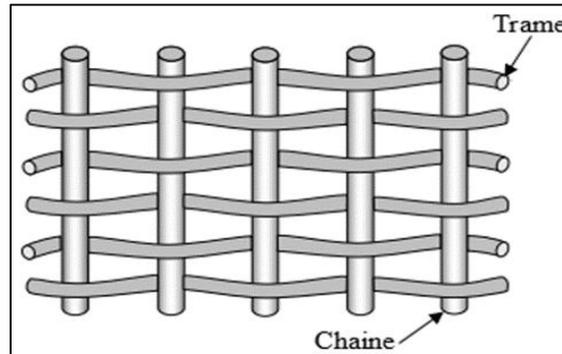


Figure 1.5 : Chaîne et trame d'un tissu

Les armures classiques utilisées sont (Figure 1.6) :

✓ **TOILE OU TAFFETAS**

Les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement [2], conduisant à un tissu très plat et peu déformable, les propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions chaînes et trames. Cependant, l'importance des courbures des fibres implique une diminution des performances mécaniques des composites.

✓ **SERGÉ**

Pour cette armure, le nombre de fils chaîne et de fils trame qui s'entrecroisent peut varier [2], par exemple :

- Un sergé 2×1 : les fils trame passent sur un fil chaîne et sous deux fils chaîne ;
- Un sergé 2×2 : les fils trame passent sur deux fils chaîne et sous deux fils chaîne.

Cette armure est bien adaptée aux moulages de formes complexes.

✓ **SATIN**

L'armure satin très semblable au sergé, mais le nombre de fils chaîne et de fils trame qui passent les uns sur les autres avant de s'entrecroiser est plus important.

Chaque tissu satin est caractérisé par un nombre, usuellement 4 ou 8, indiquant que les fils chaîne passent sur 4 ou 8 fils trame [2], ce qui donne un tissu avec une face qui contient plus de fils chaîne et une face plus de fils trame. Cette armure bien adaptée aux moulages de formes complexes.

✓ TISSU CROISÉ SANS ENTRECROISEMENT

Deux nappes de fils superposées sans entrecroisement des fils, et réunies par une chaîne et une trame de fils fins, n'intervenant pratiquement pas sur les performances mécaniques du tissu. L'absence d'entrecroisement supprime les effets de cisaillement et donne un tissu très performant mais coûteux.

✓ TISSU À ARMURE UNIDIRECTIONNELLE

Dans un tissu unidirectionnel, les fils sont alignés parallèlement à la direction chaîne, et ils sont réunis par un fil fin dans la direction trame [2]. Le tissu est ainsi unidirectionnel dont les performances sont très élevées dans la direction chaîne.

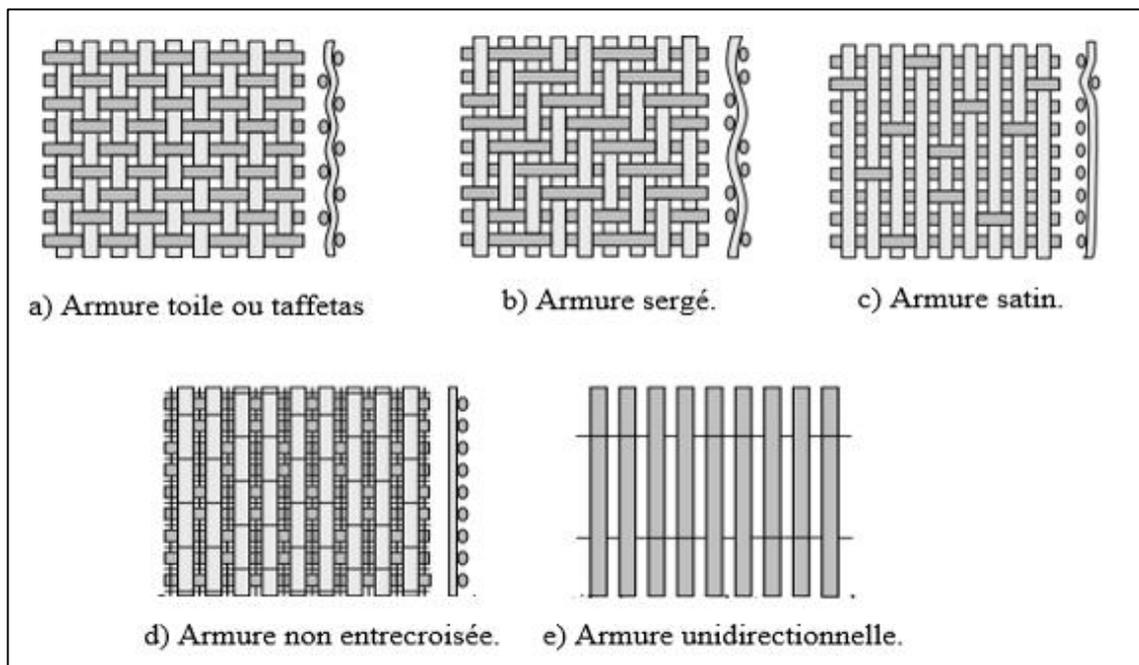


Figure 1.6 : Différentes armures classiques utilisées [2].

❖ Structures tissées multidirectionnelles

✓ Tresse et préformes

On peut réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice, dont la variation du pas permet d'ajuster la tresse à la forme qu'elle doit recouvrir [2]. On obtient ainsi des pièces de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc.

✓ Tissus multidirectionnels

Ce sont des tissages réalisés selon trois ou quatre directions dites à 3D ou 4D ou plus ayant pour objectif l'obtention des matériaux isotropes.

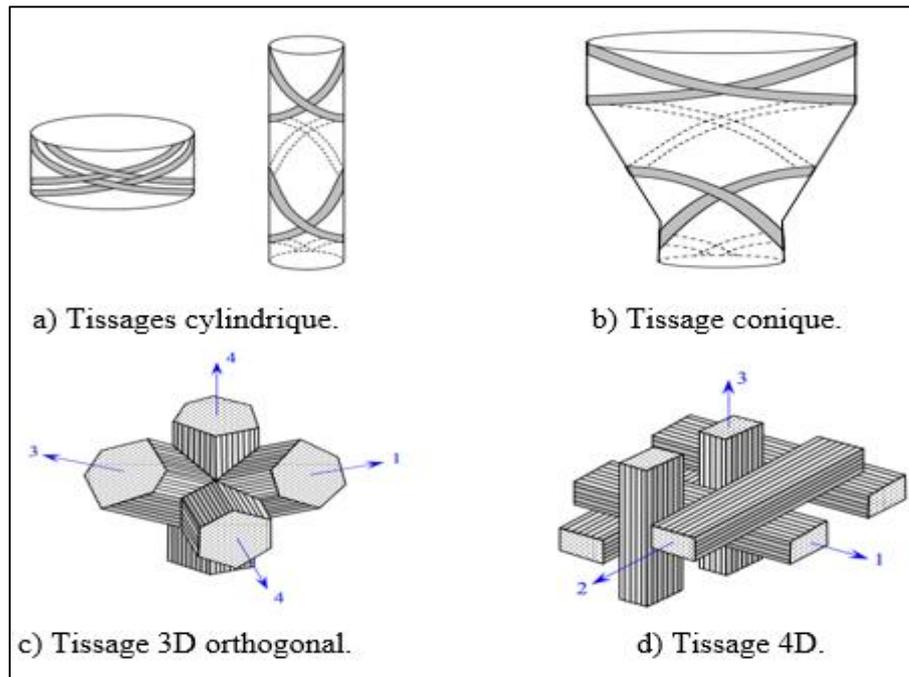


Figure 1.7 : Structures tissées multidirectionnelles [2].

1.5.2.2 Principales fibres

Les différents types de renforts (fibres) sont cités dans l'organigramme suivant :

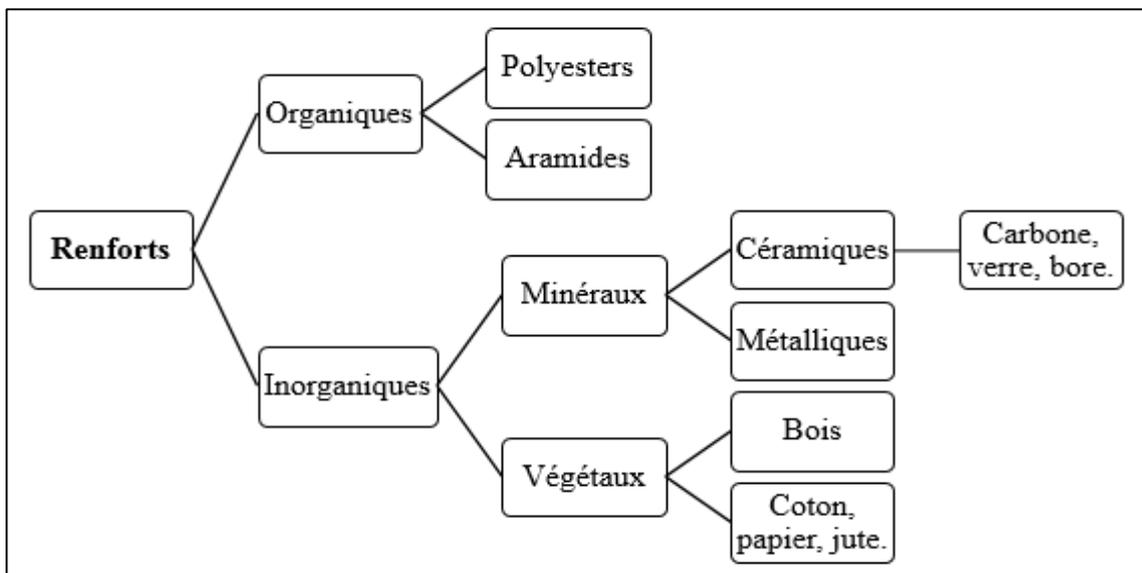


Figure 1.8 : Classification des renforts [1].

A) Fibre de verre

La fibre de verre constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Le comportement du verre dans sa forme massive est dominé par ses caractères fragiles, et a une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, lorsqu'il est élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres, il devient tenace et révèle de bonnes caractéristiques mécaniques.

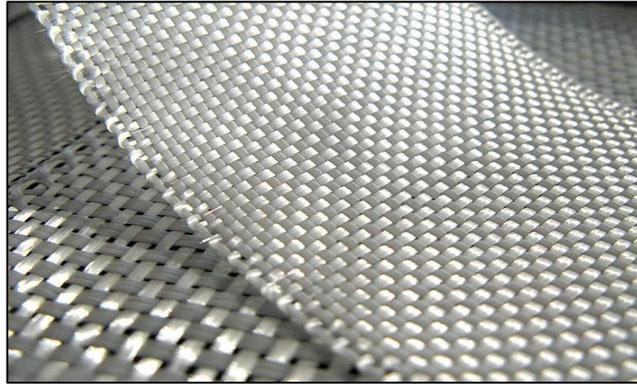


Figure 1.9 : Fibre de verre [1].

❖ Composition d'une fibre de verre

La fibre de verre est obtenue à partir du verre textile, composé d'un mélange d'oxydes : sable (silice) et additifs (alumine, chaux, carbonate, magnésie, oxyde de bore, etc.). Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. Les proportions du mélange, et l'ajout d'oxydes modificateurs donnent au matériau final ses propriétés spécifiques.

❖ Types de fibre de verre

Suivant leurs compositions, on distingue quatre (04) types de fibres [5] :

- **Le verre E :** pour les composites de grande diffusion et les applications courantes (usages général) ;
- **Les verres R et S :** pour les composites à hautes performances mécaniques (pour la réalisation de structures) ;
- **Le verre C :** pour la résistance aux agents chimiques ;
- **Le verre D :** pour les composites à hautes propriétés diélectriques (la fabrication des circuits imprimés, la construction de matériel électronique de télécommunications).

Tableau 1.4 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [5].

Caractéristiques	Verre E	Verre R	Verre S	Verre D	Verre C
Masse volumique ρ (kg/m ³)	2600	2550	-	-	-
Module d'Yong E_f (GPa)	73	86	86,5	86,5	70
Contrainte à rupture σ_{fu} (MPa)	3400	4650	4650	2450	2800
Allongement à la rupture ε_{fu} (%)	4,4	5,3	5,3	4,5	4

❖ Élaboration des fibres de verre

Les fibres de verre sont élaborées à partir des matières premières traditionnelles nécessaires à la fabrication du verre : sable (silice), additifs (alumine, chaux, magnésie, oxyde de bore, etc.). Celles-ci proviennent de carrières soigneusement sélectionnées pour la pureté de leurs gisements et la constance de composition des veines d'extraction.

À ces constituants de base s'ajoutent, suivant les types de verre, des doses extrêmement précises de certains oxydes. L'ensemble est appelé composition. La composition est chauffée, elle devient visqueuse vers 800 °C, puis liquide, et finalement se vitrifie. À 1500 °C, elle est homogène, et les dernières bulles et impuretés disparaissent.

✓ Fibrage

Les fibres de verre sont obtenues à partir de fibrage du verre fondu [2]. Par l'effet de la gravité, le verre sortant du four à très haute température alimente des filières en alliage de platine-rhodium, chauffées par effet Joule à des températures de 1250 à 1300°C, et présentent un fond percé de plusieurs centaines d'orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres.

✓ Étirage

Le fibrage du verre est effectué par étirage. À la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir des fibres discontinues de diamètres différents selon leurs applications ultérieures.

Les monofilaments sont ensuite rassemblés sans torsion pour constituer un fil de base appelé fil silionne, qui est enroulé sur une bobine ou sous forme de pelote. Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts verre dans les matériaux composites.

✓ Ensimage

Immédiatement après la phase d'étirage et avant d'être réunis pour former le fil de base, les filaments sont revêtus d'une dispersion aqueuse de composées généralement organiques, appelée ensimage. Cet ensimage assure :

- La cohésion entre les filaments constitutifs du fils ;
- La protection du fils de l'abrasion ;
- La protection du fils de l'attaque de l'eau ;

Ensuite, l'ensimage confère les propriétés indispensables de compatibilité entre le verre et la matrice afin d'obtenir les meilleures caractéristiques du composite. Il apporte aussi le glissant des fils, leurs raideurs, les propriétés, antistatiques, son niveau et sa vitesse de solubilisation dans la matrice.

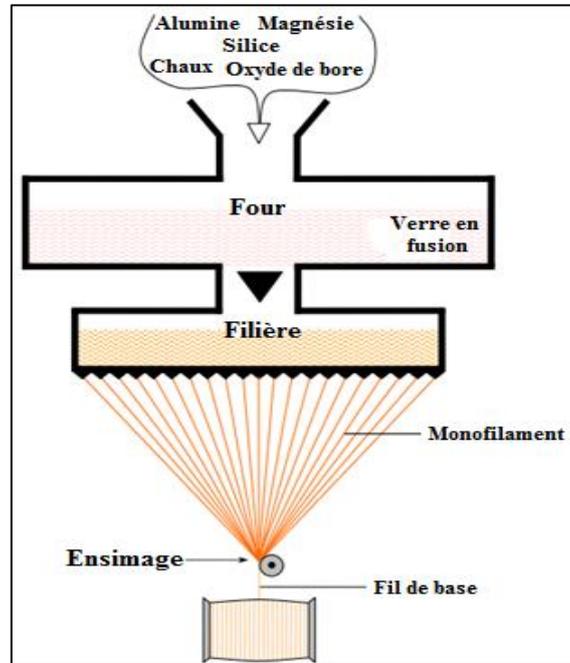


Figure 1.10 : Schéma d'élaboration des fibres de verre [2].

✓ **Finissage**

Le fil de verre entre ensuite dans la partie finale de sa transformation, celle du finissage : textile ou plastique selon l'utilisation finale.

❖ **Produits industriels en verre textile**

Le verre textile est disponible sous des présentations très variées : les fils de base, les fibres broyées, les fils de base coupés, les stratifils, les stratifils bouclés, les mats à fils coupés, les mats à fils continus et les tissus.

❖ **Fibres de verre dans le marché**

Les fibres de verre représentent 95% du marché des composites. Sur ces 30 dernières années, la demande a augmenté de 5% couplée à une augmentation de la capacité de production de 3% : 1 millions de tonnes de fibres de verre en 1981 pour 4,3 millions de tonnes aujourd'hui. Les principaux marchés pour les composites renforcés de fibres de verre sont le bâtiment et la construction (32 %), l'automobile et les transports (28 %), l'industrie (21 %), la communication, l'électrique, l'électronique, les sports et loisirs (11 %) ainsi que l'énergie éolienne (8 %).

B) Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux (02) types les fibres hautes résistances (HR) et les fibres hautes modules (HM). Les fibres de carbone utilisées dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camions, formule 1, avions), les éléments de fours, le domaine spatial (bords d'attaque, tuiles), etc.

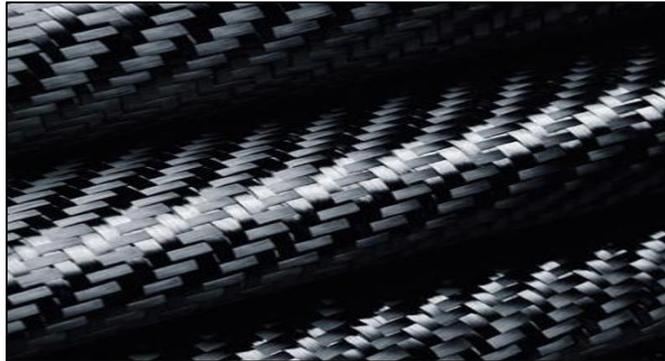


Figure 1.11 : Fibre de carbone [1].

C) Fibres aramides

Souvent appelée Kevlar, les fibres aramides sont élaborées par filage d'une solution sulfurique concentrée d'un haut polymère, poly aramide ou polyamide. Elles sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité. Les fibres aramides utilisées dans le remplacement des armatures d'acier dans les pneumatiques, la fabrication de protections contre projectiles (blindages, gilets pare-balles, etc.), les articles des sports (skis, raquettes de tennis, etc.).

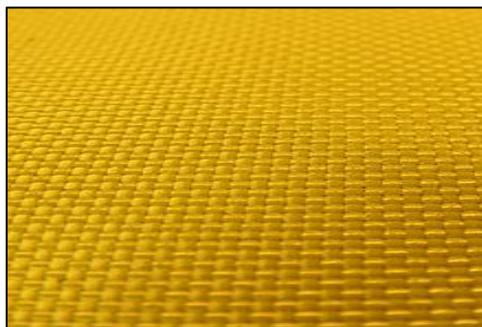


Figure 1.12 : Fibre aramide [1].

D) Fibres céramiques

Le principal intérêt des céramiques est leur caractère réfractaire. Diverses fibres sont obtenues par dépôt chimique en phase vapeur d'un revêtement céramique :

- ❖ Les fibres de bore (B) ;
- ❖ Les fibres de bore-carbure de bore (B-B₄C) ;
- ❖ Les fibres de carbure de silicium (SiC) ;
- ❖ Les fibres de bore-carbure de silicium (BorSiC).

E) Fibres synthétiques thermostables

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse [2].

F) Autres fibres

Il existe diverses fibres utilisées pour des applications particulières :

- ❖ **Fibres d'origine végétale** : le bois, le jute et le lin ;
- ❖ **Fibres d'origine minérale** : l'amiante et la silice ;
- ❖ **Fibres synthétiques** : les fibres polyester et les fibres polyamides ;
- ❖ **Fibres métalliques** : l'acier, le cuivre et l'aluminium.

1.5.3 Charges et additifs

Ce sont des produits qu'on incorpore aux résines soit pour améliorer leurs caractéristiques physiques et mécaniques soit pour réduire leurs coûts et faciliter leurs mises en forme. Cette quantité de produit ajoutés varie de : quelques dizaines de % pour les charges, et à quelques % et moins pour les additifs.

1.5.3.1 Charges

A) Charges renforçantes

Elles sont incorporées aux résines pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Elles sont classées selon leurs formes géométriques en charges sphériques et charges non sphériques.

B) Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes sont ajoutées pour diminuer le coût de la résine sans altérer ses performances, ou bien pour améliorer certaines propriétés des résines. Parmi ces charges, on distingue : les charges de faible coût, les charges ignifugeantes et les charges conductrices et antistatiques.

1.5.3.2 Additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité et interviennent comme :

- ✓ Les lubrifiants et agents de démoulage ;
- ✓ Les pigments et colorants ;
- ✓ Les agents anti-retraits ;
- ✓ Les agents anti-ultraviolets.

1.6 Mise en œuvre des matériaux composites

1.6.1 Moulages sans pression

1.6.1.1 Moulage au contact

Consiste à disposition successivement sur un moule [6] :

- Un agent de démoulage ;
- Un gel coat ;
- Une couche de résines thermodurcissables liquide.

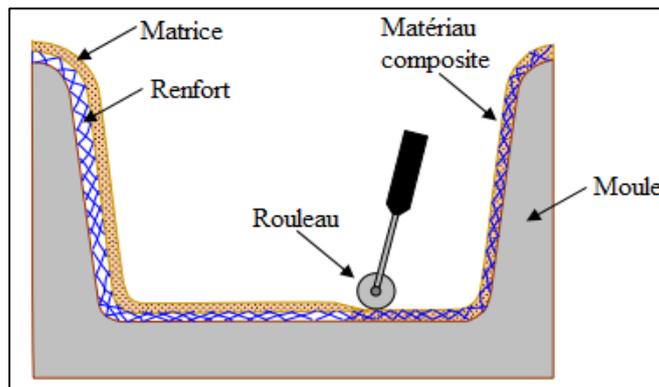


Figure 1.13 : Moulage au contact [2].

✓ Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée [7].

1.6.1.2 Moulage par projection simultanée

Est une évolution de procédé de moulage au contact et est particulièrement adaptée aux pièces de moyennes et grandes et grandes dimensions [6].

✓ Principe

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant un dispositif de coupe, projection du renfort, et un ou deux pistolets projetant simultanément la résine [7].

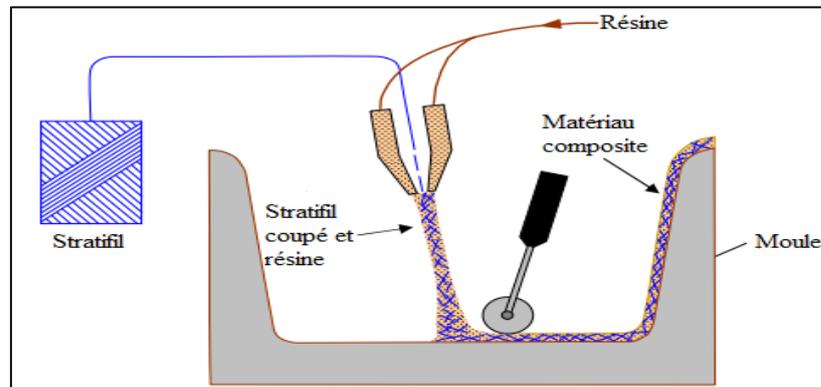


Figure 1.14 : Moulage par projection simultanée [2].

1.6.2 Moulage sous vide

1.6.2.1 Principe

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule, la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide [7].

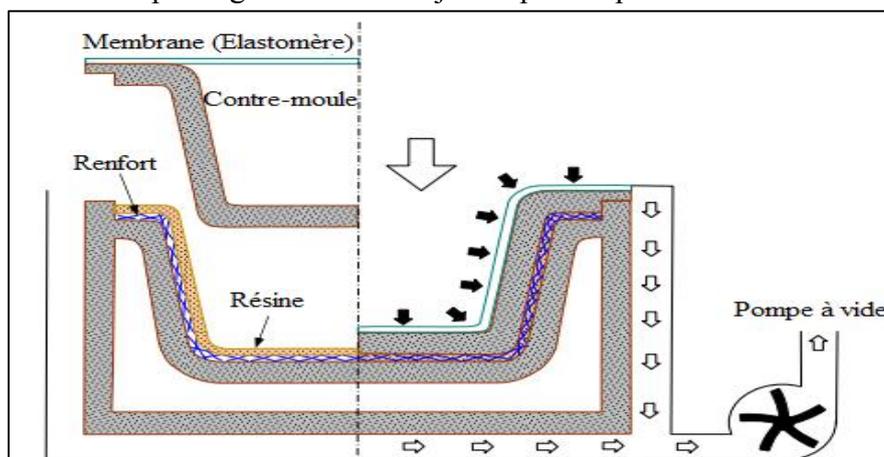


Figure 1.15 : Moulage sous vide [2].

1.6.2.2 Avantages

- Taux de renfort pouvant atteindre 65% ;
- Bon compactage des tissus ;
- Bonne imprégnation.

1.6.2.3 Inconvénients

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

1.6.3 Moulage par compression

C'est un procédé de mise en forme par moulage de pièces en matériaux plastiques ou composites [3]. On distingue :

1.6.3.1 Moulage par injection de résine

✓ Principe

Il consiste par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble de moule et contre moule très rigide et fermé, par alimentation automatique de la résine. Convient pour des pièces profondes et de formes compliquées.

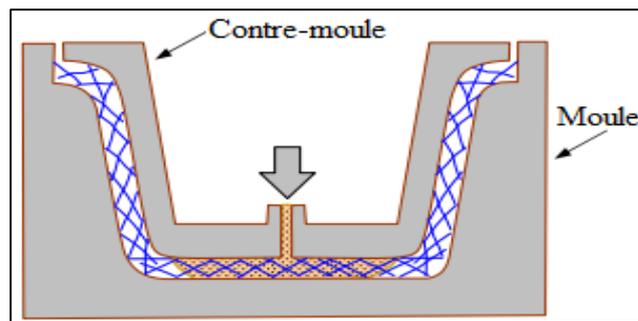


Figure 1.16 : Moulage par injection de résine [2].

1.6.3.2 Moulage par compression à froid

✓ Principe

L'imprégnation et le bullage se font en moule fermé par pression mécanique, le contre-moule monté sur la partie mobile de la presse. La durée de fermeture du moule correspond à la polymérisation de résine. La chaleur accumulée par exo thermie maintient la température du moule.

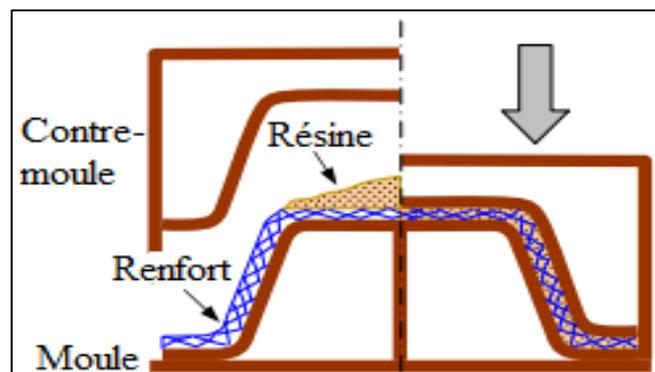


Figure 1.17 : Moulage par compression à froid [2].

1.6.3.3 Moulage par compression à chaud

Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée [2].

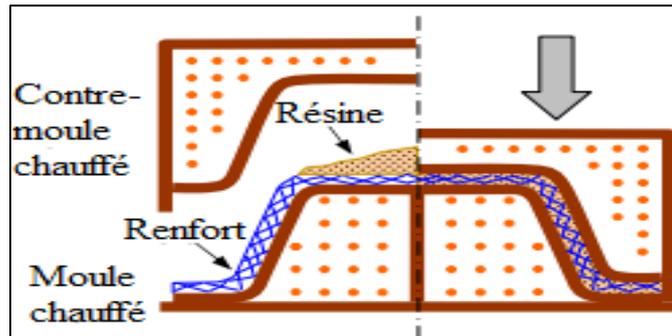


Figure 1.18 : Moulage par compression à chaud [2].

1.6.3.4 Moulage par injection

Réaliser sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques, c'est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des composites et très adaptée à la production de pièces en très grande série.

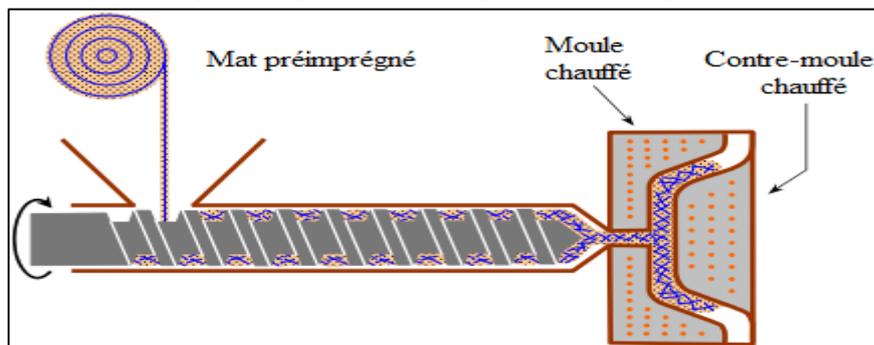


Figure 1.19 : Moulage par injection [2].

1.6.4 Moulage en continu

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, pour l'obtention des plaques planes, panneaux, sandwichs, panneaux ondulés pour toitures, etc. nécessitant un investissement très important en matériel. Il est séparé en plusieurs phases : phases d'imprégnation des renforts, phase de mise en forme, phase de polymérisation effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, et phase de refroidissement et découpage.

Pour le cas des plaques planes la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage [2].

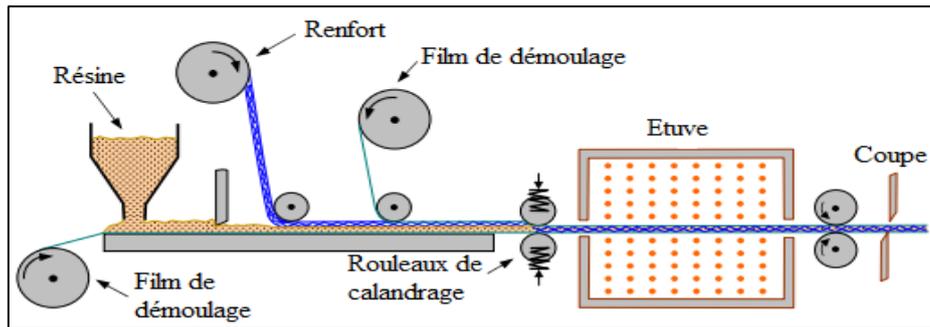


Figure 1.20 : Moulage en continu de plaques [2].

Pour le cas des panneaux ondulés la mise en forme se fait lors de la polymérisation par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

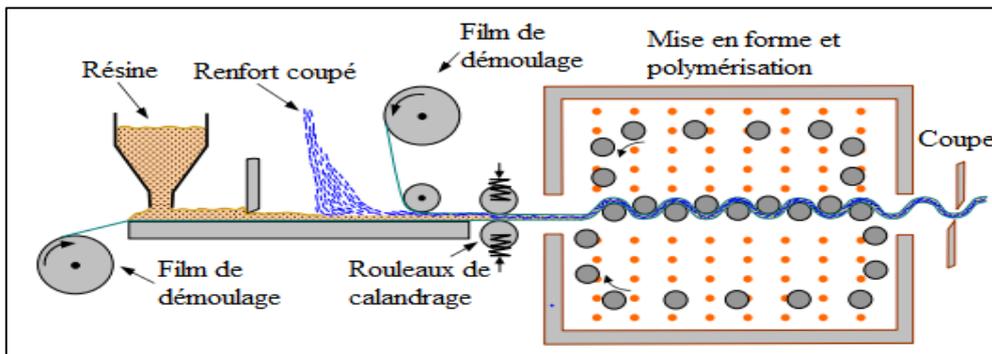


Figure 1.21 : Moulage en continu de panneaux ondulés [2].

1.6.5 Moulage par pultrusion

Les renforts passent dans un bain de résine catalysé où sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables [2].

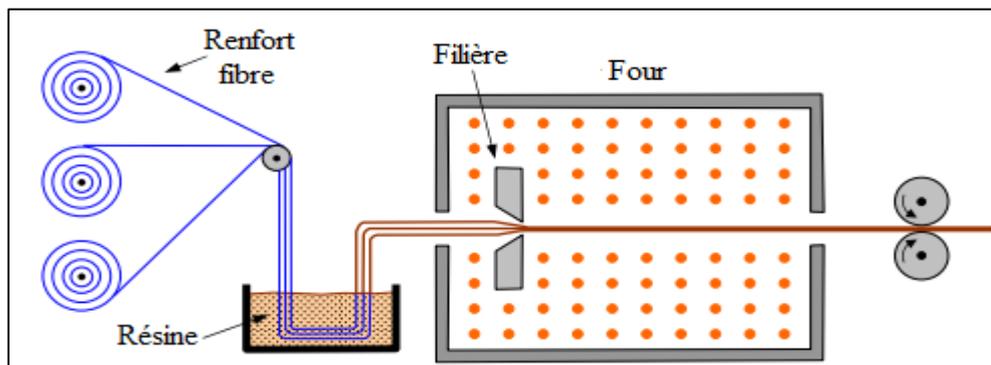


Figure 1.22 : Moulage par pultrusion [2].

1.6.6 Moulage par centrifugation

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse [5].

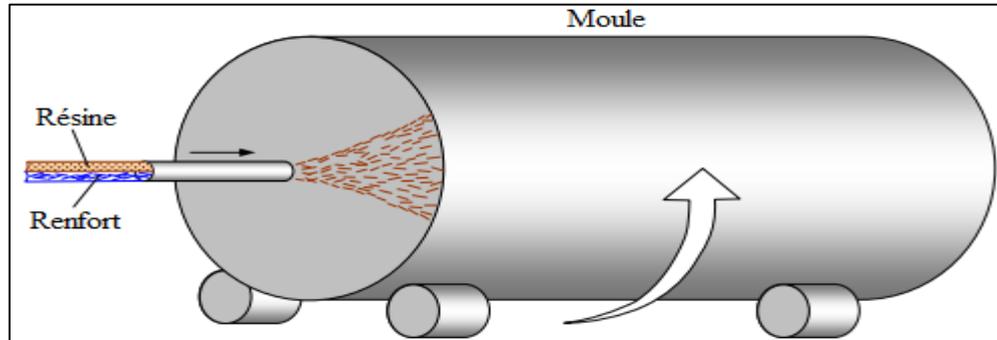


Figure 1.23 : Moulage par centrifugation [2].

1.6.7 Moulage par enroulement filamentaire

Le renfort imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces [2]. Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal et l'enroulement polaire.

1.7 Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois (03) types :

- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwiches.

1.7.1 Monocouches

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par la forme du renfort : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans [8].

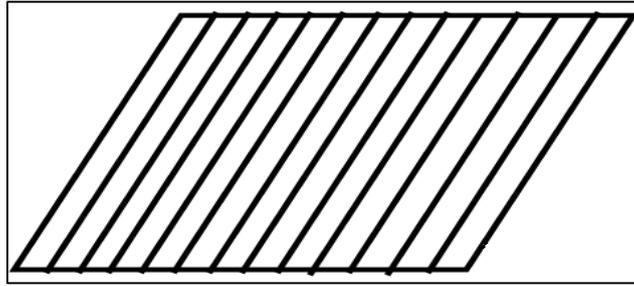


Figure 1.24 : Pli unidirectionnelle [1].

1.7.2 Stratifiés

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches (ou plis) d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (Figure 1.25). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. 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. 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 [9].

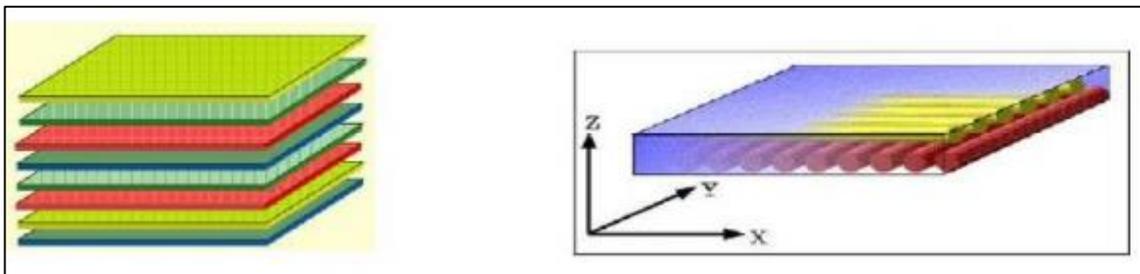


Figure 1.25 : Plaque stratifiée [1].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifique.

On pourra avoir des stratifiés de type :

- **Équilibrer** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+0$ que de couches orientées suivant la direction -0 .
- **Symétrique** : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport un plan moyen.
- **Orthogonal** : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

1.7.2.1 Orientations normalisées

On désigne les stratifiés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à un repère global arbitraire (x, y, z), l'axe x correspondant le plus souvent à la direction du chargement. Un pli orienté à 0° présente des fibres dirigées selon l'axe x et un pli orienté à 90° des fibres selon y.

Un stratifié quelconque de N plis est ainsi désigné par le Nuplet des orientations de ses plis dans le sens des z croissants. Pour condenser l'écriture, on note sous forme d'indice le nombre de plis adjacents de même orientation ainsi que le nombre de répétitions d'une même séquence de plis. L'indice « s » correspond à un stratifié symétrique pour lequel on ne renseigne que la moitié de l'empilement, de la surface au plan de symétrie miroir.

La figure (1.26) présente l'exemple d'un empilement [30/90₂/45/0/45] :

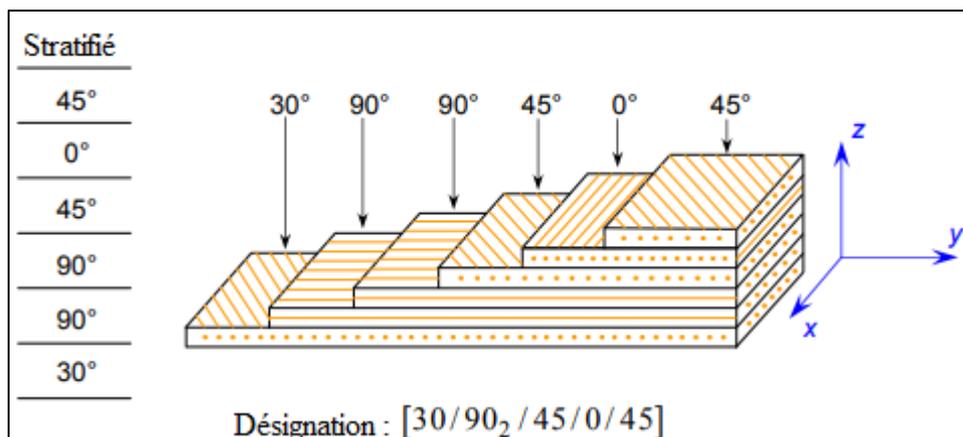


Figure 1.26 : Désignation d'un stratifié [2].

1.7.2.2 Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais des signes opposés, les signes + ou - sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué [2].

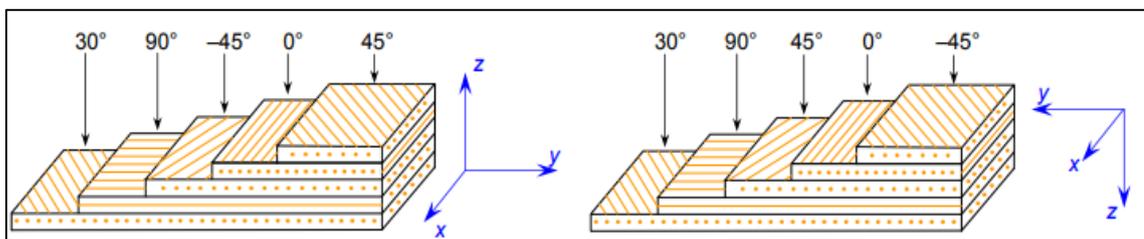


Figure 1.27 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés [2].

1.7.3 Sandwiches

Matériaux composés de deux semelles (peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté isolant en flexion et c'est un excellent thermique [5].

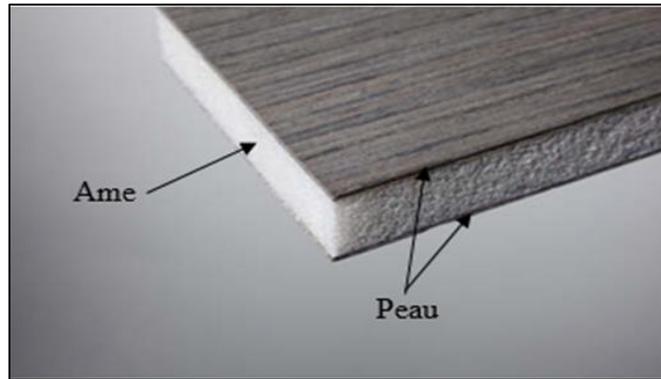


Figure 1.28 : Composite sandwich [1].

1.7.3.1 Avantages et inconvénients

✓ Avantages

- Grande légèreté ;
- Grande rigidité flexionnelle ;
- Excellentes caractéristiques d'isolation.

✓ Inconvénients

- Mauvais amortissement et isolation acoustique ;
- Tenue au feu moyenne pour certaines catégories d'âme ;
- Risques de flambement plus élevé que sur les autres structures ;
- Problème de décollement peaux/âme.

1.8 Loi de mélange pour les composites stratifiés

Les déformations des matériaux homogènes et isotropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le

résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la loi de mélange appliquée aux composites stratifiés :

$$P_c = \rho_c \times V_c = \rho_f \times V_f + \rho_m \times V_m \quad (1.1)$$

Où :

$$V_f + V_m = 1 \quad (1.2)$$

Avec :

- V_f : Fraction volumique de fibres ;
- V_m : Fraction volumique de matrice ;
- P_c : Poids estimé du composite ;
- ρ_f : Masse volumique de la fibre ;
- ρ_m : Masse volumique de la matrice.

1.9 Avantages et inconvénients des matériaux composites

1.9.1 Avantages

Les composites présentent des avantages comme suit [8] :

- Gain de masse ;
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métallique) ;
- Grande résistance à la fatigue ;
- Faible vieillissement sous l'action de l'eau e de la température (pour l'aluminium et fibre de carbone) ;
- Insensibles aux produits chimiques utilisés en "mécanique" comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

On peut ajouter d'autres avantages à ces matériaux comme [10] :

- L'optimisation du design, impliquant une possible diminution du nombre d'éléments ;
- L'adaptation au processus de design ;
- La réduction du poids ;
- La longue durée de la vie.

1.9.2 Inconvénients

Par contre, les composites présentent des inconvénients comme suit [11] :

- ✓ Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température (pour l'aluminium et fibre de carbone) ;
- ✓ Faible résistance aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes ;
- ✓ Si on peut constater une meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices ;
- ✓ Prix élevé ;
- ✓ Tenue au choc faible.

1.10 Applications commerciales et industrielles des matériaux composites

- ✓ L'échelle industrielle ;
- ✓ Les applications de très haute technicité et travaillant à haute température : spatial, nucléaire, militaire, freinage ;
- ✓ Les applications spécialisées ;
- ✓ L'aérospatial ;
- ✓ Le bâtiment ;

- ✓ **Les sports et loisirs**

Mats et coques de bateaux, planches de ski et de snowboard, cadres de bicyclette, raquette de tennis, coques de piscines, toboggans, carrosserie de voitures de sport, club de golf, canne à pêche, perche de saut [1] ;



Figure 1.29 : Planches de ski [1].

✓ **Le transport**

Aérien (civil et militaire) : dérives, portes, éléments de fuselage, armatures de siège, pales d'hélicoptère, maritime, ferroviaire et par câble (cabines de téléphériques).



Figure 1.30 : Boeing 787 50% de composite [1].

1.11 Environnement

Les matériaux composites ont un impact sur l'environnement. La plupart des composites sont à base de polymères thermodurcissables, ce qui les rend difficilement recyclables. Cette contrainte va donc à l'encontre du développement durable. On peut aussi voir de nouvelles recherches axées sur les bio composites notamment avec des fibres issues de plantes. Les bio composites sont des matériaux formés par une matrice (résine) et un renfort de fibres naturelles provenant usuellement des plantes ou de la cellulose (fibre de bois, chanvre, etc.). De plus, ils contribuent au respect de l'environnement car ils sont biodégradables, utilisés dans l'ingénierie des tissus, des applications cosmétiques et de l'orthodontie. Ces bio composites ne sont pas encore prêts à être mis sur le marché pour des secteurs de pointe [1].

Un composite n'est entièrement biodégradable que si la matrice utilisée, en plus de fibres naturelles, l'est elle-même (ex. : PLA, acide polylactique). Dans le cas où on emploie une résine de type « classique » (polyester, époxyde, etc.), l'intérêt d'utiliser des fibres naturelles comme renfort sera le caractère renouvelable de celles-ci, mais on ne pourra pas parler de composite biodégradable.

Chapitre 2

Théorie des poutres stratifiées

Et

Analyse du comportement mécanique

2.1 Théorie des poutres stratifiées sollicitées en flexion trois (03) points

Le type d'essais le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques est le comportement des matériaux composites en 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 (contraintes locales conduisant à des ruptures prématurées de l'éprouvette). De plus, selon que l'opération travaillera en flexion trois (03) points ou quatre (04) points, et suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction-compression ou en cisaillement [12]. Dans notre expérience on va considérer l'essai de flexion trois point statique.

2.1.1 Principe d'essai de flexion trois (03) points

L'essai de flexion trois points statique est un test mécanique indépendant du temps comme le choc et la dureté [9]. Il consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre [13], comme illustré à la figure (2.1).

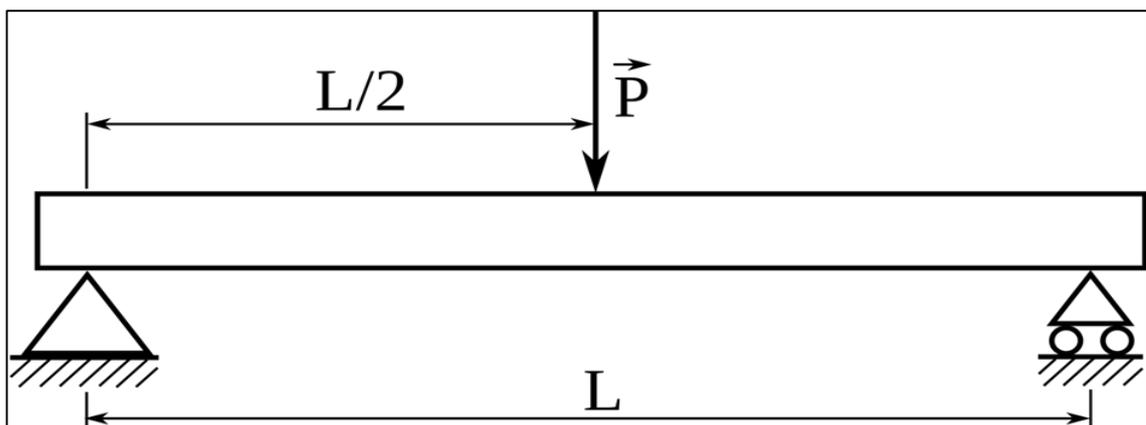


Figure 2.1 : Flexion trois (03) points [1].

Il permet de déterminer l'aptitude à la déformation du matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance des appuis. Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre. On impose à l'éprouvette normalisée une déformation constante et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cet essai. La charge supportée par l'éprouvette est mesurée durant tout l'essai.

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Cet essai permet de connaître :

- Le comportement mécanique du matériau ;
- Les propriétés du matériau ;
- Les valeurs caractéristiques du matériau.

2.1.2 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 2.2). Quand une contrainte locale devient égale à la résistance de cohésion de la matière, les liaisons interatomiques de cette région se rompent [14].

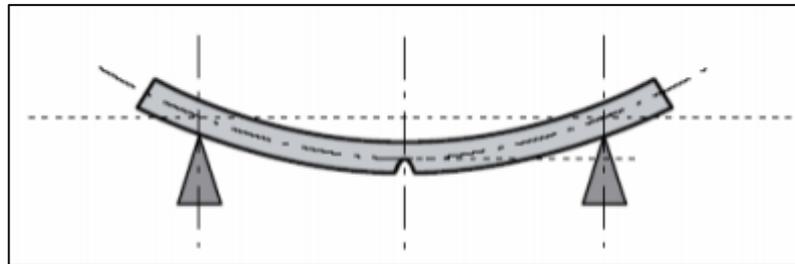


Figure 2.2 : Localisation de la rupture [1].

2.1.3 Machines de flexion

La plupart des machines de flexion sont aujourd'hui dites universelles (traction, flexion, compression, fluage...), voir figure (2.3).



Figure 2.3 : Machine universelle de flexion [23].

2.1.4 Application à la flexion trois (03) points

La symétrie du problème d'une poutre en flexion trois (03) points, conduit à ne considérer qu'une moitié de poutre (Figure 2.4).

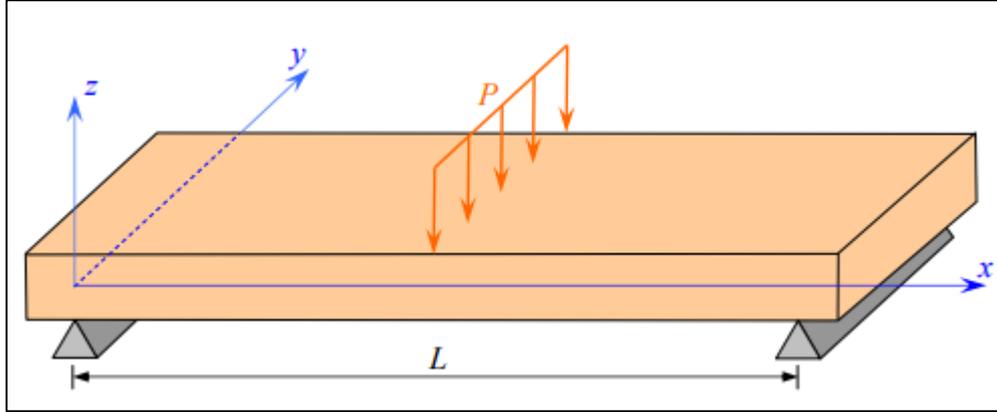


Figure 2.4 : Sollicitation d'une poutre en flexion 3-points [2].

Le moment de flexion s'exprime par la relation :

$$M = -\frac{Px}{2}, \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (2.1)$$

Où P est la charge totale exercée au milieu de la poutre. Il vient :

$$\begin{cases} \frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{Px}{2E_x I} \\ 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Dans le cas d'appuis simples, les conditions aux frontières sont pour $x = 0$:

$$\begin{cases} M = 0 \\ w_0 = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

D'autre part, la symétrie impose que, pour $x = L/2$:

$$\frac{dw_0}{dx} = 0 \quad (2.4)$$

L'intégration de (2.2) associée aux conditions (2.3) et (2.4) conduit à :

$$w_0 = -\frac{Pl^2}{48E_x I} x \left[3 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

La flèche w_c au centre de la poutre ($x = L/2$) s'écrit :

$$w_c = \frac{PL^3}{48E_x I} = \frac{PL^3}{48E_x b} D_{11}^* \quad (2.6)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Cette relation peut être utilisée pour déterminer soit le module de flexion de la poutre, soit le coefficient D_{11}^* , connaissant la flèche w_c au centre pour une charge imposée P :

$$\begin{cases} E_x = \frac{PL^3}{48Iw_c} = \frac{PL^3}{48bh^3w_c} \\ D_{11}^* = \frac{48bw_c}{PL^3} \end{cases} \quad (2.7)$$

Les contraintes dans la couche k s'écrivent :

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^k = -6a_{xx}^k \frac{P}{bh^3} xz, \\ \sigma_{yy}^k = -6a_{yy}^k \frac{P}{bh^3} xz, \\ \sigma_{xy}^k = -6a_{xy}^k \frac{P}{bh^3} xz. \end{cases} \quad (2.8)$$

Ces contraintes sont maximales pour $x = L/2$, soit :

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^k = -3a_{xx}^k \frac{PL}{bh^3} z, \\ \sigma_{yy}^k = -3a_{yy}^k \frac{PL}{bh^3} z, \\ \sigma_{xy}^k = -3a_{xy}^k \frac{PL}{bh^3} z. \end{cases} \quad (2.9)$$

Dans le cas d'une poutre en matériau homogène isotrope : $a_{xx} = 1$, et la contrainte normale s'écrit :

$$\sigma_{xx} = -\frac{3PL}{bh^3} z \quad (2.10)$$

La contrainte de traction maximale est atteinte sur la face inférieure ($z = -h/2$), et s'exprime suivant :

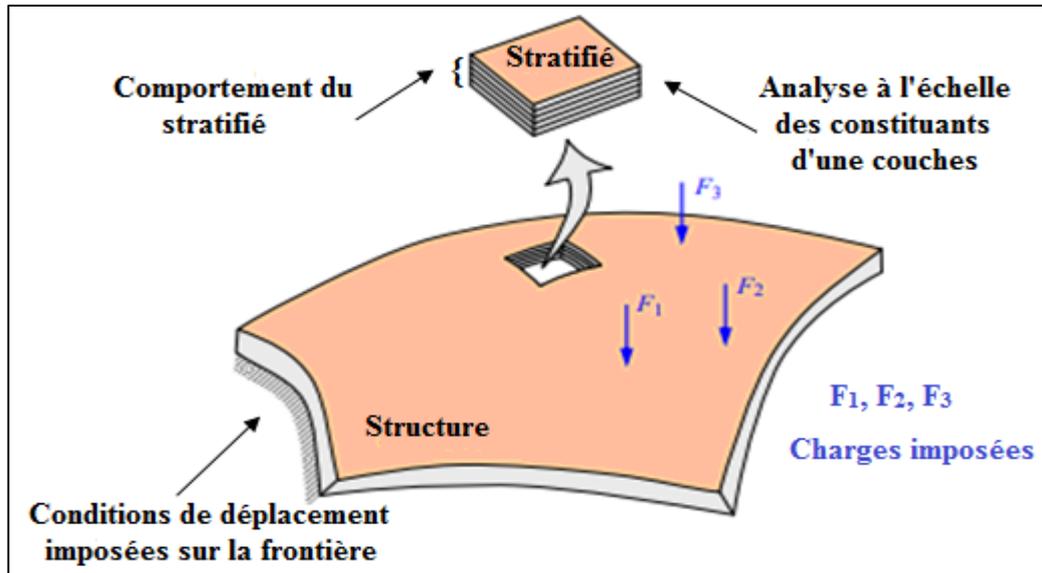
$$\sigma_{xxmax} = \sigma_0 = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2.11)$$

Les contraintes dans la couche k d'un stratifié peuvent être s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^k = -2a_{xx}^k \sigma_0 \frac{z}{h}, \\ \sigma_{yy}^k = -2a_{yy}^k \sigma_0 \frac{z}{h}, \\ \sigma_{xy}^k = -2a_{xy}^k \sigma_0 \frac{z}{h}. \end{cases} \quad (2.12)$$

2.2 Analyse du comportement mécanique

Il est fondamental pour le concepteur de prévoir et de connaître aussi précisément que possible les caractéristiques géométriques d'un mélange (renfort + matrice) qui est la structure de base des pièces composites. L'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite est schématisée sur la figure (2.5).



Pour caractériser le comportement mécanique de la structure composite

Il est nécessaire de connaître le champ de contraintes et celui des déplacements en tout point de la structure

Processus d'étude

Analyse à l'échelle des constituants d'une couche



Comportement du stratifié ou sandwich



Analyse de la structure composite

Analyse à l'échelle des constituants d'une couche

Analyse des propriétés mécaniques et du comportement à la rupture d'une couche en fonction des constituants

Comportement du stratifié ou sandwich

Analyse des propriétés mécaniques et du comportement à la rupture du matériau stratifié ou sandwich en fonction des couches

Figure 2.5 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite [2].

2.2.1 Constitution d'un matériau composite unidirectionnel

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposées dans une matrice.

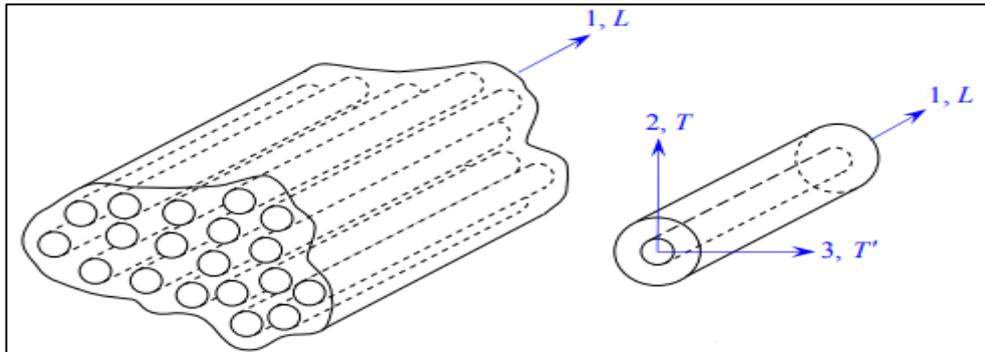


Figure 2.6 : Composite unidirectionnel [2].

Un pli de composite unidirectionnel comprend plusieurs fibres parallèles qui se noient dans la matrice (Figure 2.7). En général, l'épaisseur d'un pli de composite est supérieure à 0,1 mm tandis que le diamètre des fibres est environ 10 μm .

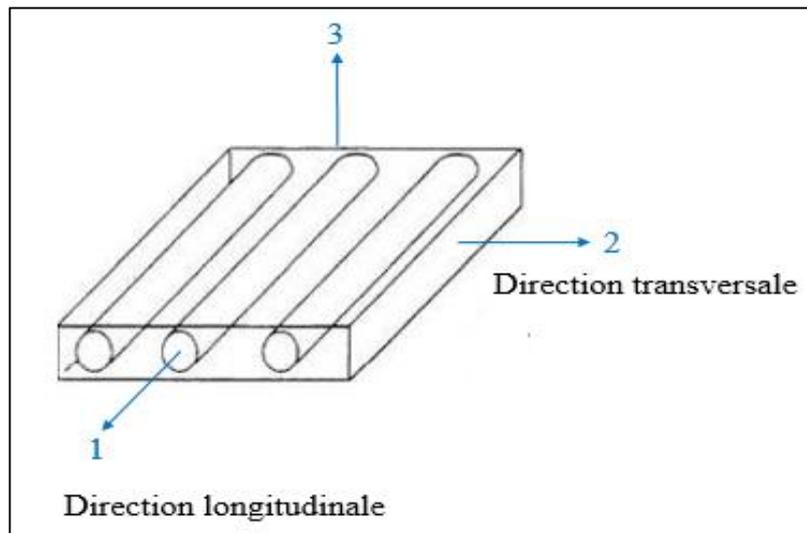


Figure 2.7 : Schéma d'un pli de composite unidirectionnel [1].

2.2.2 Caractéristiques du mélange renfort-matrice

On qualifie couramment le nom de pli le demi-produit (renfort + matrice) présenté sous forme quasi bidimensionnelle :

- Un unidirectionnel + matrice ;
- Un tissu (chaîne + trame) + matrice ;
- Un mat + matrice.

2.2.3 Composition du composite (fibre, matrice)

2.2.3.1 Fractions volumiques et massiques

Un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique, soit en fraction massique. Les fractions massiques sont plus faciles à mesurer lors de l'élaboration des matériaux. En revanche, les fractions volumiques interviennent directement dans les modèles théoriques décrivant le comportement mécanique des matériaux. Il est donc nécessaire de savoir passer de l'une à l'autre de ces fractions. Ces expressions seront établies pour un matériau à deux phases, puis étendues à un matériau à plus de deux phases [2].

A) Fractions massiques

Les fractions massiques sont définies de la même manière à partir des masses respectives de matériau composite, de fibres, de matrice. Les fractions massiques ou fractions en masse de fibres et de matrice s'écrivent respectivement [2] :

$$P_f = \frac{p_f}{p_c} \quad (2.13)$$

$$P_m = \frac{p_m}{p_c} \quad (2.14)$$

Avec :

$$P_m = 1 - P_f \quad (2.15)$$

B) Fractions volumiques

Considérons un volume v_c de matériau composite, composé d'un volume v_f de fibres et d'un volume v_m de matrice. Par la suite, les indices **c**, **f** et **m** seront systématiquement utilisés comme indices respectifs des caractéristiques du matériau composite, des fibres et de la matrice. La fraction volumique de fibres est [2] :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2.16)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

La fraction volumique de matrice est :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.17)$$

Avec :

$$V_m = 1 - V_f \quad (2.18)$$

Puisque :

$$v_c = v_f + v_m \quad (2.19)$$

On peut écrire aussi :

$$V_{fibre} = \frac{\frac{P_{fibre}}{\rho_{fibre}}}{\frac{P_{fibre}}{\rho_{fibre}} + \frac{P_{matrice}}{\rho_{matrice}}} \quad (2.20)$$

Où :

- V_{fibre} : Le taux volumique de fibre de verre dans le composite ;
- P_{fibre} : La masse de fibres ;
- ρ_{fibre} : La masse volumique de fibres ;
- $P_{matrice}$: La masse de la résine ;
- $\rho_{matrice}$: La masse volumique de la résine.

C) Présence de porosités

Il peut arriver que la masse volumique mesurée expérimentalement ne coïncide pas avec la valeur calculée à partir des masses des constituants introduites. Dans le cas où ce désaccord dépasse les précisions expérimentales, il peut être attribué à la présence de porosités. La différence entre la masse volumique ρ_{ct} calculée et la masse volumique ρ_{ce} mesurée expérimentalement permettra d'estimer la fraction volumique V_p de porosités par l'expression [2] :

$$V_p = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (2.21)$$

La présence de porosités dans un composite peut entraîner une diminution significative de ses caractéristiques mécaniques, en augmentant la dispersion de ses valeurs. La présence de porosités augmente la sensibilité du matériau composite à

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

l'environnement extérieur : augmentation de l'absorption de l'humidité, diminution de la résistance aux produits chimiques, etc. Il sera donc important d'avoir une estimation de la proportion de porosités, de manière à évaluer la qualité d'un composite, un matériau composite de qualité contiendra moins de 1 % en volume de porosités, alors qu'un composite de médiocre qualité pourra atteindre 5 %.

2.2.4 Calcul des caractéristiques mécaniques du composite

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre, voire de prédire son comportement en service.

Afin de caractériser son comportement dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais, car toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques (limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.).

2.2.4.1 Modules d'élasticité

La détermination de bornes sur les modules d'élasticité utilise les théorèmes variationnels de l'énergie. Dans une approche déplacements, le théorème de l'énergie potentielle totale permet de trouver les bornes supérieures, alors que le théorème de l'énergie potentielle complémentaire permet, dans le cadre d'une approche contraintes, d'accéder aux bornes inférieures [15].

Parmi les divers travaux effectués dans ce cadre, nous citerons d'une part les travaux de Z. Hashin [16] et R. Hill [17], effectués dans le cas de fibres de différents diamètres réparties au hasard mais avec une proportion donnée en volume. D'autre part, Z. Hashin et B.W. Rosen [18] ont effectué des travaux analogues dans le cas de fibres de diamètres identiques réparties suivant un arrangement hexagonal.

A) Module de cisaillement

Les modules (G_m, G_f) s'expriment à l'aide des modules d'Young (E_m, E_f) et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres selon [2] :

$$\begin{cases} G_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (2.22)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

B) Module de compressibilité

Les modules (k_m, k_f) s'expriment à l'aide des modules d'Young (E_m, E_f) et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres selon [2] :

$$\begin{cases} k_i = \frac{E_i}{3(1 - 2\nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (2.23)$$

C) Module de compression latérale

L'écriture des expressions trouvées est facilitée en introduisant les modules de compression latérale (sans déformation longitudinale) K_m et K_f , respectivement de la matrice et des fibres. Ces modules sont liés aux modules de compressibilité (k_m, k_f) et aux modules de cisaillement (G_m, G_f) par les expressions [2] :

$$\begin{cases} K_i = k_i + \frac{G_i}{3} \\ i = m, f \end{cases} \quad (2.24)$$

On peut écrire aussi :

$$\begin{cases} K_i = \frac{E_i}{2(1 - 2\nu_i)(1 + \nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (2.25)$$

D) Module d'Young longitudinal

Le module d'Young longitudinal est déterminé dans un essai de traction longitudinale (Figure 2.8). L'hypothèse simplificatrice est de supposer une déformation uniforme et identique dans la fibre et dans la matrice [2].

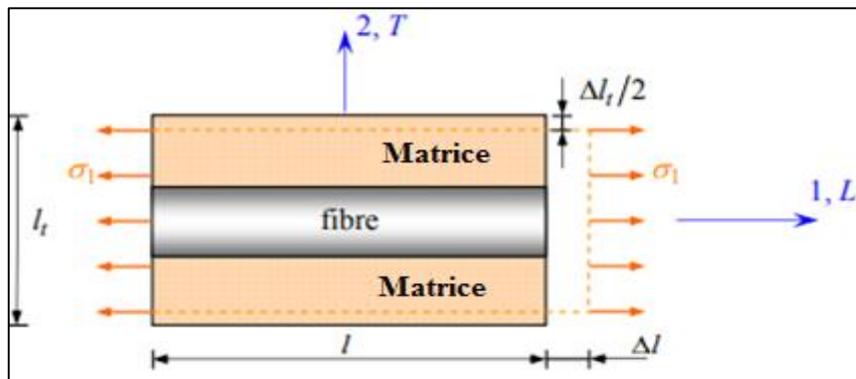


Figure 2.8 : Schéma simplifié d'une traction longitudinale [2].

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Si Δl est l'allongement de la cellule (identique à celui de la fibre et de la matrice), la déformation longitudinale imposée à la cellule est :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.26)$$

Où l est la longueur de cellule considérée. L'identité des déformations dans la fibre et dans la matrice impose :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (2.27)$$

Si la fibre et la matrice ont un comportement élastique, les contraintes dans la fibre et la matrice sont exprimées par :

$$\begin{cases} \sigma_f = E_f \varepsilon_1 \\ \sigma_m = E_m \varepsilon_1 \end{cases} \quad (2.28)$$

La charge totale appliquée est :

$$F_1 = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m \quad (2.29)$$

Où S_f et S_m sont respectivement les aires des sections droites de la fibre et de la matrice. Si S est l'aire de la section droite de la cellule moyenne, la contrainte moyenne $\sigma_1 = \frac{F_1}{S}$ s'écrit :

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.30)$$

Cette contrainte moyenne est liée à la déformation de la cellule par le module d'Young longitudinal :

$$\sigma_1 = E_L \varepsilon_1 \quad (2.31)$$

La combinaison des relations (2.28) à (2.31) conduit à l'expression du module d'Young longitudinal :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.32)$$

À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de cisaillement de la matrice (G_m), et des modules d'Young (E_m, E_f), modules de compressibilité latérale (K_m, K_f), et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres.

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Le module d'Young longitudinal s'écrit :

$$E_L = E_f V_f + E_m(1 - V_f) + \frac{4V_f(1 - V_f)(\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{1 - V_f}{K_f}} \approx E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (2.33)$$

E) Coefficient de Poisson longitudinal

Le coefficient de Poisson est déterminé dans un essai de traction longitudinal, schématisé sur la figure (2.9) [2].

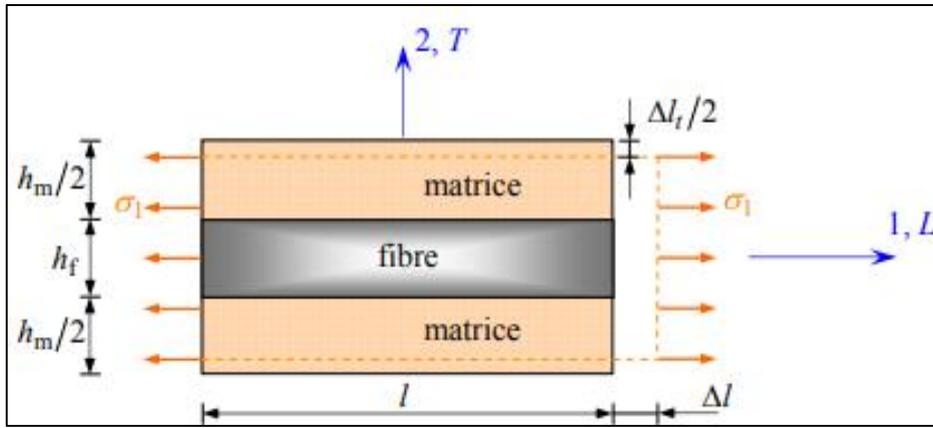


Figure 2.9 : Schéma par couches d'une traction longitudinale [2].

Les déformations transverses dans la matrice et dans les fibres s'écrivent :

$$\begin{cases} \varepsilon_{2m} = -\nu_m \varepsilon_1 \\ \varepsilon_{2f} = -\nu_f \varepsilon_1 \end{cases} \quad (2.34)$$

L'allongement transverse de la cellule élémentaire est :

$$\Delta l_t = -\nu_m \varepsilon_1 h_m - \nu_f \varepsilon_1 h_f \quad (2.35)$$

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_t}{h_f + h_m} = -[\nu_m(1 - V_f) + \nu_f V_f] \varepsilon_1 \quad (2.36)$$

D'où l'expression du coefficient de Poisson :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m(1 - V_f) \quad (2.37)$$

À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de cisaillement de la matrice (G_m), des modules de compressibilité latérale (K_m, K_f), et les coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres. On peut écrire aussi :

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m (1 - V_f) + \frac{V_f (1 - V_f) (v_f - v_m) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f} \right)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{1 - V_f}{K_f}} \approx v_f V_f + v_m (1 - V_f) \quad (2.38)$$

F) Module de cisaillement longitudinal

Le module de cisaillement longitudinal G_{LT} est déterminé dans un essai de cisaillement longitudinal schématisé sur la figure (2.10) [2].

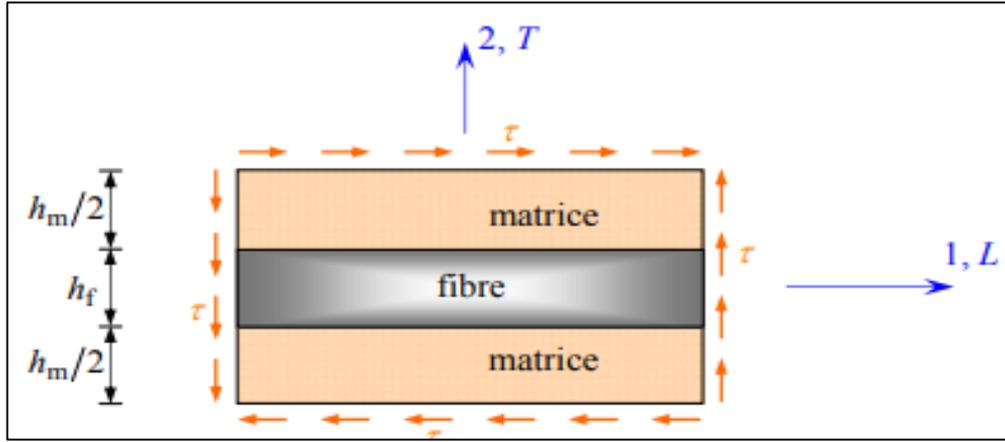


Figure 2.10 : Schéma par couches d'un essai de cisaillement longitudinal [2].

Les déformations en cisaillement de la fibre et de la matrice s'expriment donc suivant :

$$\begin{cases} \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \\ \gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \end{cases} \quad (2.39)$$

Les déformations induites dans la fibre et dans la matrice sont :

$$\begin{cases} \delta_f = h_f \gamma_f \\ \delta_m = h_m \gamma_m \end{cases} \quad (2.40)$$

La déformation totale de la cellule est :

$$\delta = \delta_f + \delta_m = h_f \gamma_f + h_m \gamma_m \quad (2.41)$$

Et l'angle de cisaillement de la cellule est déterminé par l'expression :

$$\gamma = \frac{\delta}{h_f + h_m} = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f) \quad (2.42)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Cet angle est lié à la contrainte de cisaillement par le module de cisaillement longitudinal G_{LT} suivant la relation :

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{LT}} \quad (2.43)$$

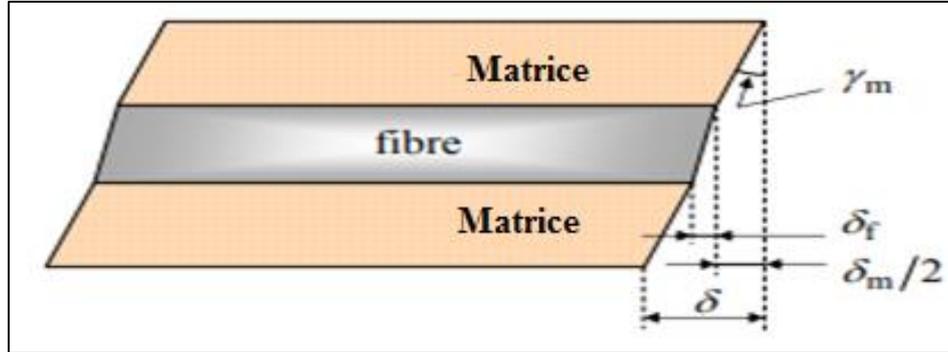


Figure 2.11 : Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre [2].

En combinant les expressions (2.39) à (2.43), nous obtenons :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{1 - V_f}{G_m} \quad (2.44)$$

À l'aide de la fraction volumique des fibres et des modules de cisaillement (G_m , G_f) de la matrice et des fibres. On peut écrire aussi :

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)} \quad (2.45)$$

G) Module de compression latéral

L'expression de module de compression latérale été établie par R. Hill [17] et Z. Hashin [19]. À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de compressibilité latérale (K_m) de la matrice, et des modules de cisaillement (G_m , G_f), modules de compressibilité (k_m , k_f), et coefficients de Poisson (ν_m , ν_f) de la matrice et des fibres.

Le module de compression latéral s'écrit :

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3}} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}} \quad (2.46)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

H) Module de cisaillement transversal

Le module de cisaillement transverse $G_{TT'}$, déterminé dans un essai de cisaillement transverse. Toutefois, aucune solution analytique exacte n'a été trouvée au problème du cisaillement transverse de la cellule élémentaire cylindrique. Aucune expression du module $G_{TT'}$, analogue aux expressions précédentes trouvées pour les autres modules, ne peut donc être proposée dans ce contexte. Cette constatation aboutit à envisager une autre approche [2].

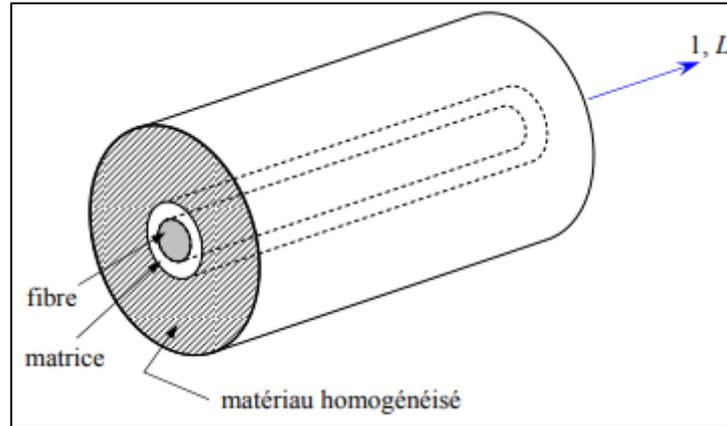


Figure 2.12 : Modèle cylindrique à trois phases [2].

La méthode utilisée pour lever les difficultés évoquées dans le paragraphe précédent consiste à considérer un modèle cylindrique à trois phases (Figure 2.12). Dans ce modèle, la cellule cylindrique élémentaire est entourée d'un cylindre de grandes dimensions, constitué par le matériau équivalent homogénéisé et possédant donc les propriétés effectives homogénéisées du matériau composite. Ce cylindre est soumis sur ses frontières extérieures aux conditions de l'essai de cisaillement transverse. Un tel modèle a été développé par R.M. Christensen et K.H. Lo [15, 20], à partir des travaux effectués par J.J. Hermans [21]. Ce modèle conduit à l'expression du module transverse [2].

À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de compressibilité (k_m), et des modules de cisaillement (G_m , G_f), et coefficients de Poisson (ν_m , ν_f) de la matrice et des fibres. Le module de cisaillement transverse s'écrit :

$$G_{TT'} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right) \quad (2.47)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

I) Module d'Young transversal

Le module d'Young transverse est déterminé dans un essai de traction transverse où le composite est chargé suivant la direction normale aux fibres [2].

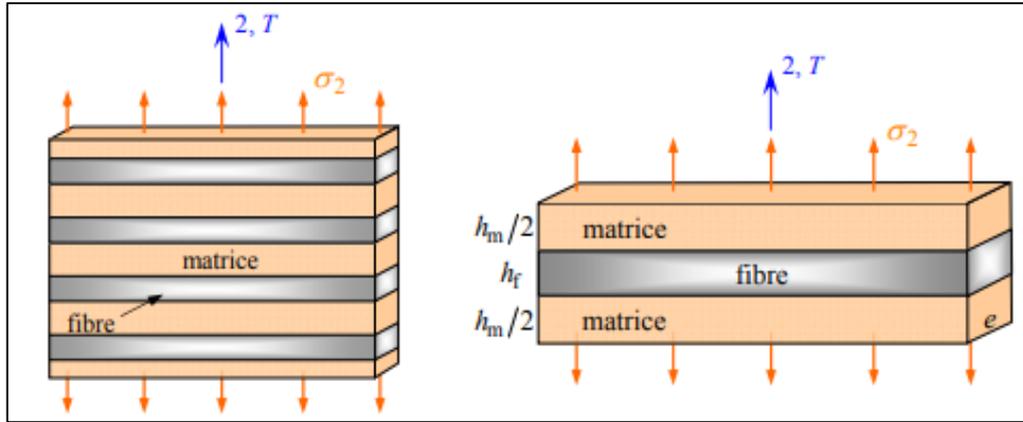


Figure 2.13 : Schématisation par couches d'un composite unidirectionnel [2].

La hauteur des couches doit simplement vérifier :

$$\begin{cases} V_f = \frac{h_f}{h_f + h_m} \\ V_m = \frac{h_m}{h_f + h_m} \end{cases} \quad (2.48)$$

La charge F_2 imposée suivant la direction transverse est transmise intégralement dans la fibre et dans la matrice, imposant des contraintes égales :

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_2 \quad (2.49)$$

Il en résulte que les déformations respectives de la fibre et de la matrice dans la direction transverse s'écrivent :

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \\ \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \end{cases} \quad (2.50)$$

L'allongement transverse d'une cellule élémentaire résulte des allongements cumulés dans la fibre et la matrice. Soit :

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \quad (2.51)$$

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m} = \varepsilon_f \frac{h_f}{h_f + h_m} + \varepsilon_m \frac{h_m}{h_f + h_m} \quad (2.52)$$

Soit :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \quad (2.53)$$

Cette déformation est liée à la contrainte imposée sur la cellule, par le module transverse :

$$\sigma_2 = E_T \varepsilon_2 \quad (2.54)$$

La combinaison des expressions (2.49) à (2.54) conduit à l'expression du module transverse :

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m} \quad (2.55)$$

Cette expression est connue sous le nom de loi inverse des mélanges et peut être réécrite, en rapportant le module transverse au module d'Young de la matrice, suivant une relation sans dimension sous la forme :

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_m}{E_f} - 1\right) V_f} \quad (2.56)$$

À l'aide de module de compression latéral (K_L), module de cisaillement transversal ($G_{TT'}$), module d'élasticité longitudinal (E_L), et coefficient de Poisson longitudinal (ν_{LT}). Le module d'Young transversal s'écrit :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2\frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} \quad (2.57)$$

2.3 Rupture et endommagement des matériaux composites

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut. On parlera de microfissuration. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de macro fissuration. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique [2].

2.3.1 Divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires [2] :

- Rupture des fibres ;
- Rupture de la matrice ;
- Décohésion fibre-matrice ;
- Rupture des stratifiés.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées [2].

2.3.1.1 Rupture des fibres

Ci des cassures de fibres peuvent survenir dans le prolongement des décohésions fibres matrice la rupture des fibres intervient, par définition du renfort, a un stade avancé de l'endommagement de la structure et de manière brutale (comportement fragile) [2].

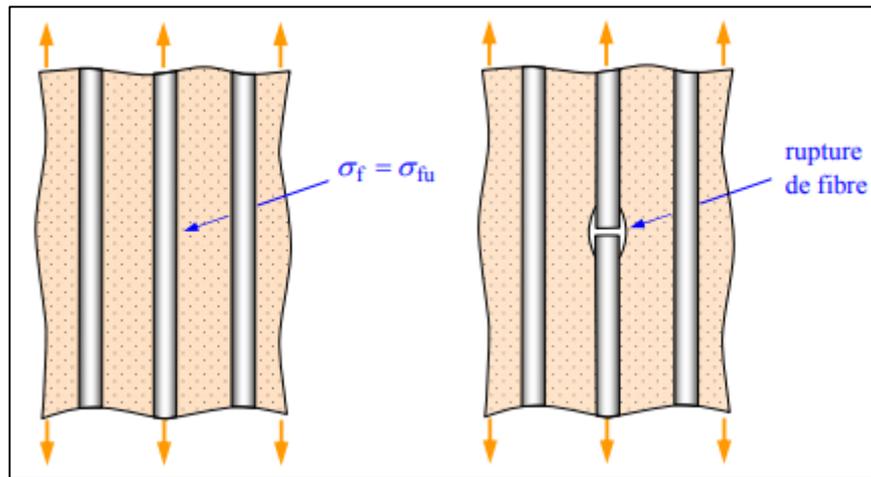


Figure 2.14 : Rupture de fibre [2].

Elles interviennent essentiellement au sein des plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation pour lesquels les fibres reprennent le plus d'efforts [2].

2.3.1.2 Rupture de la matrice

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (Figure 2.15) lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice [2].

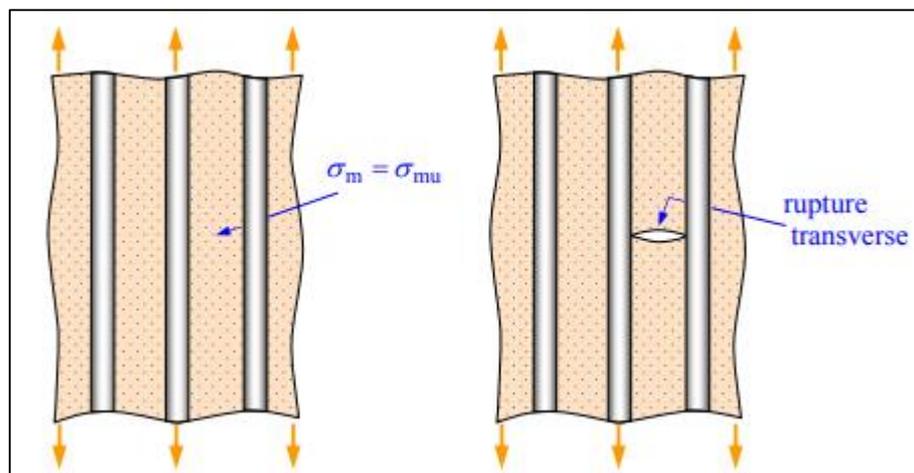


Figure 2.15 : Rupture transverse de la matrice [2].

Soit par fissuration longitudinale (Figure 2.16) lorsque la contrainte de cisaillement τ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture τ_{mu} [2].

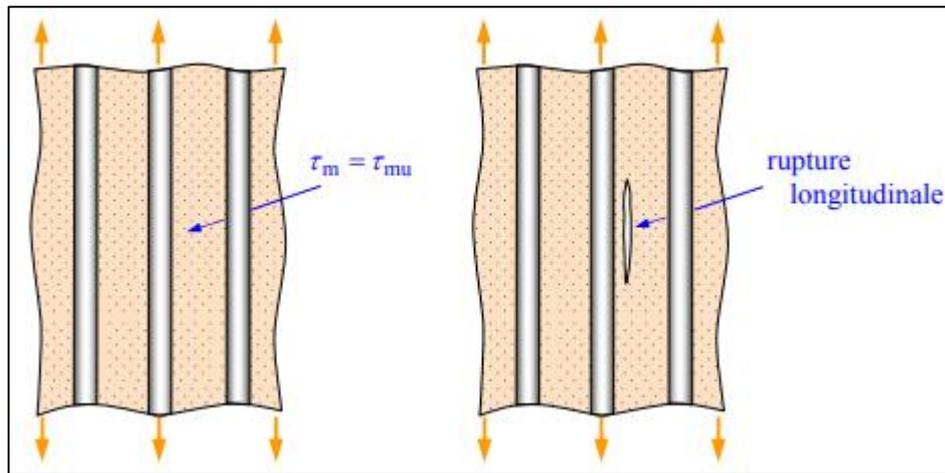


Figure 2.16 : Rupture longitudinale de la matrice [2].

Les fissures matricielles s'initient généralement aux zones de concentration des contraintes telles que les hétérogénéités du matériau. Elles se propagent ensuite suivant l'orientation du chargement, notamment perpendiculairement à l'axe de traction ou parallèlement à la sollicitation dans le cas d'un cisaillement. On notera que certains auteurs distinguent la fissuration matricielle suivant sa localisation inter et intra torons.

Dans les cas des composites à matrice céramique (CMC). Ce mécanisme intervient en premier lieu du fait d'une faible déformation à la rupture de la matrice fragile et constitue l'un de leurs mécanismes de dégradation prépondérant [2].

2.3.1.3 Décohésion fibre-matrice

Dans le cas où la contrainte de décohésion est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice ($\tau_d < \tau_{mu}$), il se produit une rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice (Figure 2.17) [2].

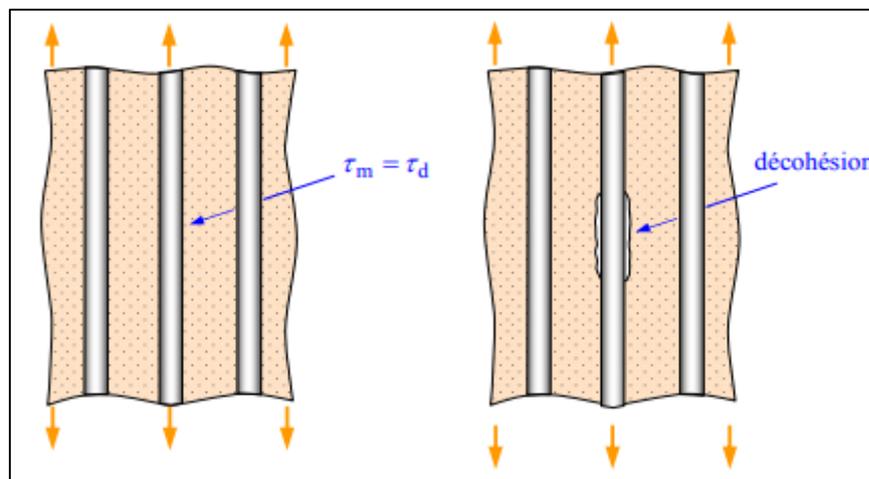


Figure 2.17 : Décohésion fibre-matrice [2].

Chapitre 2 Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

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

Pour les résines plastiques présentant une importante déformation à rupture, l'interface fibre-matrice constitue le point plus faible à l'intérieur des plis. Ces ruptures d'adhérence, généralement induites par des contraintes de cisaillement locales, se propagent le long des fibres jusqu'à former des fissures transverses (traversant l'intégralité d'un pli) dans le cas des stratifiées unidirectionnelles ou longitudinales dans le plan des plis dans le cas de composites tissés [2].

En ce qui concerne les CMC en revanche, ce mécanisme est associé à la fissuration matricielle lorsque ces défauts atteignent une zone de renfort. La nature de l'interface joue dans ce cas un rôle majeur qui conditionne la progression de l'endommagement [2] :

- Si l'interface est forte, elle peut limiter voir stopper l'extension des fissures en assurant un transfert de charge vers les parties saines ;
- Si l'interface est faible, la fissuration matricielle est déviée à l'interface amenant comme auparavant des fissurations transverses (suivant le contour des renforts perpendiculaires à la sollicitation), ou longitudinales (à l'interface des renforts parallèles à la sollicitation).

2.3.1.4 Rupture des stratifiés

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinale de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibres), s'ajoute un mécanisme de rupture entre les couches, appelé rupture par délaminage (Figure 2.18) [2].

Les mécanismes de rupture induits dépendent de :

- La nature des constituants ;
- L'architecture des couches et l'orientation des fibres ;
- Le mode de sollicitation mécanique imposé.

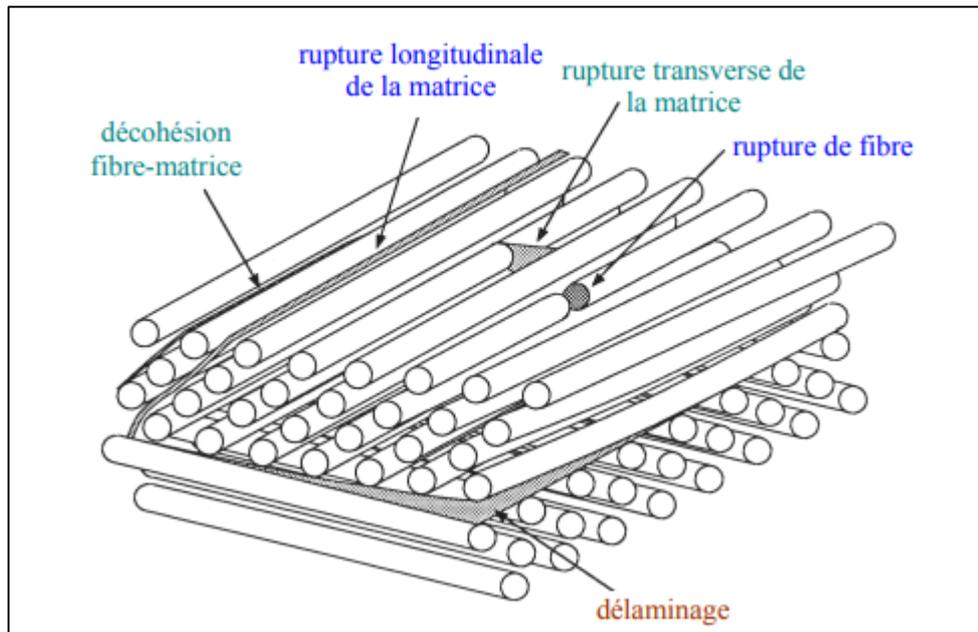


Figure 2.18 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [2].

2.3.2 Critères de rupture

Les critères de rupture sont établis dans le cas d'une couche d'un stratifié et peuvent être classés suivant :

- Des critères en contraintes maximales ;
- Des critères en déformations maximales ;
- Des critères interactifs, souvent appelés critères énergétiques.

Les critères de la contrainte maximale et de contrainte maximale ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble des résultats expérimentaux. D'autre part, ces critères excluent l'existence d'interactions entre les contraintes ou déformations principales : les mécanismes de rupture longitudinale, transversale ou en cisaillement sont supposés se produire indépendamment [2].

Les critères interactifs ont alors été recherchés en étendant aux matériaux orthotropes le critère de Von Mises, utilisé pour les matériaux isotropes. Le critère de Von Mises est relié à l'énergie de déformation emmagasinée par unité de volume du matériau déformé. C'est la raison pour laquelle ces critères interactifs sont parfois appelés énergétiques.

2.3.3 Observations des mécanismes de rupture

Le suivi des mécanismes de rupture peut être effectué par diverses techniques :

- ❖ Observation par microscopie ;
- ❖ Visualisation par radiographie ;
- ❖ Analyse par émission acoustique.

2.3.3.1 Observation par microscopie

La technique la plus simple à mettre en œuvre est l'observation à l'aide d'une binoculaire ou d'un microscope optique, permettant éventuellement une observation continue des phénomènes de rupture au cours des essais. L'observation est ponctuelle et la profondeur de champ limitée. La microscopie électronique à balayage augmente cette profondeur, tout en permettant d'atteindre des grossissements élevés [2].

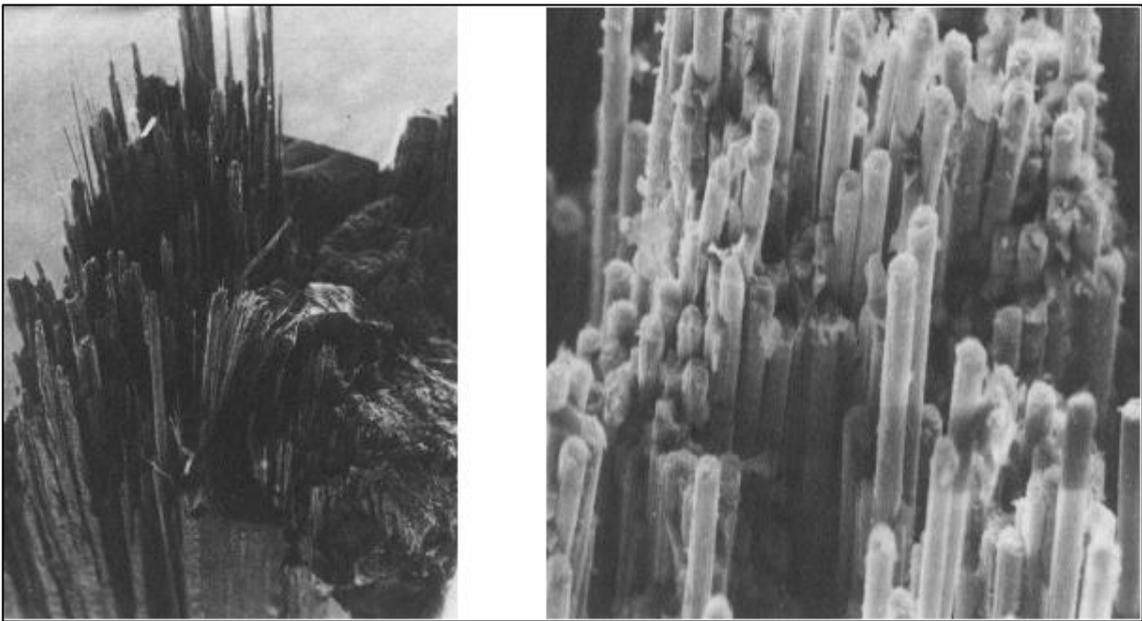


Figure 2.19 : Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone [2].

Chapitre 3

Étude expérimentale :

**Essai en flexion trois (03) points
statique**

3.1 Position du problème

Un matériau composite stratifié de fibre de verre et de résine époxyde est caractérisé en flexion trois (03) points statique en vue de déterminer son module d'élasticité et sa contrainte à la rupture.

3.2 Caractéristiques mécaniques du matériau étudié

Le matériau composite est un stratifié obtenu par moulage sous vide qui est appelé aussi moulage en sac. Les caractéristiques principales des constituants sont données dans les tableaux suivants :

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques de la résine époxyde.

Module de Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Coefficient de poisson	Masse volumique (kg/m ³)
2.8	74	115	0.3	1200

Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques de fibres de verre.

Masse surfacique (g/m ²)	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture en traction sur mèche (MPa)	Allongement à la rupture (%)
300	2600	73	30	0.22	2500	4.8

3.3 Pyrolyse du matériau étudié

Pour vérifier les taux de résine et de renforts contenus dans chaque matériau nous avons eu recours à une technique appelée pyrolyse [22]. La pyrolyse est la décomposition thermique de matières organiques en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène.

La norme NF EN ISO 1172 nous donne une méthode pour vérifier ces quantités par pesée des échantillons de stratifié avant et après calcination. Les échantillons sont enfournés dans un four à renouvellement d'air enflammé portés à une température de 600°C pendant huit (08) heures. La teneur en matière non combustible est obtenue par pesée de l'échantillon avant et après calcination et on obtient les fractions massiques de la fibre et de la résine nécessaire pour calcul des modules de l'ingénieur.

Chapitre 3 Étude expérimentale : Essai en flexion trois (03) points statique

Les propriétés mécaniques des composites dépendent principalement des quantités de fibre constituant les composites d'où la nécessité de vérifier le taux volumique des fibres et résine après leur fabrication.

3.3.1 Découpage des échantillons avant pesage

Sur une tronçonnasse nous avons procédé à la découpe des échantillons. La figure (3.1) illustre les échantillons après la découpe :



Figure 3.1 : Échantillons après la découpe.

Tableau 3.3 : Caractéristiques géométriques des échantillons.

	Longueur L (mm)	Largeur l (mm)	Épaisseur h (mm)
Échantillon 1	20,1400	20,0800	4,0200
Échantillon 2	20,0200	20,0000	4,0200
Échantillon 3	20,0400	20,1000	4,0000
Échantillon 4	20,0000	19,9800	3,9600
Échantillon 5	20,2000	20,1000	4,0400

3.3.2 Pesage et calcination des échantillons

L'opération de pesage se déroule au niveau de l'unité de recherche en matériaux avancés (URMA/CRTI). On utilise pour cette opération une balance électronique (balance analytique de haute précision KERN) d'une précision de quatre chiffres après la virgule.

Les échantillons découpés et numérotés sont pesés l'un après l'autre.



Figure 3.2 : Balance électronique [23].

Dans l'opération de calcination on utilise un four à moufle. La température a été réglée à 600°C. La durée de séjour des échantillons sera de huit (08) heures ce qui permettra la calcination totale de la résine composite.



Figure 3.3 : Four à moufle [23].

La figure (3.4) illustre les échantillons avant la calcination :



Figure 3.4 : Échantillons dans un four à moufle [23].

La figure (3.5) illustre les échantillons après la calcination :



Figure 3.5 : Échantillons après la calcination [23].

Les échantillons pesés et numérotés seront enfournés et défournés selon un même ordre pour pouvoir faire la différence de masse de chaque échantillon. Le défournement des échantillons s'est fait après refroidissement. On utilise une balance pour obtenir la masse des échantillons après la calcination.

- ❖ Les premières observations nous confirment la calcination totale de la résine (matrice organique). Elle nous permettra aussi de déterminer les séquences d'empilement du stratifié avant la calcination. L'échantillon est pesé en gramme (M_1). Après refroidissement le résidu de fibre de verre est pesé en gramme (M_2).

Chapitre 3 Étude expérimentale : Essai en flexion trois (03) points statique

Notre matériau composite est un stratifié à fibres de verre tressés en taffetas de cinq (05) plis et résine époxyde. La figure (3.6) illustre les cinq (05) plis de ce stratifié :



Figure 3.6 : Plis du matériau étudié [23].

3.3.3 Détermination de la perte de résine, taux de résine et taux de fibres de verre (%)

La perte de résine par calcination est :

$$M = M_1 - M_2 \quad (3.1)$$

Le taux de résine en pour cent est alors :

$$R\% = \frac{M}{M_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Le taux de fibres de verre en pour cent est donc :

$$F\% = 100 - R\% \quad (3.3)$$

❖ Méthode de calcul

Exemple pour l'échantillon N°1

✓ La perte de résine par calcination :

$$M_1 = M_{1_1} - M_{2_1} = 2,6990 - 1,5747 = 1,1243.$$

✓ Le taux de résine en pour cent :

$$R_1\% = \frac{M_1}{M_{1_1}} \times 100 = \frac{1,1243}{2,6990} = 41,66\%.$$

✓ Le taux de de fibres de verre en pour cent :

$$F_1\% = 100 - R_1\% = 100 - 41,66 = 58,34\%.$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 3.4 : Taux de résine et taux de fibres de verre (%).

Matériau	N° Échantillon	Poids (g)		La perte de résine par calcination M (g)	Le taux de résine R (%)	Le taux de de fibres de verre F (%)
		Masse avant calcination	Masse après calcination			
Stratifié en taffetas	1	2,6990	1,5747	1,1243	41,66	58,34
	2	2,6859	1,5410	1,1449	42,63	57,37
	3	2,6893	1,5162	1,1731	43,63	56,37
	4	2,6802	1,5746	1,1056	41,26	58,74
	5	2,7010	1,5555	1,1455	42,42	57,58

3.3.4 Détermination de la fraction massique

À partir des équations (2.13, 2.14 et 2.15) on va calculer la fraction massique de fibres et de la résine :

✓ **Méthode de calcul**

Exemple pour l'échantillon N°1

❖ La fraction massique de fibres :

$$P_f = \frac{p_f}{p_c}$$

$$P_{f_1} = \frac{p_{f_1}}{p_c} = \frac{1,5747}{2,6990} = 0,5834.$$

❖ La fraction massique de résine :

$$P_m = \frac{p_m}{p_c}$$

$$P_{m_1} = \frac{p_{m_1}}{p_c} = \frac{1,1243}{2,6990} = 0,4166.$$

Ou :

$$P_m = 1 - P_f.$$

$$P_{m_1} = 1 - P_{f_1} = 1 - 0,5834 = 0,4166.$$

❖ La fraction massique de fibre moyenne :

$$P_{f_m} = \frac{p_{f_1} + p_{f_2} + p_{f_3} + p_{f_4} + p_{f_5}}{5};$$

$$P_{f_m} = \frac{0,5834 + 0,5737 + 0,5637 + 0,5874 + 0,5758}{5};$$

$$P_{f_m} = 0,5768.$$

❖ La fraction massique de résine moyenne :

$$P_{m_m} = \frac{p_{m_1} + p_{m_2} + p_{m_3} + p_{m_4} + p_{m_5}}{5};$$

$$P_{m_m} = \frac{0,5834 + 0,5737 + 0,5637 + 0,5874 + 0,5758}{5};$$

$$P_{m_m} = 0,4232.$$

Les résultats obtenus de la pyrolyse sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.5 : Résultats obtenus de la pyrolyse du stratifié.

Matériau	N° Éch	Poids (g)				Fraction massique			
		Avant la pyrolyse	Après la pyrolyse	Masse de Fibre	Masse de résine	Fibre	Moyenne fibres	Résine	Moyenne résine
Stratifié en taffetas	1	2,6990	1,5747	1,5747	1,1243	0,5834	0,5768	0,4166	0,4232
	2	2,6859	1,5410	1,5410	1,1449	0,5737		0,4263	
	3	2,6893	1,5162	1,5162	1,1731	0,5637		0,4363	
	4	2,6802	1,5746	1,5746	1,1056	0,5874		0,4126	
	5	2,7010	1,5555	1,5555	1,1455	0,5758		0,4242	

3.3.5 Détermination de la fraction volumique

À partir de l'équation (2.20) on va calculer le taux de fraction volumique de fibres de verre :

$$V_{fibre} = \frac{\frac{M_{fibre}}{\rho_{fibre}}}{\frac{M_{fibre}}{\rho_{fibre}} + \frac{M_{matrice}}{\rho_{matrice}}}$$

Le tableau suivant présente le calcul de la fraction volumique de fibre :

Tableau 3.6 : Calcul de la fraction volumique.

	M_{fibre} (kg) ($\times 10^{-3}$)	ρ_{fibre} (kg/m ³)	$\frac{M_{fibre}}{\rho_{fibre}}$ ($\times 10^{-7}$)	$M_{matrice}$ ($\times 10^{-3}$)	$\rho_{matrice}$ (kg/m ³)	$\frac{M_{matrice}}{\rho_{matrice}}$ ($\times 10^{-7}$)	$V_{fibre} = \frac{\frac{M_{fibre}}{\rho_{fibre}}}{\frac{M_{fibre}}{\rho_{fibre}} + \frac{M_{matrice}}{\rho_{matrice}}}$
Stratifié en taffetas	0,5768	2600	2,2185	0,4232	1200	3,5267	0,3861

À partir de l'équation (2.18) on va calculer le taux de fraction volumique de la résine :

$$V_{résine} = 1 - V_{fibre}.$$

$$V_{résine} = 1 - 0,3861;$$

$$V_{résine} = 0,6139.$$

3.3.6 Détermination des modules d'élasticité

À partir de la fraction volumique des fibres (V_f), les propriétés mécaniques des couches constituant ce stratifié sont évaluées par des modèles micromécaniques (loi de mélange). Sachant que le module d'élasticité et le coefficient de poisson de la fibre de verre et de la matrice époxyde sont respectivement :

❖ $E_f = 73 \text{ GPa};$

❖ $E_m = 2,8 \text{ GPa};$

❖ $\nu_f = 0,22;$

❖ $\nu_m = 0,3.$

3.3.6.1 Modules des fibres et de la matrice

À partir des équations (2.22, 2.23 et 2.24) on va calculer les modules des fibres et de la matrice :

A) Pour les fibres

❖ Module de cisaillement

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)};$$

$$G_f = \frac{73}{2(1 + 0,22)};$$

$$G_f = 29,9180 \text{ GPa}.$$

❖ Module de compressibilité

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)};$$

$$k_f = \frac{73}{3(1 - 2 \times 0,22)};$$

$$k_f = 43,4524 \text{ GPa}.$$

❖ Module de compression latérale

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3};$$

$$K_f = 43,4524 + \frac{29,9180}{3};$$

$$K_f = 53,4251 \text{ GPa}.$$

Tableau 3.7 : Modules d'élasticité des fibres de verre.

Fibres						
Fraction volumique	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement (GPa)	Module de compressibilité (GPa)	Module de compression latérale (GPa)	
V_f	E_f	ν_f	G_f	k_f	K_f	
Stratifié en taffetas	0,3861	73	0,22	29,9180	43,4524	53,4251

B) Pour la matrice

❖ Module de cisaillement

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)};$$

$$G_m = \frac{2,8}{2(1 + 0,3)};$$

$$G_m = 1,0769 \text{ GPa.}$$

❖ Module de compressibilité

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)};$$

$$k_m = \frac{2,8}{3(1 - 2 \times 0,3)};$$

$$k_m = 2,3333 \text{ GPa.}$$

❖ Module de compression latérale

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3};$$

$$K_m = 2,3333 + \frac{1,0769}{3};$$

$$K_m = 2,6923 \text{ GPa.}$$

Tableau 3.8 : Modules d'élasticité de la matrice.

Matrice						
	Fraction volumique	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement (GPa)	Module de compressibilité (GPa)	Module de compression latérale (GPa)
	V_m	E_m	ν_m	G_m	k_m	K_m
Stratifié en taffetas	0,6139	2,8	0,3	1,0769	2,3333	2,6923

3.3.6.2 Module d'élasticité longitudinal

À partir des équations (2.32 et 2.33) on va calculer le module d'élasticité longitudinal :

$$E_L = E_f V_f + E_m(1 - V_f) + \frac{4V_f(1 - V_f)(v_f - v_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{1 - V_f}{K_f}} \approx E_f V_f + E_m(1 - V_f);$$

$$E_L = 73 \times 0,3861 + 2,8(1 - 0,3861) + \frac{4 \times 0,3861 \times (1 - 0,3861)(0,22 - 0,3)^2}{\frac{0,3861}{2,6923} + \frac{1}{1,0769} + \frac{1 - 0,3861}{53,4251}};$$

$$E_L = 29,9098 \text{ GPa.}$$

Ou :

$$E_L = E_f V_f + E_m(1 - V_f) = 73 \times 0,3916 + 2,8(1 - 0,3916);$$

$$E_L = 29,9042 \text{ GPa.}$$

3.3.6.3 Coefficient de poisson longitudinal

À partir des équations (2.37 et 2.38) on va calculer le coefficient de poisson longitudinal :

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) + \frac{V_f(1 - V_f)(v_f - v_m) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f} \right)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{1 - V_f}{K_f}}$$

$$\approx v_f V_f + v_m(1 - V_f);$$

$$v_{LT} = 0,22 \times 0,3861 + 0,3(1 - 0,3861)$$

$$+ \frac{0,3861(1 - 0,3861)(0,22 - 0,3) \left(\frac{1}{2,6923} - \frac{1}{53,4251} \right)}{\frac{0,3861}{2,6923} + \frac{1}{1,0769} + \frac{1 - 0,3861}{53,4251}}$$

$$v_{LT} = 0,2629.$$

Ou :

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) = 0,3 \times 0,3861 + 0,22(1 - 0,3861);$$

$$v_{LT} = 0,2691.$$

3.3.6.4 Module de cisaillement longitudinal

À partir de l'équation (2.45) on va calculer le module de cisaillement longitudinal :

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)};$$

$$G_{LT} = 1,0769 \times \frac{29,9180 (1 + 0,3861) + 1,0769 (1 - 0,3861)}{29,9180 (1 - 0,3861) + 1,0769 (1 + 0,3861)};$$

$$G_{LT} = 2,2845 \text{ GPa.}$$

3.3.6.5 Module de compression latérale

À partir de l'équation (2.46) on va calculer le module de compression latérale :

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3}} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3} G_m}};$$

$$K_L = 2,6923 + \frac{0,3861}{\frac{1}{43,4524 - 2,3333 + \frac{(29,9180 - 1,0769)}{3}} + \frac{1 - 0,3861}{2,3333 + \frac{4}{3} \times 1,0769}};$$

$$K_L = 4,8068 \text{ GPa.}$$

3.3.6.6 Module de cisaillement transversal

À partir de l'équation (2.47) on va calculer le module de cisaillement transversal :

$$G_{TT'} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3} G_m}{2k_m + \frac{8}{3} G_m} (1 - V_f)} \right);$$

$$G_{TT'} = 1,0769 \left(1 + \frac{0,3861}{\frac{1,0769}{29,9180 - 1,0769} + \frac{2,3333 + \frac{7}{3} 1,0769}{2 \times 2,3333 + \frac{8}{3} 1,0769} \times (1 - 0,3861)} \right);$$

$$G_{TT'} = 2,0394 \text{ GPa.}$$

3.3.6.7 Module d'élasticité transversal

À partir de l'équation (2.57) on va calculer le module d'élasticité transversal :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2\frac{\nu_{LT}^2}{E_L}};$$

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2 \times 4,8068} + \frac{1}{2 \times 2,0394} + 2 \times \frac{0,2691^2}{29,9098}};$$

$$E_T = 5,6490 \text{ GPa.}$$

Les résultats obtenus pour le stratifié sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.9 : Caractéristiques mécaniques du matériau étudié (Stratifié en taffetas).

Matériau	Fraction volumique de fibre de verre	Fraction volumique de résine époxyde	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	$G_{TT'}$ (GPa)	K_L (GPa)	ν_{LT}
Stratifié en taffetas	0,3861	0,6139	29,9098	5,6490	2,2845	2,0394	4,8068	0,2691

3.4 Essai mécanique

Plusieurs types d'essais mécaniques peuvent être réalisés pour la caractérisation d'un matériau passant par des essais statique, dynamique, destructif et non destructif. Dans notre expérience on va considérer l'essai de flexion trois point statique.

3.4.1 Préparation et découpage des éprouvettes d'essais

Les éprouvettes sont découpées sous forme parallélépipédique selon la norme NF EN ISO 178 à partir de plaques stratifié pour la flexion. Après la découpe, les éprouvettes sont ébavurées un léger ponçage, puis nettoyées.

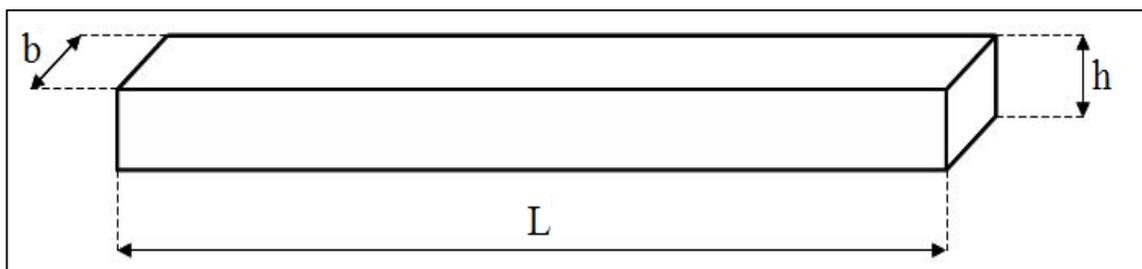


Figure 3.7 : Dimensions de l'éprouvette [1].

Avec :

- ❖ **L** : longueur de l'éprouvette ;
- ❖ **b** : largeur de l'éprouvette ;
- ❖ **h** : épaisseur de l'éprouvette.

3.4.2 Bancs d'essais/conditions expérimentales

Les essais de flexion sont effectués au niveau de l'unité de recherche en matériaux avancé (UBMA/CRTI) de l'université Badji-Mokhtar Annaba sur une machine universelle MTS 43, dotée d'un capteur de force et pilotée par ordinateur.



Figure 3.8 : Machine universelle MTS 43. [23].

Cinq (05) essais au mois sont réalisés pour ce type de stratifié, avec une vitesse d'essai 5 mm/min à une température ambiante de 23°C. La cellule de charge (dynamomètre) est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané du temps du déplacement, de la charge, et la déformation. Les informations sont stockées et traitées par ordinateur à l'aide du logiciel Testexpert V9.01.

3.4.3 Éprouvettes d'essais



Figure 3.9 : Éprouvettes d'essais [23].

Les éprouvettes testées ont dimension dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.10 : Dimensions des éprouvettes.

Dimensions N° Éprouvette	Longueur L (mm)	Largeur b (mm)	Épaisseur h (mm)
1	100,0000	15,1667	3,9667
2	100,0000	14,7367	4,0233
3	100,0000	15,0333	4,2933
4	100,0000	15,1367	4,0300
5	100,0000	15,0733	3,8900

3.4.4 Mise en place des éprouvettes

Les éprouvettes sont placées sur un dispositif équipant la machine d'essais de flexion trois (03) points MTS 43 (Figure 3.10). La distance entre appuis est choisie selon la norme ASTM. Tous les essais sont réalisés dans les mêmes conditions : nombre d'éprouvette, température d'essai, vitesse et charge.



Figure 3.10 : Mise en place de l'éprouvette [23].

La figure (3.11) illustre l'éprouvette pendant l'essai de flexion :

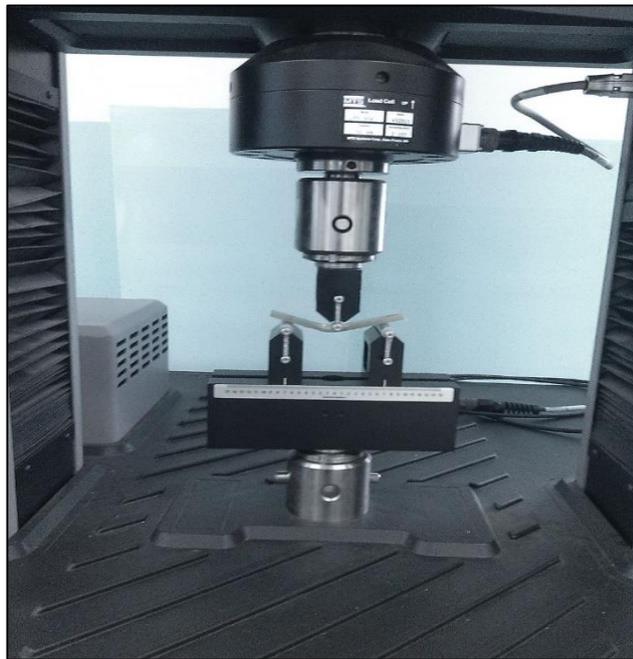


Figure 3.11 : Déformation de l'éprouvette [23].

3.4.5 Éprouvettes après la déformation

Les figures (3.12 et 3.13) illustrent les éprouvettes après la déformation :

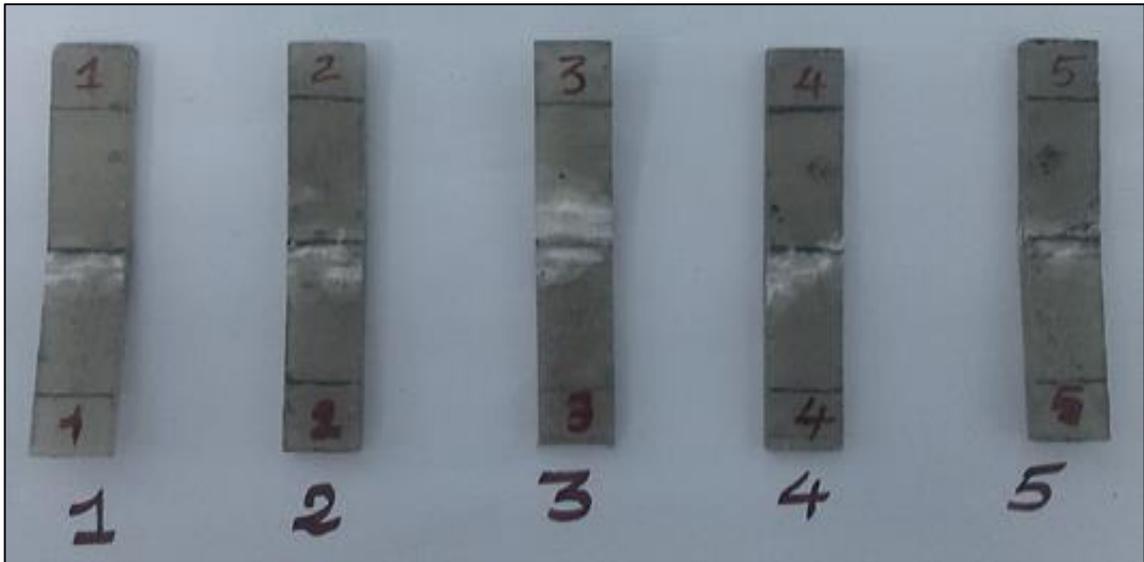


Figure 3.12 : Vue de face de l'éprouvette après la déformation [23].

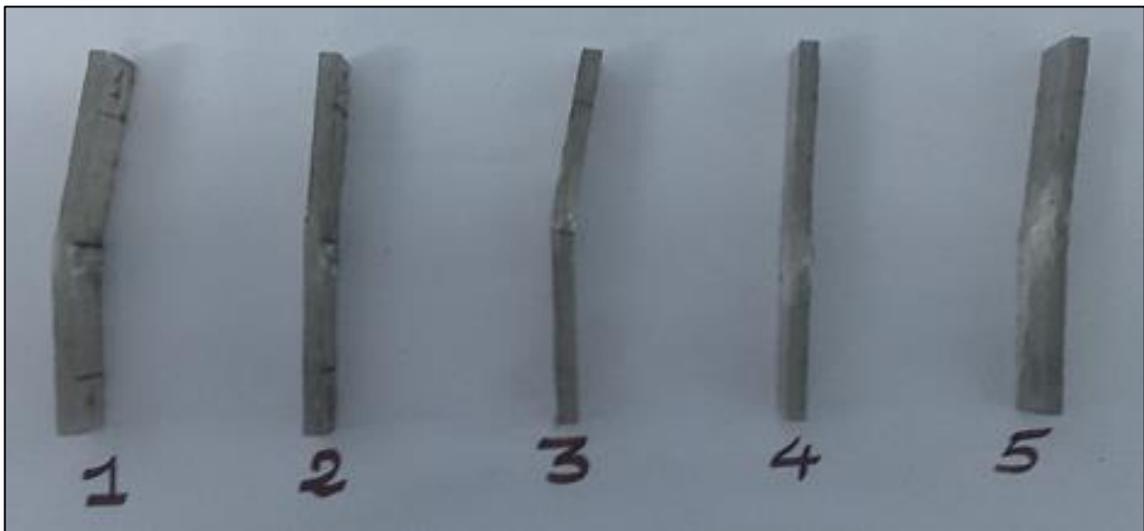


Figure 3.13 : Vue de côté de l'éprouvette après la déformation [23].

3.5 Courbes de comportement en flexion trois (03) points statiques

Les courbes de comportement mécanique (charge-déplacement) et (contrainte-déformation) obtenues en flexion trois (03) points statique pour le type de matériau sont représentées sur les figures suivantes :

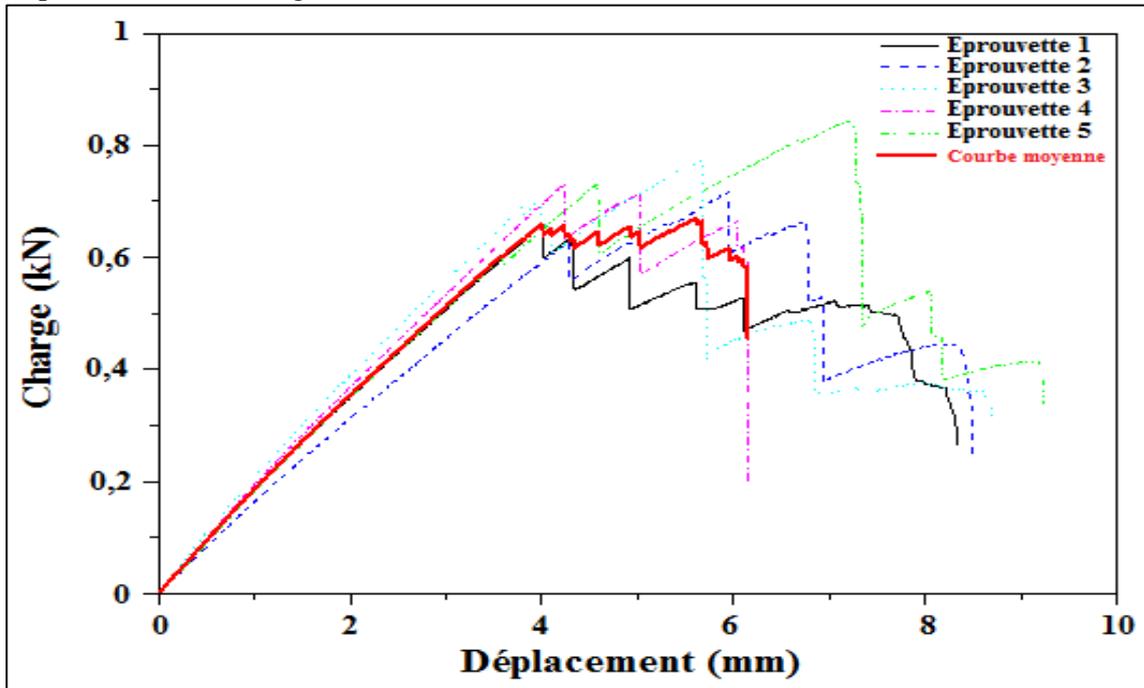


Figure 3.14 : Courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion trois (03) points statique du stratifié [23].

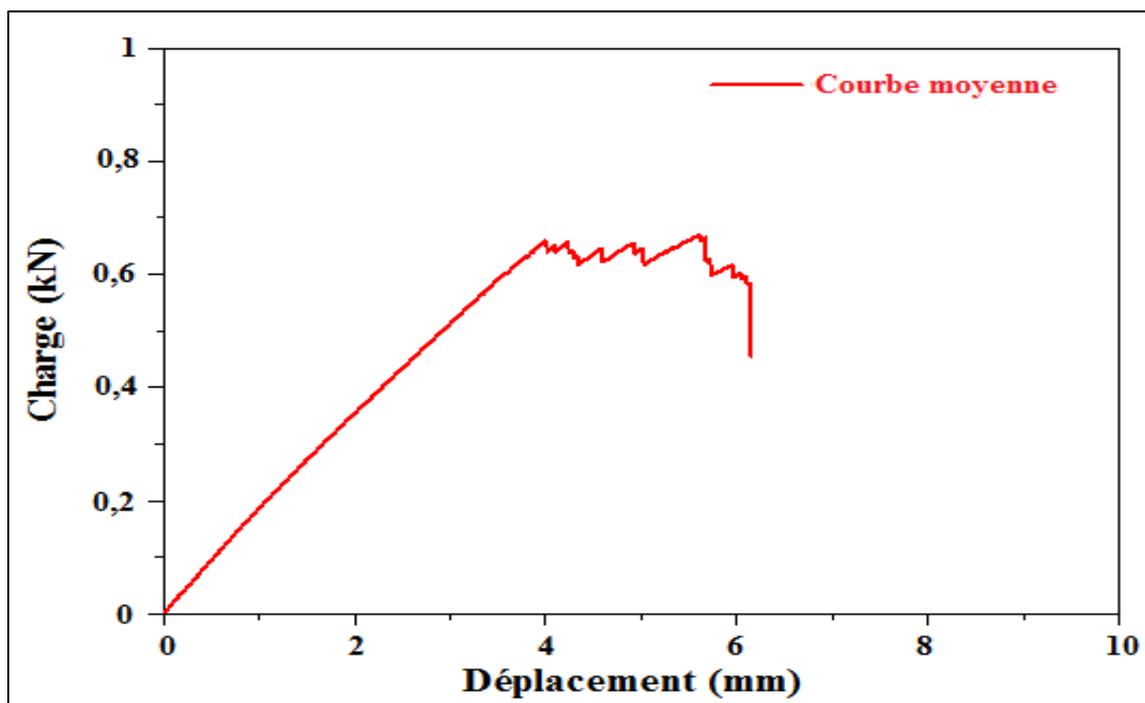


Figure 3.15 : Courbe moyenne de comportement expérimental charge-déplacement en flexion trois (03) points statique du stratifié [23].

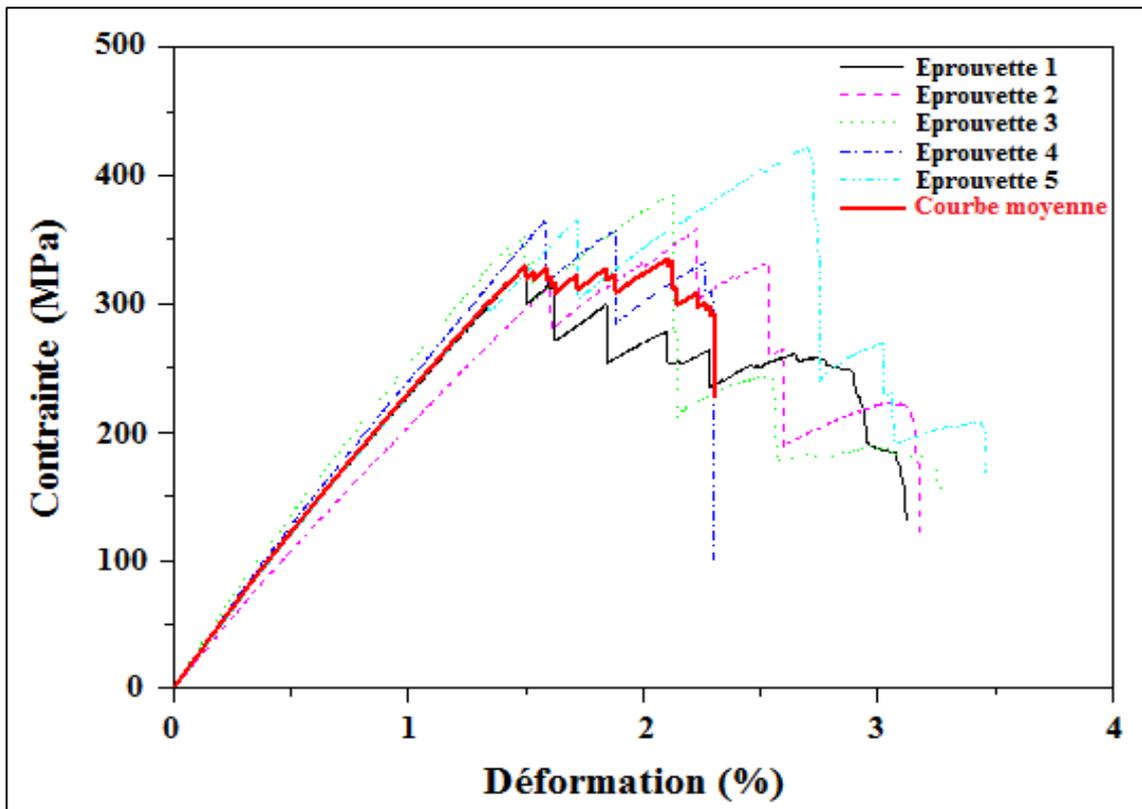


Figure 3.16 : Courbes de comportement expérimental contrainte-déformation en flexion trois (03) points statique du stratifié [23].

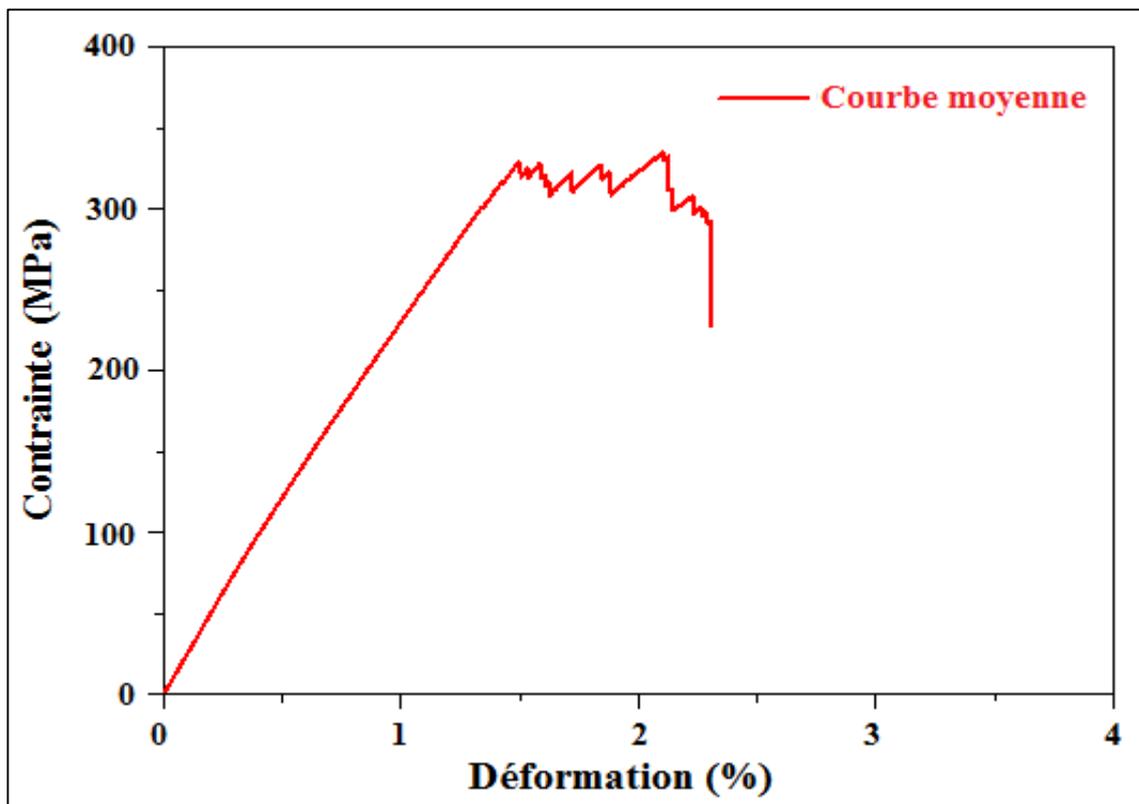


Figure 3.17 : Courbe moyenne de comportement expérimental contrainte-déformation en flexion trois (03) points statique du stratifié [23].

Les résultats obtenus des courbes sont représentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 3.11 : Résultats obtenus des courbes.

Valeur Éprouvette	1	2	3	4	5	Moyenne
Longueur L (mm)	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000
Largeur b (mm)	15,1667	14,7367	15,0333	15,1367	15,0733	15,0293
Épaisseur h (mm)	3,9667	4,0233	4,2933	4,0300	3,8900	4,0407
Distance entre appui (mm)	70,0000					70,0000
Vitesse de déformation (mm/min)	5,0000					5,0000
Charge maximale (N)	660,0000	718,0000	773,0000	731,0000	844,0000	745,2000
Charge à la rupture (N)	266,0000	328,0000	343,0000	601,0000	388,0000	385,2000
Résistance à la flexion (MPa)	175,8000	225,2000	266,0000	194,1000	294,6000	231,1200
Module de flexion (MPa)	14896,3820	11007,9960	14618,8010	15756,9820	11570,5750	13570,1472

3.6 Interprétation des résultats obtenus

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion trois (03) points est basé sur les relations ci-dessous. La première permet de déterminer les valeurs des contraintes dans la limite élastique en flexion σ_f , et la deuxième permet de déterminer les valeurs du module d'élasticité en flexion E_f .

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.4)$$

$$E_f = \frac{l^3 \Delta F}{4bh^3 \Delta \delta} \quad (3.5)$$

Avec :

- F : La charge à la rupture appliquée (N) ;
- l : La longueur entre appuis (mm) ;
- b : La largeur de l'éprouvette (mm) ;
- h : L'épaisseur de l'éprouvette (mm).

3.6.1 Calcul de la contrainte à la rupture et modules d'élasticité en flexion trois (03) points statique

3.6.1.1 Calcul de la contrainte à la rupture

❖ Méthode de calcul

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} ;$$

$$\sigma_{f1} = \frac{3 \times 660 \times 70}{2 \times 15,1667 \times 3,9667^2} ;$$

$$\sigma_{f1} = 290,3912 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{f\text{moy}} = \frac{\sigma_{f1} + \sigma_{f2} + \sigma_{f3} + \sigma_{f4} + \sigma_{f5}}{5} ;$$

$$\sigma_{f\text{moy}} = \frac{290,3912 + 316,2020 + 292,9085 + 312,2234 + 388,5297}{5} ;$$

$$\sigma_{f\text{moy}} = 320,0510 \text{ MPa.}$$

3.6.1.2 Calcul du module d'élasticité

A) Calcul de $\Delta F / \Delta \delta$

$$\frac{\Delta F}{\Delta \delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (3.6)$$

Tableau 3.12 : Calcul de $\Delta F/\Delta\delta$.

Éprouvette	(δ_1, F_1) (δ_2, F_2)	$\frac{\Delta F}{\Delta\delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1}$
1	(1,0416, 0,1909) (2,0832, 0,3636)	0,1658
2	(1,0376, 0,1695) (2,0793, 0,3250)	0,1493
3	(1,0379, 0,2154) (2,0795, 0,4015)	0,1787
4	(1,0380, 0,2017) (2,0796, 0,3814)	0,1725
5	(1,0377, 0,1874) (2,0794, 0,3612)	0,1668

B) Calcul de E_f

$$E_f = \frac{l^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta\delta};$$

$$E_{f1} = \frac{70^3}{4 \times 15,1667 \times 3,9667^3} \times 0,1658 \times 10^3;$$

$$E_{f1} = 15018,9472 \text{ MPa.}$$

$$E_{fmoy} = \frac{E_{f1} + E_{f2} + E_{f3} + E_{f4} + E_{f5}}{5};$$

$$\sigma_{fmoy} = \frac{15018,9472 + 13339,7117 + 12880,4385 + 14930,5871 + 16120,2966}{5};$$

$$\sigma_{fmoy} = 14457,9962 \text{ MPa.}$$

Chapitre 3 Étude expérimentale : Essai en flexion trois (03) points statique

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 3.13 : Contrainte à la rupture et module d'élasticité en flexion trois (03) points.

Éprouvette	1	2	3	4	5
F_{max} (N)	660,0000	718,0000	773,0000	731,0000	844,0000
$\sigma_f cal$ (MPa)	290,3912	316,2020	292,9085	312,2234	388,5297
$\sigma_{fmoy cal}$ (MPa)	320,0510				
$\sigma_f exp$ (MPa)	175,8000	225,2000	266,0000	194,1000	294,6000
$\sigma_{fmoy exp}$ (MPa)	231,1200				
$E_f cal$ (MPa)	15018,9472	13339,7117	12880,4385	14930,5871	16120,2966
$E_{fmoy cal}$ (MPa)	14457,9962				
$E_f exp$ (MPa)	14896,3820	11007,9960	14618,8010	15756,9820	11570,5750
$E_{fmoy cal}$ (MPa)	13570,5750				

3.7 Analyse des résultats au point de vue comportement

Les résultats obtenus ont mis en évidence un comportement linéaire élastique pour ce matériau, suivi d'une rupture brutale provoquée par la coalescence des microfissures menant directement à la ruine des éprouvettes.

La variation de la pente des courbes de comportement relevées sur ce matériau dénote une variation de la rigidité du module d'élasticité en flexion, engendrant par la même occasion une dispersion de la contrainte à la rupture. Ceci est dû surtout aux défauts d'élaboration de ce stratifié (bulles, porosités) et aussi à la découpe des éprouvettes (erreurs dans leur dimensionnement ou le processus d'élaboration de matériau).

3.8 Observation des faciès de rupture après essais en flexion trois (03) points statique

Les faciès de rupture des éprouvettes testées ont été observés par microscope optique pour étudier les mécanismes d'endommagement.

Ces observations montrent que la propagation de la fissure se produit dans la matrice entre les plis de ces stratifiés composites.



Figure 3.18 : Microscope optique [23].

Le mécanisme de rupture de ce matériau se caractérise par :

- Rupture de la matrice ;
- Rupture des fibres ;
- Délaminage des plis du stratifié.

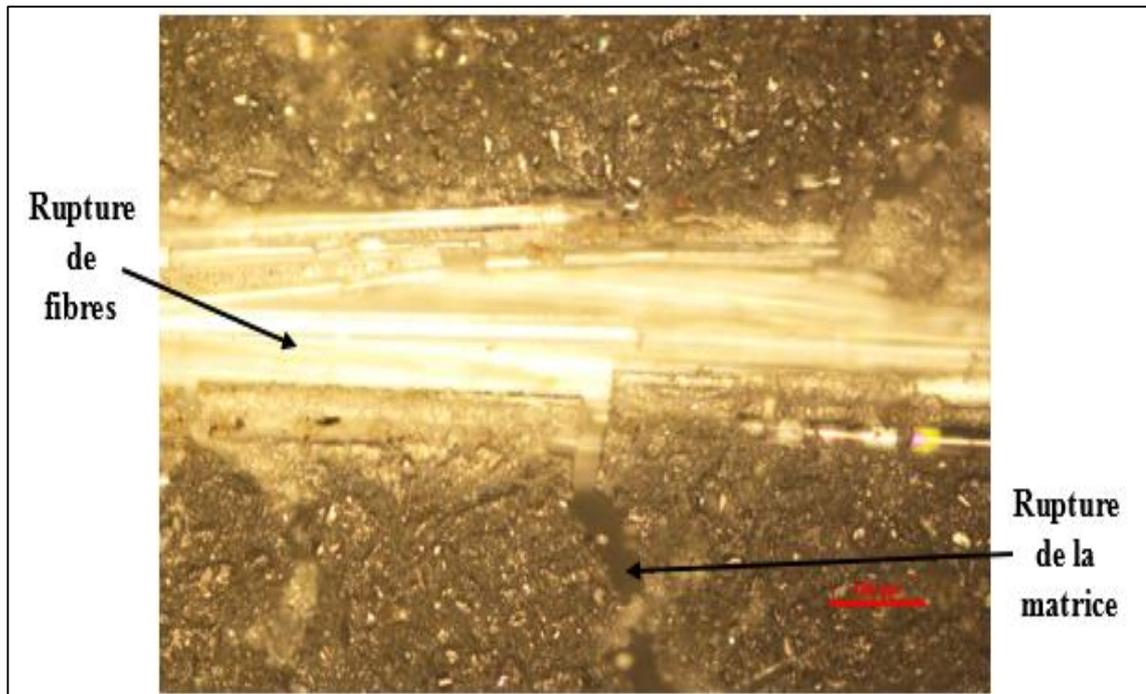


Figure 3.19 : Rupture de la matrice et de fibres [23].

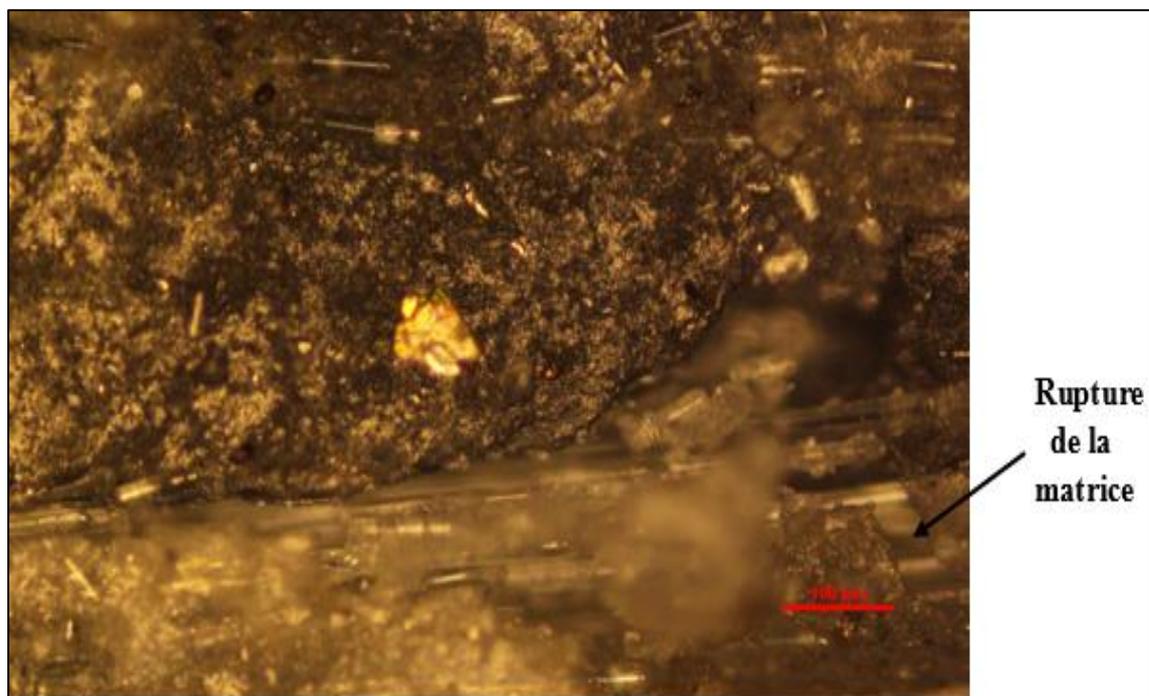


Figure 3.20 : Rupture de la matrice [23].

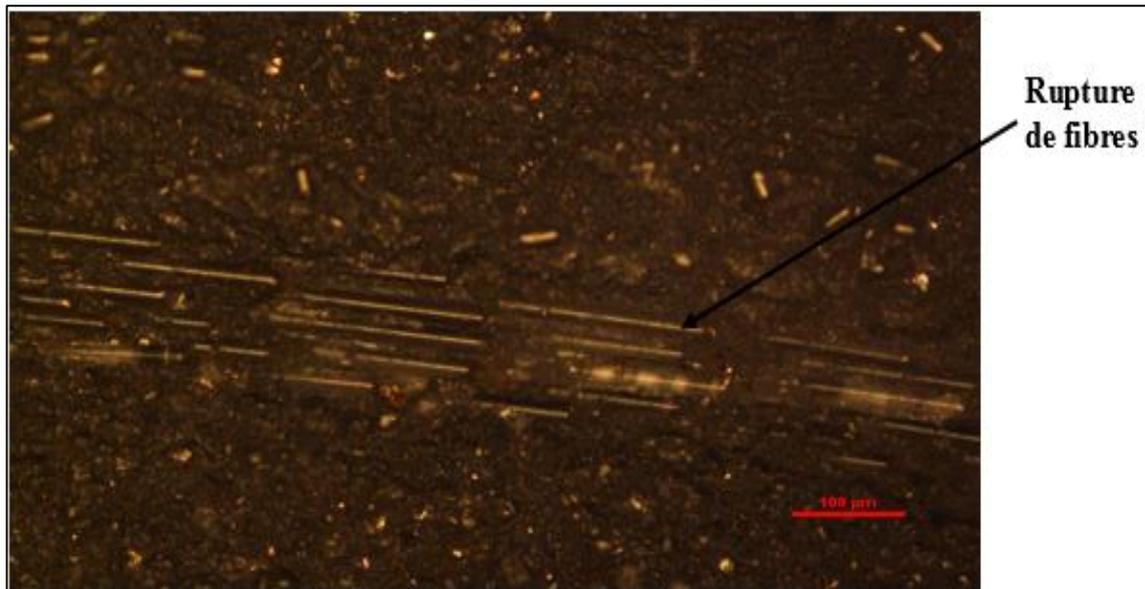


Figure 3.21 : Rupture de fibres [23].

3.9 Interprétation des résultats au point de vue endommagement

D'après les observations du faciès de rupture par microscope optique on remarque les évènements suivants :

- ✓ Rupture des fibres de verre au niveau de l'entrecroisement du taffetas ;
- ✓ Fissuration de la matrice (résine époxyde) ;
- ✓ Décohésion par endroit du taffetas.

Conclusion générale

Conclusion

L'objectif assigné à ce travail est d'abord une initiation à la recherche concernant un thème bien précis qui se rapporte aux matériaux composites. De ce fait, la plus grande partie de ce travail est réservée à la littérature relative au domaine de matériaux composites et particulièrement les composites stratifiés.

La pyrolyse effectuée de ce stratifié a fait ressortir les taux de fibre et de résine qui sont environ de 58% fibre et 42% résine. L'architecture de ce matériau montre cinq (05) plis superposés de fibres de verre tressés en taffetas. Les courbes de comportements mécaniques expérimentales obtenues sont linéaires élastiques avec des pentes différentes dénotant une variation légère des modules d'élasticité à la flexion des éprouvettes testées. Une dispersion des résultats a été observée pour les valeurs des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en flexion. Elle est liée principalement au mode de mise en œuvre des stratifiés, au taux de fibre et à leur disposition dans la structure des matériaux.

Le module d'élasticité en flexion $E_{f moy cal}$ est assez proche de $E_{f moy exp}$ ceci est dû au tissage de sergé qui assure une certaine rigidité au matériau.

La contrainte à la rupture en flexion $\sigma_{f moy cal}$ est assez éloignée de $\sigma_{f moy exp}$ ceci est dû à la présence de porosités dans la confection du matériau obtenue par technique du sac.

L'examen du faciès de rupture a fait ressortir un délaminage des plis avec rupture des fibres au niveau des entrecroisements fissuration accompagnée de rupture de la matrice.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] www.Google.com « Vu le 28/04/2019 ».
- [2] Jean-Marie. Berthelot, matériaux composites « comportement mécaniques et analyse des structures », édition TEC et DOC, 5ème édition 2012.
- [3] Navi. Modelise.com.
- [4] ABDERREZAK GHARBI « Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézoélectriques » thèse de magister Université Mentouri- Constantine 2005.
- [5] « GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES », centre d’animation régional en matériaux avancés, 2006.
- [6] F.BERBANI and A. CHEVALIER, « mise en œuvre des composites », Techniques de l’ingénieur, vol. A3720.
- [7] Mnail Younes « cours matériaux composites ».
- [8] Nadia Behlouli, « les matériaux composites », cours des matériaux composites, Université de Strasbourg.
- [9] Joel Cugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [10] R. ZENASENI, « influence du vieillissement hygrothermique sur le comportement à la rupture des composites à matrice thermoplastique », thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Oran.
- [11] Cours de matériaux composites, l’université des matériaux composites sur le site internet www.composites.free.fr.
- [12] Abderrazak Bezazi, « Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwichs en flexion 3 points », Thèse de doctorat, Construction Mécanique, Université Annaba, 2003.

Références bibliographiques

- [13] J. Molimard, « Cours de mécanique expérimentale », Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 2005.
- [14] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A346.
- [15] Christensen R.M. (1979). Mechanics of composite materials. John Wiley & Sons, New York.
- [16] Hashin Z. (1965). On elastic behaviour of fibre reinforced materials of arbitrary transverse plane geometry. J. Mech. Phys. Solids, 13 : 199.
- [17] Hill R. (1964). Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials : I. Elastic behavior. J. Mech. Phys. Solids, 12 : 199.
- [18] Hashin Z., Rosen B.W. (1964). The elastic moduli of fiber-reinforced materials. J. Appl. Mech. (Juin) : 223-232.
- [19] Hashin Z. (1966). Viscoelastic fiber-reinforced materials. AIAA J., 4 :1411.
- [20] Christensen R.M., Lo K.H. (1979). Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. J. Mech. Phys. Solids, 27 (4) : 4.
- [21] Hermans J.J. (1967). The elastic properties of fiber reinforced materials when the fibers are aligned. Proc. K. Ned. Akad. Wet., B70 :1.
- [22] M. Geir, « manuel qualité des composites », Technique et documentation, Lavoisier 1989, France.
- [23] Unité de recherche en matériaux avancés URMA/CRTI-Annaba.

Annexe

Annexe

❖ La fiche technique de la balance électronique

Balance analytique de haute précision KERN ;

Portée : 220g ;

Précision : $\pm 0,0001$;

Plateau 58 mm de diamètre ;

Application : pesage, tare/brut/net, pesage en pourcentage, totalisation, comptage.



Figure 1 : Balance électronique.

❖ La fiche technique du four à moufle

✓ Introduction

Convaincants en particulier par leur construction compacte, ils ont notamment fait leurs preuves dans des laboratoires de la production de céramique technique, grâce à leurs matériaux d'isolation de haut de gamme permettent une exploitation économique en termes d'énergie et une courte durée de mise à température avec une homogénéité excellente, ainsi que les détails judicieux posant des jalons de qualité de plus haut degré, les fours à moufle Nabertherm présentent un excellent choix. Les fours de la série de modèles HT atteignent des températures allant jusqu'à 1700°C et 1750°C, muni d'une chambre d'une capacité de 16 litres.

Annexe



Figure 2 : Four à moufle.

✓ **Appareil**

Four à moufle Nabertherm HT16/17.

✓ **Caractéristiques techniques**

Chauffage par deux cotés avec éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi₂) ;

Thermique 2 selon EN60519-2, en tant que protection et contrôle la surchauffe du four et des produits ;

Carcasse en inox à la surface structurée ;

Chauffage silencieux fonctionnant avec des relais semi-conducteurs ;

Porte pivotante en toute sécurité sans destruction de l'isolation fibreuse ;

Rampes de chauffage et des temps de maintien réglables, et faire l'enregistrement des processus avec le programme (intégrée sur la carte), neuf emplacement d'enregistrement possible de S1 à S9 et le programme situé à cet emplacement de mémoire peut maintenant toujours être appelé ;

Compteur de consommation électrique et un compteur d'heures de fonctionnement ;

La puissance : 12 KW ;

Poids : 270 kg.

Annexe

✓ Application

Traitements thermiques (synthèse et calcination de la poudre, façonnage, frittage).

✓ Conclusion et perspectives

Ce type de fours à chauffage électrique sont des produits de qualité susceptible d'assurer une fiabilité durant de longues années, à condition d'avoir une utilisation conforme et d'être correctement entretenus.

❖ La fiche technique de la machine universelle MTS 43

Machine de test mécanique : MTS model 43 ;

Capacité d'effort nominal : 5 kN à 50 kN ;

Spécimens typiques : petits composants, plastiques renforcés, métaux fils, composites, élastomères, produits bois, textiles, biomatériaux, papeterie, adhésifs, mousses, biens de consommation ;

Logiciel MTS Test Suite.



Figure 3 : Machine universelle MTS 43.

Annexe

❖ La fiche technique du microscope optique

Microscope optique : NIKON ECLIPSE LV150N ;

Grossissement allant jusqu'à 500X ;

Porte-objectifs manuels. Rehausseur de colonne ;

Base de diascopie pour éclairage diascopique ;

Éclairages universels à épifluorescence ;

Une gamme étendue de platines ;

Optiques de la série CFI L Plan EPI CR ;

Optiques de la série CFI LU Plan Fluor et Plan Fluor BD ;

Tube trinoculaire ;

Poids : 8,6 kg ;

Puissance : 1,2 A/ 75W ;

Hauteur maximale de l'échantillon : 38 mm ;

Logiciel : NisElements TM.



Figure 4 : Microscope optique.