

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Comportement mécanique en flexion trois (3) points
statique d'un stratifié fibre de verre/polyester**

Présenté par : *KHALFI Abdelhak et BECHAIRIA Hatem Firas*

Encadrant : *CHEMAMI ABDENACER* Grade MCA Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

M. CHAOUI KAMEL	Pr	Université d'Annaba	Président
M. CHEMAMI ABDENACER	MCA	Université d'Annaba	Encadrant
M. HAMADACHE A/HAMID	Pr	Université d'Annaba	Expert
Mme. ZEMOURI ZAHIA	Pr	Université d'Annaba	Experte

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr CHEMAMI ABDENNACER, on le remercié pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos remerciements sincères s'adressent aux membres des jurys de mémoire, pour avoir examiné notre travail, ainsi que pour les commentaires et remarques qu'ils ont pu nous en faire.

Enfin nos remerciements vont à tous ceux qui ont participé dans l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents. Je leurs remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toute ma vie. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également à mes frères et sœurs et toute ma famille.

A mes amis surtout ZERRAD Abderrahmane et HARIATI Salaheddine. A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

Abdelhak

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents. Je leurs remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes mes années d'étude. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également à mes frères et sœurs et toute ma famille.

A mes amis. A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

Hatem

Résumé

L'objectif de ce travail est de fournir une approche fondamentale et unifiée en présentant une étude expérimentale sur le comportement mécanique en flexion trois (3) points statiques d'un composite stratifié pré-imprégné composé de quatre couches de mat de fibre de verre (E), la matrice utilisée est une résine polyester chargée de particules de carbonate de calcium CaCO_3 . Le matériau est fabriqué par moulage par compression de mat pré-imprégné SMC (Sheet Molding Compound).

Les résultats expérimentaux du comportement mécanique du stratifié à fibre de verre (E) et de résine polyester sollicité en flexion trois (03) points statique, sont mis en évidence une évolution proportionnelle linéaire de la charge en fonction du déplacement, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale. Finalement on assiste à une diminution de cette dernière jusqu'à la rupture des éprouvettes. La rupture finale n'est obtenue qu'après une baisse soudaine de la charge en raison de la coalescence des macros fissures qui conduisent directement à la ruine des éprouvettes.

Abstract

The objective of this work is to provide a fundamental and unified approach by presenting an experimental study on the mechanical behavior in bending three (3) static points of a pre-impregnated laminated composite composed of four layers of fiberglass mat (E), the matrix used is a polyester resin filled with CaCO₃ calcium carbonate particles. The material is made by compression molding of pre-impregnated SMC (Sheet Molding Compound) mat.

The experimental results of the mechanical behavior of the laminate with fiberglass (E) and polyester resin stressed in bending three (03) static points, are highlighted a linear proportional evolution of the load according to the displacement, followed by a behavior nonlinear up to the maximum load. Finally, there is a decrease in the latter until the specimens break. The final failure is obtained only after a sudden drop in the load due to the coalescence of the macro cracks which lead directly to the failure of the specimens.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو توفير نهج أساسي وموحد من خلال تقديم دراسة تجريبية حول السلوك الميكانيكي في ثني ثلاث (3) نقاط ثابتة من مركب مصفح مشرب مسبقاً يتكون من أربع طبقات من مادة الألياف الزجاجية، المصنوفة تستخدم راتينج بوليستر مملوء بجزيئات كربونات الكالسيوم. تم تصنيع المادة عن طريق قولبة بالضغط للحصيرة المشبعة مسبقاً.

تم تسليط الضوء على النتائج التجريبية للسلوك الميكانيكي للصفائح مع الألياف الزجاجية (E) وراتنج البوليستر المشدد في ثني ثلاث (03) نقاط ثابتة، تطوراً نسبياً خطياً للحمل وفقاً للإزاحة، متبوعاً بسلوك غير خطي يصل إلى أقصى حمولة. أخيراً، هناك انخفاض في الأخير حتى تنكسر العينات. يتم الحصول على الفشل النهائي فقط بعد انخفاض مفاجئ في الحمل بسبب اندماج الشقوق الكبيرة التي تؤدي مباشرة إلى فشل العينات.

Table des matières

REMERCIEMENT

DEDICACE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.1 Introduction.....	17
1.2 Définition	17
1.3 Caractéristiques générales.....	17
1.4 Classification des matériaux composites	18
1.4.1 Classification suivant la forme des constituants	18
1.4.1.1 Composites à fibres	19
1.4.1.2 Composites à particules	19
1.4.2 Classification suivant la nature des constituants	19
1.4.2.1 Composites à matrice organique	20
1.4.2.2 Composites à matrice métallique.....	20
1.4.2.3 Composites à matrice minérale	21
1.4.3 Classification suivant la performance et la diffusion	22
1.4.3.1 Composites à grandes diffusions (GD).....	22
1.4.3.2 Composites à hautes performances (HP).....	22
1.5 Constituants des matériaux composites	22
1.5.1 Renforts (fibres) et tissus	23
1.5.1.1 Principales fibres	23
1.5.1.2 Architecture des fibres.....	28
1.5.2 Matrices (résines)	31
1.5.2.1 Résines thermodurcissables	32
1.5.2.2 Résines thermoplastiques	35
1.5.2.3 Les résines thermostables	35
1.5.2.4 Les résines naturelles.....	36
1.5.3 Charges et additifs.....	36
1.5.3.1 Les charges	36
1.5.3.2 Les additifs	38
1.6 Adhésion renforts / matrice.....	40
1.7 Domaine d'utilisation	41

1.8	Avantage des matériaux composites	42
1.9	Inconvénients des matériaux composites	42

CHAPITRE 02 : MISE EN ŒUVRE ET STRUCTURES DE COMPOSITES

2.1	Introduction.....	45
2.1.1	Moulages sans pression.....	45
2.1.1.1	Moulage au contact.....	46
2.1.1.2	Moulage par projection simultanée	47
2.1.2	Moulage sous vide.....	47
2.1.3	Moulages par compression.....	48
2.1.3.1	Moulage par injection des résines	48
2.1.3.2	Moulage par compression à froid	49
2.1.3.3	Moulage par compression à chaud	50
2.1.3.4	Moulage par injection.....	51
2.1.4	Moulage en continu.....	52
2.1.5	Moulage par pultrusion	53
2.1.6	Moulage par centrifugation	54
2.1.7	Moulage par enroulement filamentaire	55
2.1.7.1	Principe.....	56
2.1.7.2	Enroulement circonférentiel	56
2.1.7.3	Enroulement hélicoïdal.....	56
2.1.7.4	Enroulement polaire	57
2.1.8	Les imprégnés	57
2.1.8.1	Utilisation de demi-produits	57
2.1.8.2	Pré-imprégnés.....	57
2.1.8.3	Les compounds de moulage	58
2.1.9	Structures des matériaux composites	60
2.1.9.1	Monocouches.....	60
2.1.9.2	Les sandwiches.....	60
2.1.9.3	Les stratifiés.....	63
2.1.9.4	Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels	64
2.1.9.5	Désignation des stratifiés.....	65
2.2	Conclusions.....	65

CHAPITRE 03 : COMPORTEMENT MECANIQUE DES STRATIFIES ET LEURS ENDOMMAGEMENT

3.1	Comportement élastique des matériaux	68
3.2	Loi de Hooke généralisée.....	68
3.2.1	Matrice de rigidité	68
3.2.2	Matrice de souplesse	68

3.3	Déférents matériaux	69
3.3.1	Matériaux monocliniques	69
3.3.2	Matériaux orthotropes	69
3.3.3	Matériaux isotropes	71
3.3.4	Matériaux isotropes transverses	71
3.3.5	Matériaux quasi isotropes transverses.....	72
3.3.6	Matériaux quasi isotropes	72
3.4	Flexion 3 points	72
3.5	Analyse du comportement mécanique	74
3.5.1	Constitution d'un matériau composite unidirectionnel	74
3.5.2	Caractéristiques du mélange renfort-matrice	75
3.5.3	Composition du composite (fibre, matrice)	75
3.5.3.1	Fractions volumiques et massiques	75
3.5.4	Calcul des caractéristiques mécaniques du composite.....	77
3.5.4.1	Modules d'élasticité.....	78
3.6	Mécanismes d'endommagement et de rupture	85
3.6.1	Divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel	85
3.6.1.1	Rupture de la matrice.....	86
3.6.1.2	Rupture des fibres.....	86
3.6.1.3	Décohésion fibre-matrice	87
3.6.1.4	Rupture des stratifiés (délaminage)	88
3.6.2	Critères de rupture.....	89
3.6.3	Observations des mécanismes de rupture	89
3.6.3.1	Observation par microscopie	89

**CHAPITRE 04 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN FLEXION TROIS (3)
POINTS STATIQUE DU STRATIFIE FIBRE DE VERRE/POLYESTER**

4.1	Introduction.....	92
4.2	Matériau utilisé	92
4.3	Préparation des éprouvettes	93
4.4	Bancs et principe de l'essai de flexion 3 points	93
4.5	Essais statiques	95
4.6	Endommagement de l'éprouvettes testées sous sollicitations statiques	98
4.7	Conclusion	100

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE.....	102
--------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	104
----------------------------------	-----

Liste des figures

Figure 1-1	classification des matériaux composites suivant la forme des constituants.	20
Figure 1-2	quelques applications des CMO.	21
Figure 1-3	exemples d'applications des composites à matrice métallique.	21
Figure 1-4	quelques applications des CMC	22
Figure 1-5	matériau composite	23
Figure 1-6	classification des renforts	24
Figure 1-7	fibre de verre.	25
Figure 1-8	schéma d'élaboration des fibres de verre.	27
Figure 1-9	fibre de carbone.	28
Figure 1-10	fibre aramide.	28
Figure 1-11	géométries et textures de renforts	31
Figure 1-12	nappe unidirectionnelle	32
Figure 1-13	types de matrice	33
Figure 1-14	exemples de charges utilisées dans les CMO	37
Figure 2-1	différents familles de moulage	45
Figure 2-2	principe du moulage au contact.	46
Figure 2-3	principe du moulage par projection simultanée.	47
Figure 2-4	moulage sous vide.	48
Figure 2-5	moulage par injection de résine.	49
Figure 2-6	principe du moulage par compression à froid	50
Figure 2-7	principe du moulage par compression à chaud	51
Figure 2-8	moulage par injection.	52
Figure 2-9	moulage en continu de plaques.	53
Figure 2-10	moulage en continu de panneaux ondules.	53
Figure 2-11	moulage par pultrusion.	54
Figure 2-12	moulage par centrifugation.	55
Figure 2-13	principe de l'enroulement circonférentiel	55
Figure 2-14	schéma d'une chaine de production SMC	59
Figure 2-15	structure de composite monocouche	60
Figure 2-16	panneau composite a structure sandwich utilise pour des tests a la NASA	61
Figure 2-17	constitution d'un stratifié	63
Figure 2-18	désignation d'un stratifié	65
Figure 3-1	représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope	70
Figure 3-2	sollicitation d'une poutre en flexion 3-points	73
Figure 3-3	schéma d'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite	75
Figure 3-4	composite unidirectionnel.	75
Figure 3-5	schéma d'un pli de composite unidirectionnel	76

Figure 3-6	schéma simplifié d'une traction longitudinale.	80
Figure 3-7	schéma par couches d'une traction longitudinale.	81
Figure 3-8	schéma par couches d'un essai de cisaillement longitudinal.	82
Figure 3-9	déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre.	83
Figure 3-10	modèle cylindrique à trois phases.	84
Figure 3-11	schématisation par couches d'un composite unidirectionnel.	85
Figure 3-12	rupture transverse de la matrice	87
Figure 3-13	rupture longitudinal de la matrice	87
Figure 3-14	rupture de fibre	88
Figure 3-15	ruine par rupture de fibre	88
Figure 3-16	ruine par rupture de fibre	89
Figure 3-17	mécanismes de rupture observés dans les stratifiés	89
Figure 3-18	surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone.	90
Figure 4-1	forme et dimensions des éprouvettes d'essai en flexion 3 points statique	93
Figure 4-2	les éprouvettes d'essai du matériau étudié	93
Figure 4-3	machine d'essai zwick/roell z20	94
Figure 4-4	principe d'essai de flexion 3 points	94
Figure 4-5	courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique pour le stratifié	95
Figure 4-6	courbe moyenne de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique pour le stratifié	95
Figure 4-7	valeurs choisies de la charge f et de la flèche correspondante	97
Figure 4-8	microscope optique	98
Figure 4-9	observation microscopique des faciès endommagés de l'éprouvette N° 01	100
Figure 4-10	observation microscopique des faciès endommagés de l'éprouvette N° 03	100

Liste des tableaux

Tableau 1-1	Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.	25
Tableau 1-2	Caractéristiques des résines thermodurcissables	33
Tableau 1-3	Caractéristiques mécaniques générales de la résine époxyde	35
Tableau 1-4	Caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques	36
Tableau 1-5	Les principales propriétés des thermodurcissables et thermoplastiques	36
Tableau 2-1	Les matrices les plus utilisées.	61
Tableau 4-1	Contrainte à la rupture	96
Tableau 4-2	Module d'élasticité en flexion 3 points	98

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Un matériau composite est constitué d'au moins deux matériaux dont les propriétés sont combinées pour créer un matériau présentant une résistance et une rigidité élevées.

On les utilise depuis des millénaires dans le bâtiment. Ainsi par exemple, à l'Age de pierre, les cabanes étaient fabriquées avec de l'argile et de la paille. Les constructions en béton armé sont un exemple moderne: l'armature absorbe les forces de traction et le béton les forces de pression. Parmi les matériaux composites modernes, ce sont surtout les composites renforcés par des fibres qui ont fait leur preuve. La différence est faite entre les résines renforcées avec des fibres courtes et les résines renforcées avec des fibres longues (continues). Les renforcements à fibres courtes sont surtout utilisés dans le cadre du moulage par injection des éléments en plastique. Les fibres longues permettent le renforcement des gros éléments en plastique dans la construction navale et la grosse chaudronnerie ou pour les pâles de rotor. Les fibres (armure) absorbent les contraintes de traction et de pression, le plastique (matrice), les contraintes de cisaillement. L'un des avantages essentiels des matériaux composites réside dans l'économie de poids vis-à-vis de l'acier par exemple. D'une part, les matériaux de départ sont légers et pourvus de propriétés spécifiques, d'autre part les matériaux composites sont optimisables dès la conception en fonction de l'application souhaitée.

Grâce à des combinaisons de matériaux et de disposition des fibres, les matériaux composites peuvent être fabriqués pour les types de contraintes les plus divers. En outre, les composites se distinguent des matériaux traditionnels par des avantages supplémentaires – notamment une résistance importante à la corrosion et aux produits chimiques ainsi qu'un pouvoir d'isolation électrique et thermique. Dans la quasi-totalité des secteurs, les matériaux composites gagnent du terrain. Dans les dernières décennies, leurs avantages ont été de plus en plus reconnus et leur connaissance s'est répandue. Dans le même temps, ils ont été constamment améliorés grâce à de nombreuses recherches et une évolution des produits de telle sorte qu'aujourd'hui, on peut les utiliser de façon encore plus ciblée, avec des facteurs de sécurité mieux ajustés et par conséquent plus réalistes.

Le cadre général de notre travail s'articule sur l'étude du comportement mécanique en flexion trois(3) points statique d'un stratifié fibre de verre/polyester, le manuscrit est divisé en quatre chapitres, le premier chapitre est constitué d'une présentation des matériaux

composites et ces caractéristiques générales, ces classification et ces constituants ainsi que leurs domaines d'applications.

Le second chapitre regroupe les procédés de mise en œuvre des matériaux composites, tandis que le troisième étant consacré à la formulation décrivant le comportement mécanique des matériaux composites et leurs mécanismes d'endommagement et de rupture.

Le dernier chapitre est réservé à l'étude expérimentale du comportement mécanique en flexion trois (03) points statique du stratifié fibre de verre/polyester.

Les résultats des essais mécaniques effectués sur ce matériau sont discutés afin de calculer la charge à la rupture et le module d'élasticité en flexion. Par suite, des observations réalisées par microscope optique du faciès endommagées des éprouvettes testées sous sollicitations statiques.

L'ensemble de travail se termine par une conclusion générale sur les résultats trouvés.

CHAPITRE 01

GENERALITES

SUR LES

MATERIAUX

COMPOSITES

1.1 Introduction

La technologie moderne essaie à plusieurs fois de concevoir aux matériaux de construction une bonne rigidité, une haute résistance mécanique, une ténacité élevée et une grande légèreté.

Dans ce même contexte l'ingénieur désire, dans un grand nombre de situation, concevoir des structures présentant un rapport performance / masse, le plus élevé possible. Pour atteindre ces performances, il recherche toujours des matériaux ayant des caractéristiques spécifiques élevées.

Les matériaux répondant à ce critère sont les composites renforcés par des fibres de verre, de carbone, de bore ...etc. Pour pouvoir réaliser des structures suffisamment tolérantes aux dommages, il est nécessaire d'utiliser des matériaux renforcés par des fibres qui sont liées entre elles par une résine. Aucun matériau classique ne permet de combiner ces caractéristiques d'où la nécessité de l'utilisation des matériaux composites, ou les matériaux stratifiés [24].

1.2 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de nature différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. [1]

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté ; ils ont été utilisés dès l'antiquité par l'homme ; bois et torchis sont alors des matériaux composites de la vie quotidienne. [2]

Généralement, un matériau composite est obtenu par l'association de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés complémentaires. Il est constitué d'une matrice dans laquelle sont insérés des renforts. La matrice peut être une matrice organique (thermodurcissable ou thermoplastique), céramique ou métallique. Les renforts peuvent être des fibres courtes ou des fibres longues (carbone, verre, fibres végétales...). [3]

1.3 Caractéristiques générales

Les matériaux composites se distinguent par une grande diversité de comportements issue de l'association des fibres et de la résine. La proportion de fibres, le type de renfort, l'orientation, sont autant d'éléments déterminants qui peuvent conduire à des matériaux aux caractéristiques complètement différentes. Il est ainsi possible d'obtenir un matériau à haute performance rigide, au comportement élastique fragile ou bien un matériau souple acceptant

de fortes déformations.

Les matériaux composites présentent aussi la particularité de l'anisotropie, c'est-à-dire leurs propriétés mécaniques sont très différentes suivant la direction de sollicitation. Cette propriété physique augmente de manière importante le nombre de paramètres déterminant la rigidité, la résistance, la thermique... (En général, trois modules d'élasticité, trois coefficients de poisson et trois modules de cisaillement).

Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux constituants, de leur distribution géométrique et de leur interaction, etc...

La géométrie du renfort est caractérisée par sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation). [1]

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.

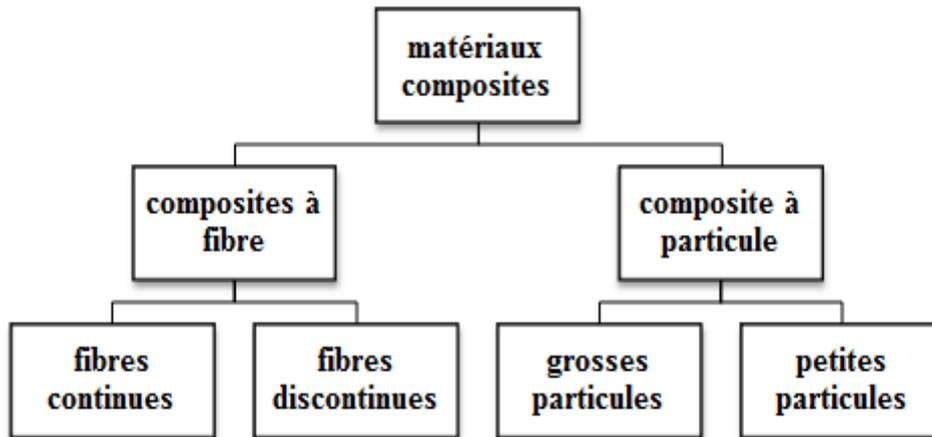


Figure 1-1 : Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants [5]

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.) [5].

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 matrice, les matériaux composites sont classés en :

- Matériaux composite à matrice organique ;
- Matériaux composite à matrice métallique ;
- Matériau composite 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.

Il s'agit, de loin, des composites les plus répandus : ce sont, en effet, les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées ;
- Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle (figure 1-2).

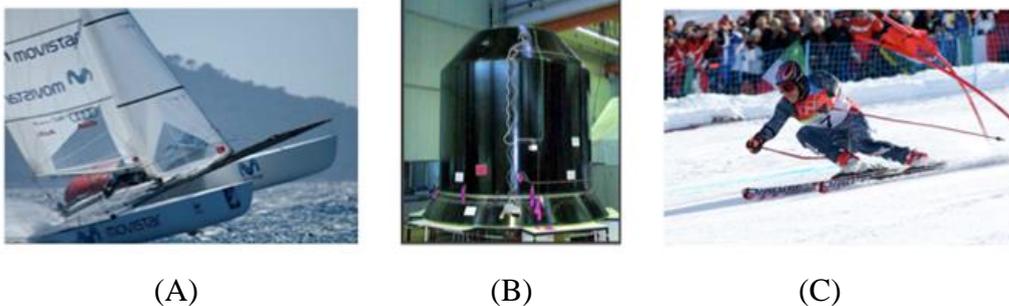


Figure 1-2 : Quelques applications des CMO "haute performance" : (A) un catamaran, (B) le support de la charge utile d'Ariane 5, (C) des skis de compétition

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.

Enfin, les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux (ductilité, bonne tenue face au vieillissement et au feu...) avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par un coût de revient encore élevé et réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines (Figure 1-3).



Figure 1-4 : Quelques applications des CMC : (A) la tuyère d'un moteur spatial, (B) le disque à aubes d'une turbine, (C) un disque de frein haut de gamme

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 Constituants des matériaux composites

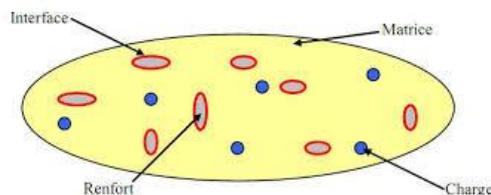


Figure 1-5 : Matériau composite [1]

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases.

Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques [6].

1.5.1 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 [5]. 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.

1.5.1.1 Principales fibres

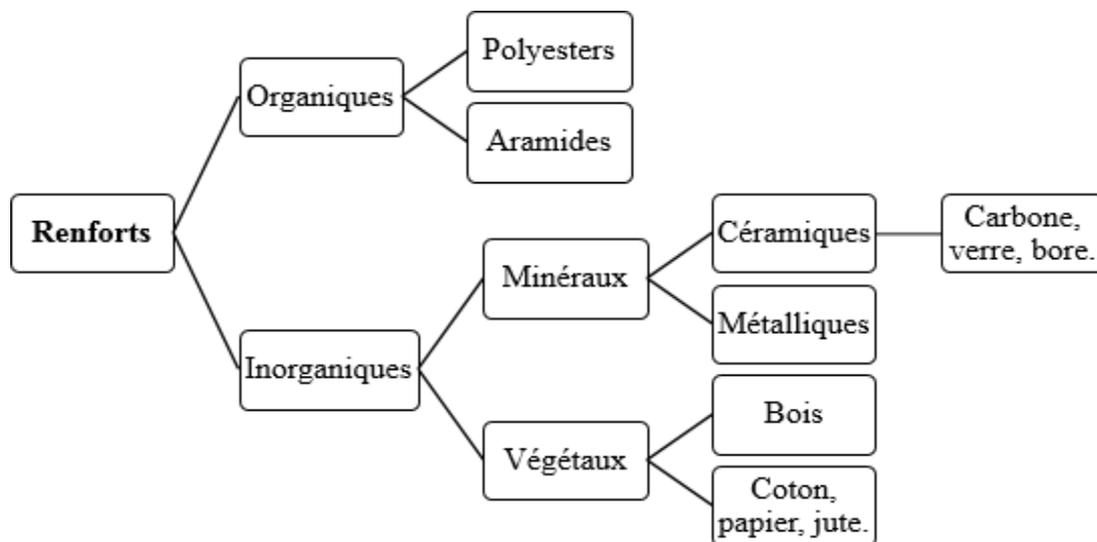


Figure 1-6 : Classification des renforts.

A. Fibres 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 1-7 : Fibre de verre [5].

A.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.

A.2 Types de fibre de verre

Suivant leurs compositions, on distingue quatre (04) types de fibres [8] :

- **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 1-1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [8].

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

A.3 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 [5]. 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 silloné, 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 composés 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 glissement des fils, leurs raideurs, les propriétés, antistatiques, son niveau et sa vitesse de solubilisation dans la matrice.

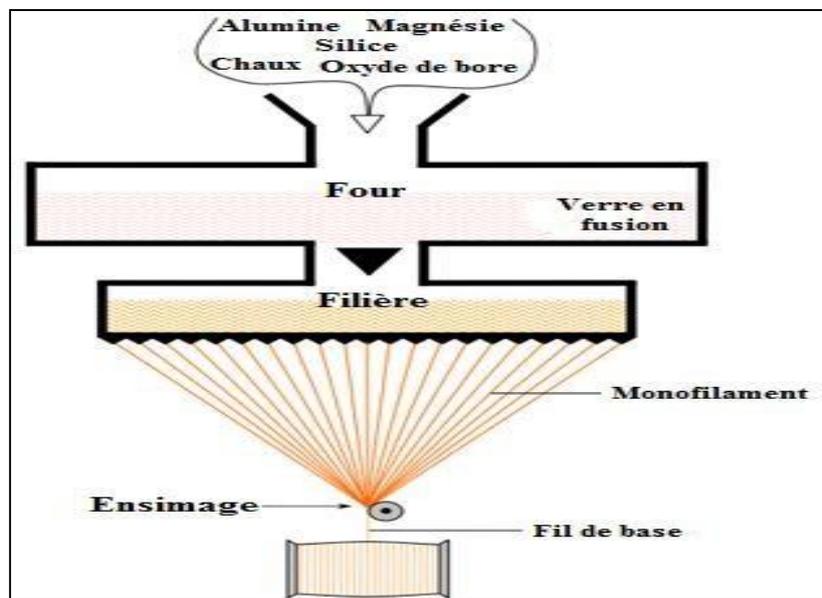


Figure 1-8 : Schéma d'élaboration des fibres de verre [5].

➤ Finissage

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

B. Fibres de carbone

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

La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie

issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

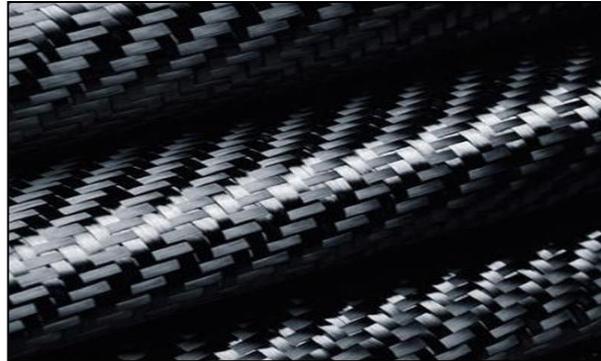


Figure 1-9 : Fibre de carbone [5].

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 1-10 : Fibre aramide [5].

D. Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des

moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- 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 de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité.

Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester. [8]

F. Fibres synthétiques thermostables

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse [5].

G. 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.

1.5.1.2 Architecture des fibres

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibre ou forme dérivé, constituant une fraction volumique de 0.3 à 0.7

Les renforts fibres se présentent sous divers formes commerciales :

- forme linéique (fils, mèche, etc.)
- forme surfacique en tissus
- formes multidirectionnelle

A. La forme linéique :

Les fibres de quelque micromètre de diamètre ne peuvent être utilisées sous forme unitaire, donc on les réunit en fils ou en mèche de différentes formes.

La nomenclature des diverses formes linéique est encore mal déterminée, et généralement dérivé de celle des fibres de verre.

La fibre unitaire est appelée FILAMENT ELEMENTAIRE ou MONO FILAMENT, réunies en fils ou mèche continus ou discontinus, sont caractérisé par leur masse linéique ou titre.

Cette masse linéique est une mesure de la finesse des fils, qui dépend du diamètre du nombre de mono filaments.

L'unité de mesure de masse linéique est le TEX, masse d'un fil de longueur égale à 1000m soit:

$$1\text{tex} = 1\text{g/Km}$$

On peut écrire aussi : $1\text{tex} = 10^{-6} \text{ Kg/m}$

B. La forme surfacique

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

B.1 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 [5].

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

Les mats réalisés par des fils courts ou fils coupés sont peu déformable alors que ceux réalisé par des fils longs ou continus permettent un allongement dans toutes les directions et donc l'obtention d'embouts profonds.

B.2 Tissus et rubans

Un tissu (ruban) ou un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser [5]. 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.

Les armures classiques utilisées sont :

- TAFFETAS
- SERGE
- SATIN

- ARMURE CROISE
- ARMURE UNIDIRECTIONNELLE

B.2.1 TOILE OU TAFFETAS

Les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement [5], 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.

B.2.2 SERGÉ

Pour cette armure, le nombre de fils et de trames qui s'entrecroisent peut varier [5] par exemple :

- un sergé 2×1 : les fils trames passent sur un fil chaîne et sous deux fils trames.
- un sergé 2×2 : les fils trames passent sur deux fils chaînes et sous deux fils chaînes.

Le sergé offre à la fois souplesse et densité ce qui permet un glissement entre trames et chaînes et s'adapte bien aux moulages de formes complexes.

Cette armure est bien adaptée aux moulages de formes complexes.

B.2.3 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 [5], 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.

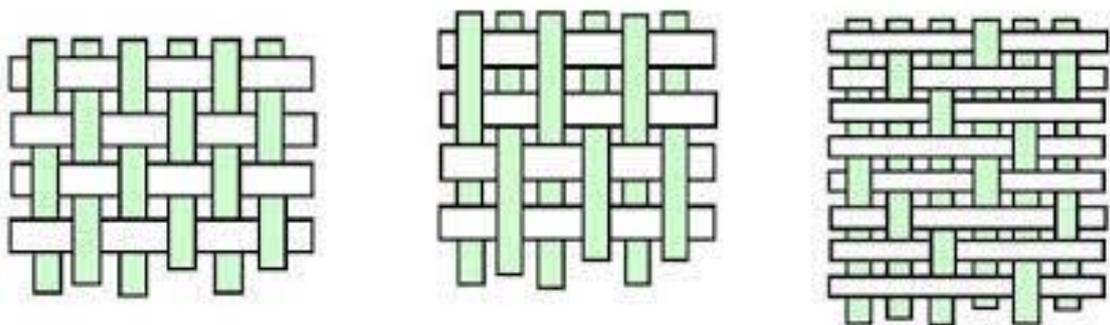


Figure 1-11 : Géométries et textures de renforts

B.2.4 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.

B.2.5 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 [5]. Le tissu est ainsi unidirectionnel dont les performances sont très élevées dans la direction chaîne.

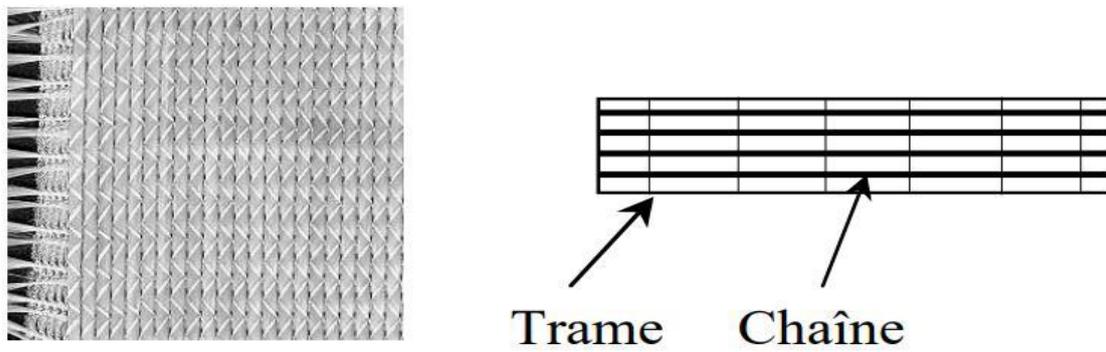


Figure 1-12 : Nappe unidirectionnelle

C. Structures tissées multidirectionnelles

C.1 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 [5]. On obtient ainsi des pièces de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc.

C.2 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.

1.5.2 Matrices (résines)

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 :

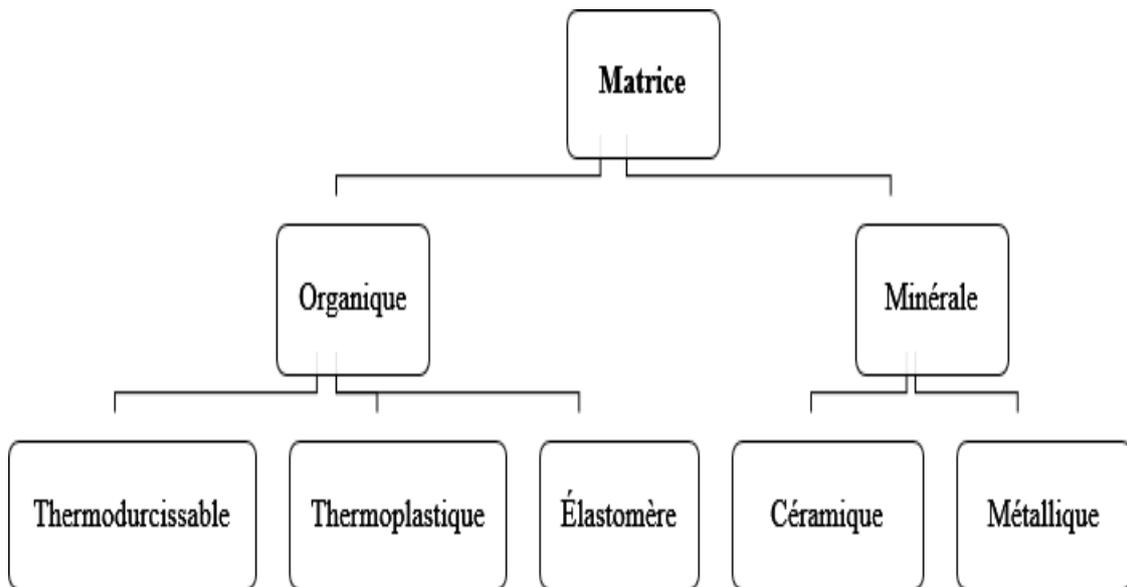


Figure 1-13 : Types de matrice [5]

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

1.5.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 1-2 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [6]

Résines	T _f (°C)	ρ (Kg/m ³)	ε _t R (%)	δ _t R (MPa)	δ _c R (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Époxydes	290	1100 à 1150	2 à 5	60 à 80	250	3,5

Parmi ces résines on trouve :

A. Résines polyesters

Les résines polyesters viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites, leur développement est le résultat de :

- faible coût de production
- diversité offrant plusieurs possibilités
- adaptation à des procédés faciles de mise en œuvre et à automatiser Ce qu'ils leur préfèrent un développement industriel sans cesse suivant leur module d'élasticité, ils sont classés en : résines souples, résines semi rigide et résines rigides.

Les plus utilisés dans la mise en œuvre des matériaux composites sont les résines Polyesters du type rigide.

A.1 Avantages des polyesters

- facilité de mise en œuvre
- bonne tenue chimique
- coût de production faible
- bonne résistance chimique aux hydrocarbures à température ambiante
- bonne stabilité dimensionnelle
- Bonne mouillabilité des fibres et des tissus
- bonne rigidité résultante d'un module d'élasticité assez élevé

A.2 Inconvénients des polyesters

- inflammabilité
- dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets
- tenue médiocre en température

- sensibilité à la fissuration au choc
- retrait important de l'ordre de 8 à 10%
- mauvais comportement à la vapeur d'où la nécessité de recouvrir les composites en polyesters d'une couche de gel-coat pour les rendre étanches

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 recuisons très longues allant de quelques heures à plusieurs dizaines d'heures et à des températures de 50 à 100 °C [5].

Tableau 1-3 : Caractéristiques mécaniques générales de la résine époxyde [5]

RÉSINE ÉPOXYDE	
Masse volumique	1100 à 1500 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 [5] :

- 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.

1.5.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 1-4 : Caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques [6]

Résine	T _f (°C)	P (kg/m ³)	ε _t R (%)	δ _t R (MPa)	δ _c R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140	/	60 à 85	/	1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200	/	20 à 35	/	1,1 à 1,4

Tableau 1-5 : Les principales propriétés des thermodurcissables et thermoplastiques [5]

Matrice	Thermodurcissable	Thermoplastique
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage matière de base	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Court	Long
Tenu de choc	Limitée	Assez bonne
Tenu thermique	Meilleure	Réduite
Chute de déchets	Perdus	Recyclables

1.5.2.3 Les résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les

domaines de l'aviation et de l'espace [5].

1.5.2.4 Les résines naturelles

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

1.5.3 Charges et additifs

Enfin, des charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites ; il en existe de très nombreux types.

1.5.3.1 Les charges

Les charges ont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques « traditionnels ». On peut par exemple rencontrer (figure 4) :

- Des microbilles de verre creuses, ajoutées en plus des renforts principaux, qui améliorent la tenue en compression tout en allégeant la matrice ;
- Du noir de carbone utilisé à la fois comme pigment noir, comme barrière anti-UV et comme antioxydant ;
- Des particules de silice pour rendre la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), diminuer son retrait au moulage... ;
- Des poudres ou paillettes métalliques pour rendre la matrice conductrice de l'électricité et de la chaleur, pour améliorer son usinabilité, sa résistance aux chocs ou à l'abrasion... ;
- Des billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables, pour améliorer leur ductilité et donc leur résistance à la fissuration... ; [9]



Figure 1-14 : Exemples de charges utilisées dans les CMO

(A) microbilles de verre, (B) noir de carbone, (C) silice.

A. Les charges organiques

Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes).

Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.

- Farines de bois
- Farines d'écorces de fruit et de noyaux
- Fibres végétales
- Pâtes de cellulose
- Amidons

B. Les charges minérales [10]

B.1 La silice(SiO₂)

À l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté la taille des particules.

B.2 Les talcs

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

B.3 Carbonates de calcium

Les carbonates de calcium (CaCO₃) sont largement utilisés comme charges dans les polymères. Ils sont souvent obtenus par concassage (ou broyage) de leur minerai naturel ou par voie synthétique [6]. Dans la nature, les teneurs moyennes de l'écorce terrestre sont 7 % en CaCO₃ et 4% en calcium. Le calcium est surtout présent sous forme carbonatée dans les

roches de calcaire qui contiennent plus de 50 % de CaCO_3 , dans le carbonate de calcium magnésium (CaCO_3 , MgCO_3) qui est préparé à partir des minerais de dolomie et des marnes à base de la calcite et l'argile

B.4 Les argiles et aluminosilicates

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la silice (42 à 70 %) et de l'alumine (14 à 45 %).

Le kaolin contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau. On peut l'ajouter à des taux atteignant 60 % dans les compositions à base d'esters polyvinyliques, mais habituellement les poudres à mouler en contiennent de 20 à 45 %. Le kaolin calciné est utilisé dans les mélanges pour l'isolation de câbles et dans les isolants, mélangé à de l'alumine et de la silice, le kaolin calciné est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

B.5 La vermiculite

Est utilisée comme charge de faible densité (2,4) dans les plastiques renforcés de fibres de verre.

B.6 Le mica

Augmente la stabilité dimensionnelle des pièces moulées ; il améliore les propriétés électriques et thermiques, la résistance aux acides et aux bases, et diminue la reprise d'eau. Comparé aux fibres de verre, il confère une moins bonne résistance aux chocs ; mélangé avec celles-ci, il permet une réduction des coûts. [12]

1.5.3.2 Les additifs

Les additifs possibles sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

- Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone ;
- Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables) ;
- Des agents de démoulage ;
- Des colorants...

Il est ainsi possible de conférer de nombreuses fonctions techniques au composite, et d'adapter finement ses propriétés aux besoins du concepteur. [9]

A. Le verre

A.1 Poudres de verre

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13 μm est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

A.2 Billes de verres creuses

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant. Elles améliorent les résistances à l'eau et au vieillissement du PMMA, et diminuent la friabilité des pièces phénoliques.

Les densités de ces microsphères creuses du type borosilicate de sodium et de calcium sont comprises entre 0,38 et 0,45 ; parallèlement, leur résistance à la compression varie de 1,7 à 31 MPa. Les applications sont nombreuses (bâtiment, automobile et aéronautique).

A.3 Microsphères de verre

L'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35 % la masse des pièces obtenues soit à partir de BMC ou de SMC destinées en particulier à l'industrie automobile, soit également à partir de résines phénoliques pour l'industrie aéronautique. On utilise par ailleurs ce type de charge, dans le cas du PPO modifié, pour la réalisation des capotages de machines de bureau. Elle permet la réduction du temps de cycle de moulage de 20 à 30 %. Il en est de même dans le cas du moulage des mousses structurelles en polyuréthanes.

B. Le carbone

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant. Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules.

C. Oxydes et hydrates métalliques

C.1 Alumine et trihydrate d'aluminium

On obtient l'alumine (Al_2O_3), anhydre ou hydratée, à partir de la bauxite. Cette charge apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique ; elle diminue le coefficient de dilatation thermique linéique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu.

L'hydrate d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ est une charge ignifugeante qui, du point de vue du prix, est concurrentielle ; elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion car elle se décompose de façon endothermique (effet de refroidissement) en alumine et en eau, aux températures supérieures à 220°C . L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudres fines comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés.

C.2 Trioxyde d'antimoine

On chauffe de l'antimoine dans l'air pour obtenir Sb_2O_4 qui donne Sb_2O_3 par fusion et décomposition. Sa densité est de 4,2 et sa dureté Mohs comprise entre 6 et 7. Il apporte aux résines ignifugation et coloration blanche et on l'utilise en particulier dans les PVC plastifiés.

C.3 Oxyde de béryllium

Utilisé sous forme de microsphères dans les résines époxydes, il augmente les conductivités électrique et thermique. Ces carbo-sphères sont aussi utilisées dans les mousses structurales (PUR) à densité contrôlée, ainsi que pour la fabrication de pièces polyesters ultralégères.

D. Les céramiques

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0,4 et 2,4 et les dimensions de 1 à 3 000 μm . Une microsphère de 70 μm comportant un revêtement permettant une meilleure dispersion a été mise au point. Conseillée dans les résines polyesters en combinaison avec CaCO_3 , elle apporte une réduction de masse de 15 à 25 % avec une amélioration des résistances à la compression et au choc.

1.6 Adhésion renforts / matrice

Le choix des constituants ne peut se résumer à prendre la meilleure matrice et la

meilleure fibre ; il est nécessaire que l'adhésion entre les fibres et la matrice soit de qualité suffisante pour que les propriétés des matériaux composite obtenu soient supérieures à celles de ses constituants.

On notera que les fibres de carbone présente bonne adhésion avec les matrice époxy suite à un traitement oxygène. Les fibres d'aramide chimiquement inertes s'associent difficilement avec les matrice organiques ; Enfin les fibres de verre, après humidification, présente une tenue inter faciale intéressante avec toutes les matrices organiques. D'un point de vue physico-chimique ; l'adhésion entre les fibres carbone ou verre et la matrice époxy est généralement due à des liaisons covalentes (mécanisme de liaison le plus tenace) [11]

1.7 Domaine d'utilisation

Les matériaux composites se substituent de plus en plus aux métaux traditionnels dans la plupart des applications industrielles

Le secteur des matériaux composites annonce une croissance continue. Grâce à ce procédé d'assemblage associant une fibre à une matrice, les industriels ont l'opportunité de développer des matériaux au design nouveau, plus léger, plus résistant et renfermant de très hautes performances.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreuses applications et inondent de plus en plus notre quotidien. Outre dans les utilisations aéronautiques et aérospatiales, ils sont également présents dans les secteurs du génie civil, de l'automobile, de la construction navale, de l'éolien, du sport, etc.

- Les renforcements de béton structurel
- L'isolation des câbleries en compartiment moteur
- Les structures portantes des constructions en milieux salins (éoliennes ou constructions navales)
- Le blindage
- Le vêtement anti-feu
- L'armement balistique
- Les écrans ignifuges dans les transports
- Les réservoirs à carburants
- Les oléoducs et conduites en températures extrêmes
- Les filtres chimiques à hautes températures
- Les textiles médicaux
- Le renforcement structurel des pneus et des convoyeurs

- Et encore bien d'autres.

1.8 Avantage des matériaux composites

Les matériaux composites ont de nombreux avantages par leurs propriétés exceptionnelles, comparé aux autres matériaux qui peuvent être utilisés pour une même application:

- Moins volumineux : La masse est plus compacte et on obtient ainsi un produit moins volumineux pour à propriétés équivalentes.
- Plus fort : Le matériau est très résistant aux charges, aux chocs grâce au renfort
- Plus rigide
- Plus résistant : Le matériau est également résistant aux intempéries et aux agressions chimiques grâce à la matrice qui protège
- Meilleure durée de vie : La tenue du matériau à travers le temps est très bonne, on observe une absence de corrosion
- Liberté de forme : La matière est plus malléable et il est plus facile de créer des formes particulières
- La matière est également plus étanche, plus isolante, etc.
- 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 ;
On peut ajouter d'autres avantages à ces matériaux comme:
- 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 Inconvénients des matériaux composites

Par contre, les composites présentent des inconvénients comme suit:

- Vieillessement 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.

CHAPITRE 02

MISE EN ŒUVRE ET STRUCTURES DE COMPOSITES

2.1 Introduction

Le but de cette partie est de connaître les principes des différents processus de mise en œuvre des matériaux composites. La plupart des techniques de mise en œuvre consistent à élaborer des pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée la stratification, conduit à l'élaboration de stratifiés, cela nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites [17].

Il existe de nombreuses méthodes et variantes de fabrication des matériaux composites :

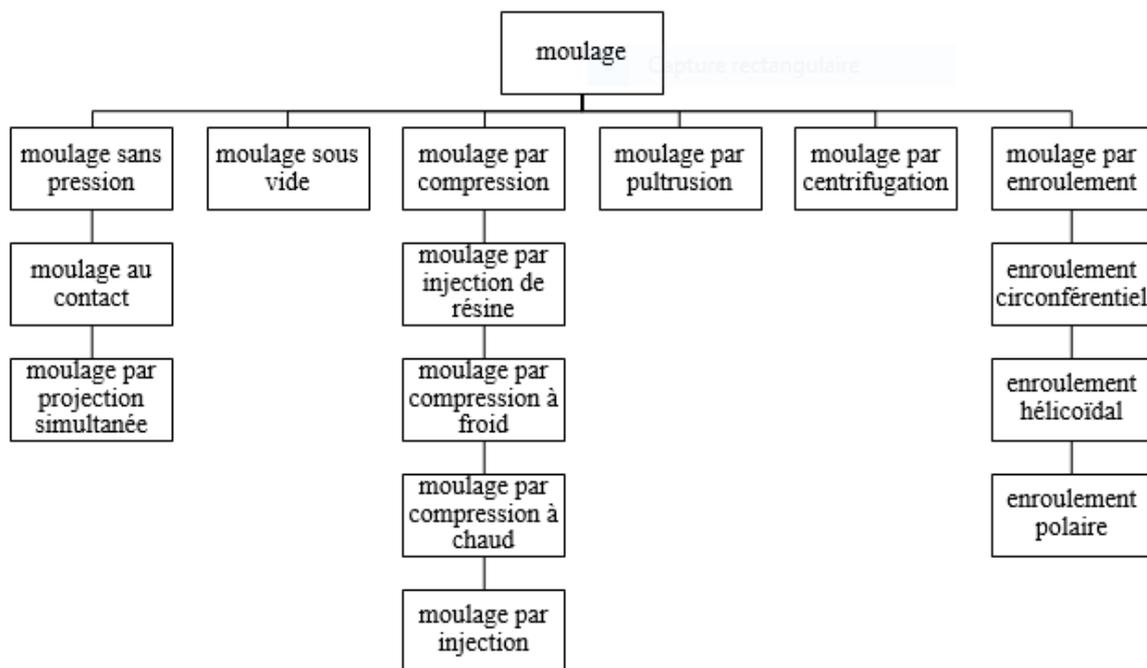


Figure 2-1 : Différents familles de moulage

2.1.1 Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement.

Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule.

Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur. [5]

2.1.1.1 Moulage au contact

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée « gel coat ».

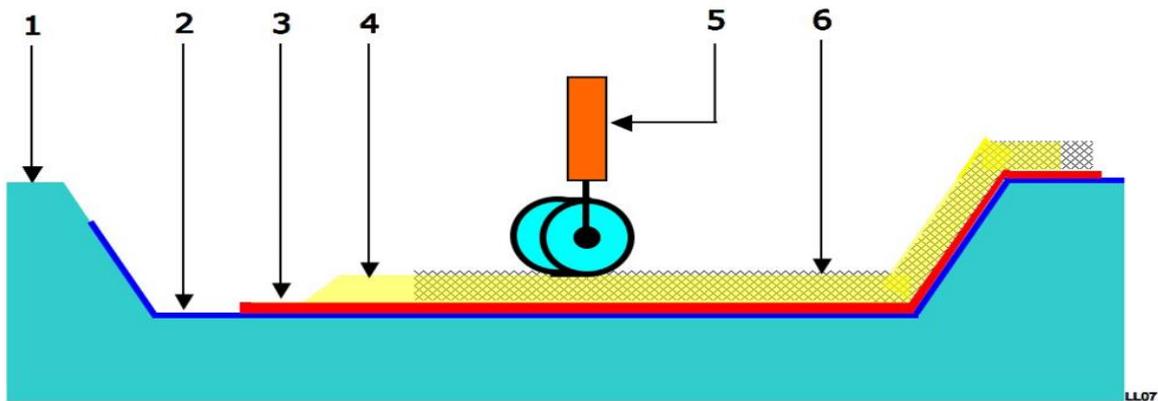


Figure 2-2 : Principe du moulage au contact.

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1) Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.

2) Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.

3) Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.

4) Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.

5) Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures)

6) La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines ; cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage

7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc. [5]

2.1.1.2 Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé. [5]

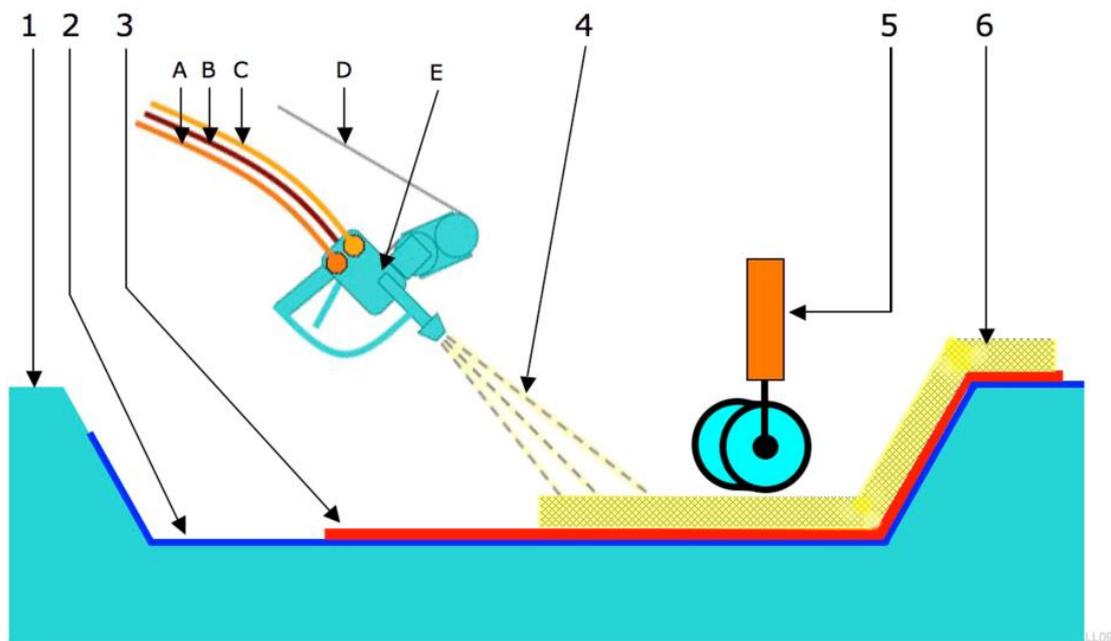


Figure 2-3 : Principe du moulage par projection simultanée.

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

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés.

Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques. [5]

2.1.2 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on

coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et déballe la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité. Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes. [5]

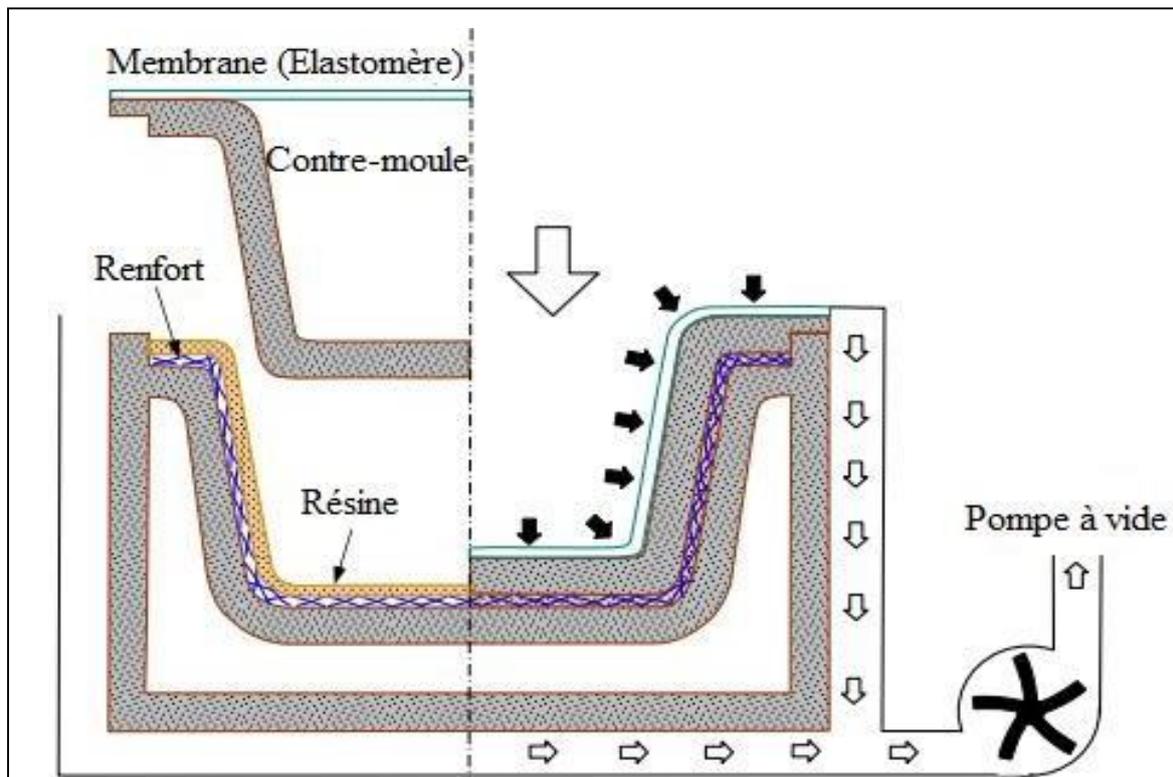


Figure 2-4 : Moulage sous vide [6].

2.1.3 Moulages par compression

2.1.3.1 Moulage par injection des résines

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

L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées. [5]

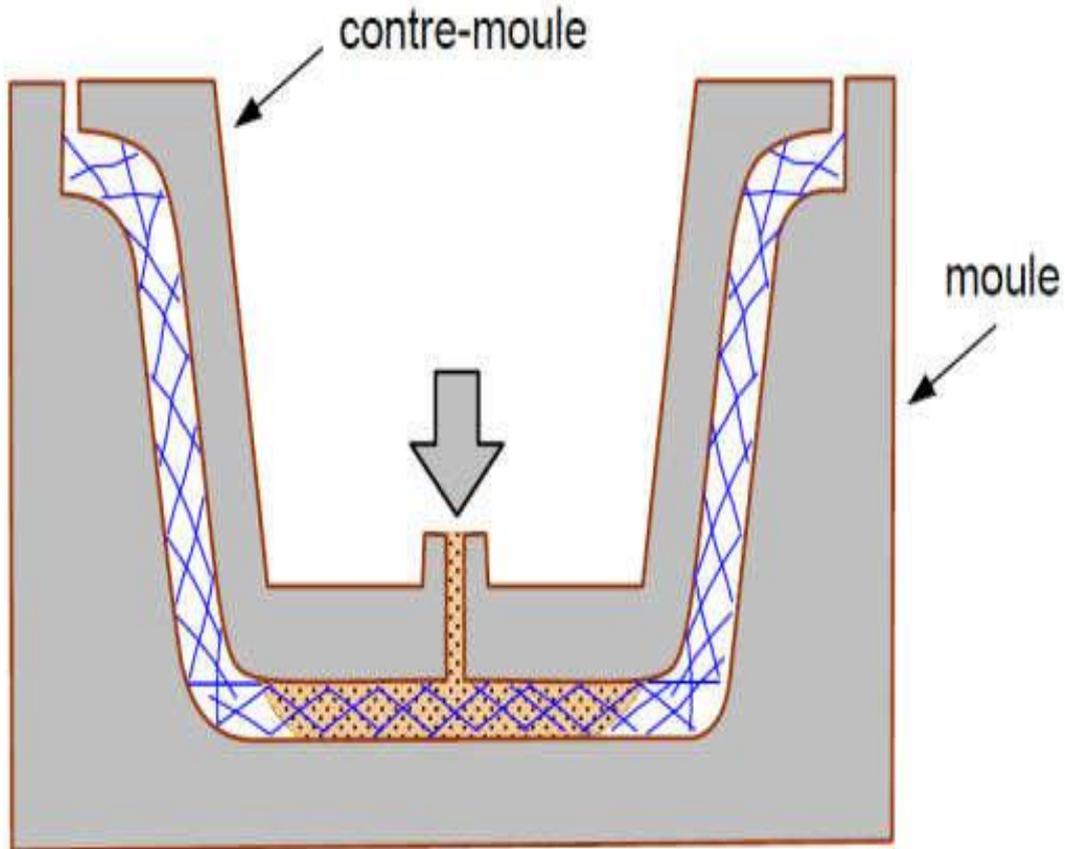


Figure 2-5 : Moulage par injection de résine.

2.1.3.2 Moulage par compression à froid

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

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

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

Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la pièce à chaud. [5]

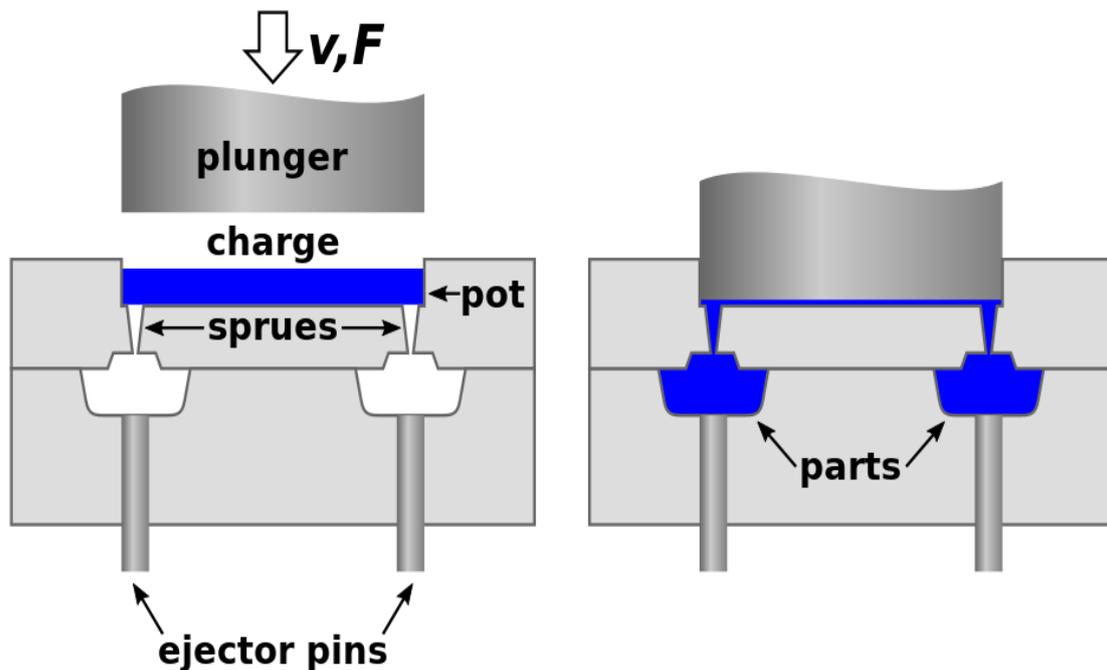


Figure 2-6 : Principe du moulage par compression à froid

2.1.3.3 Moulage par compression à chaud

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

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.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques.

Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse ;

La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars,

La température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C.

Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule. [5]

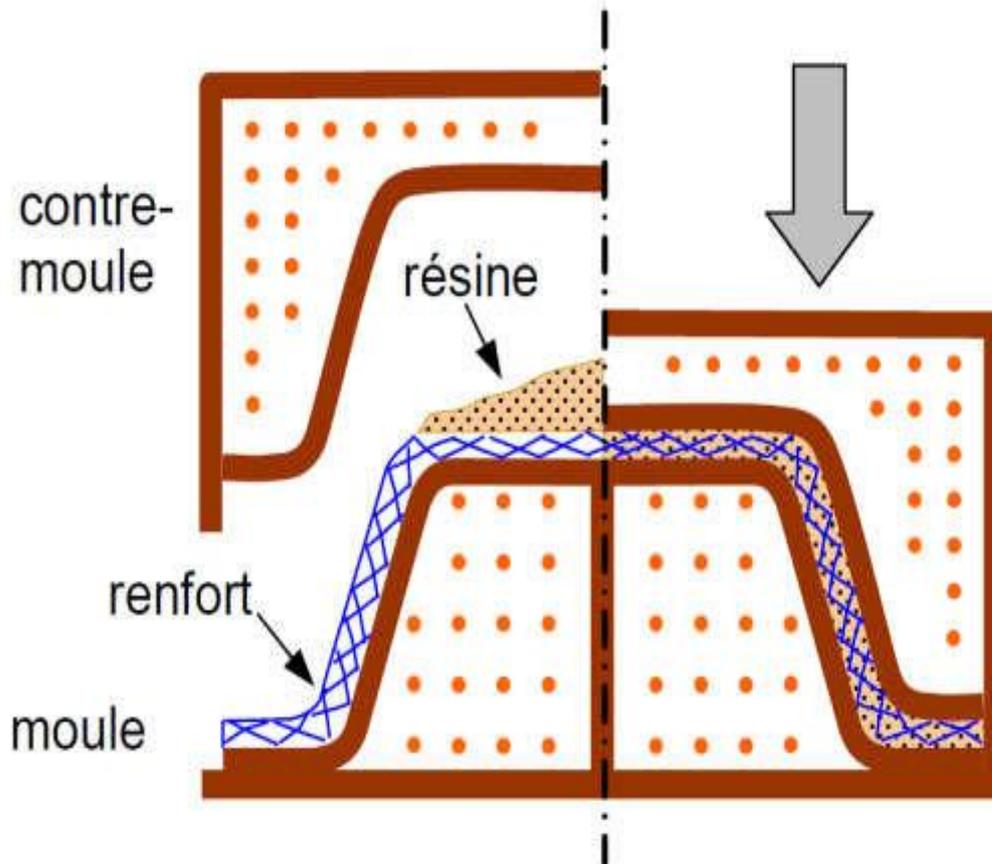


Figure 2-7 : Principe du moulage par compression à chaud

2.1.3.4 Moulage par injection

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

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

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

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries. [5]

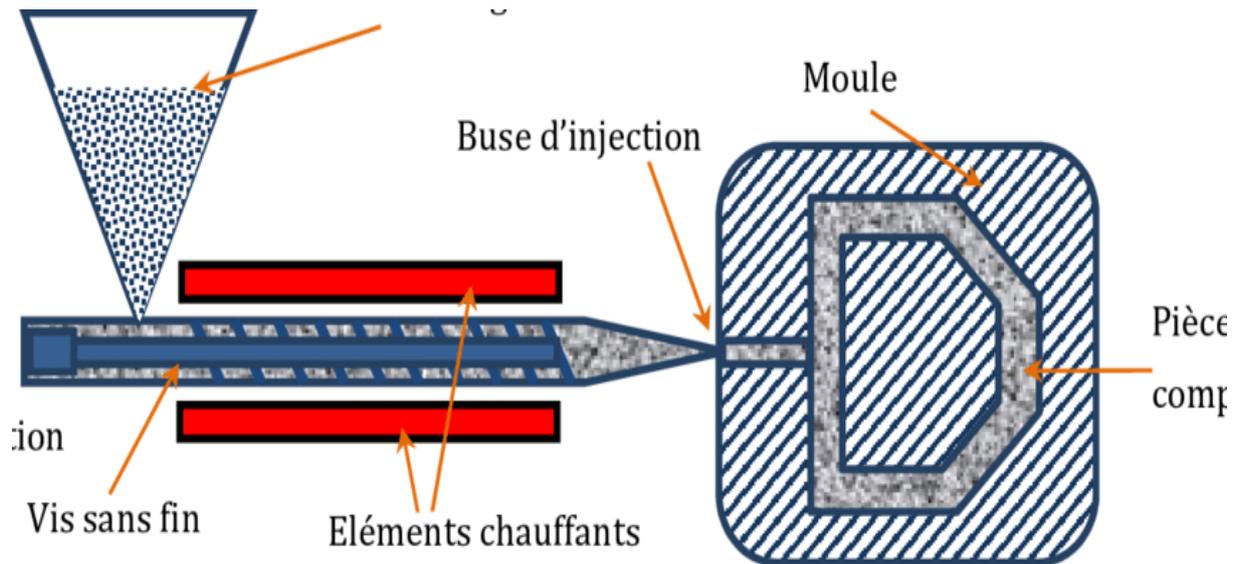


Figure 2-8 : Moulage par injection.

2.1.4 Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches ; de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

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

2) Une phase de mise en forme.

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

4) Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure 2.8), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure 2.9), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel. [5]

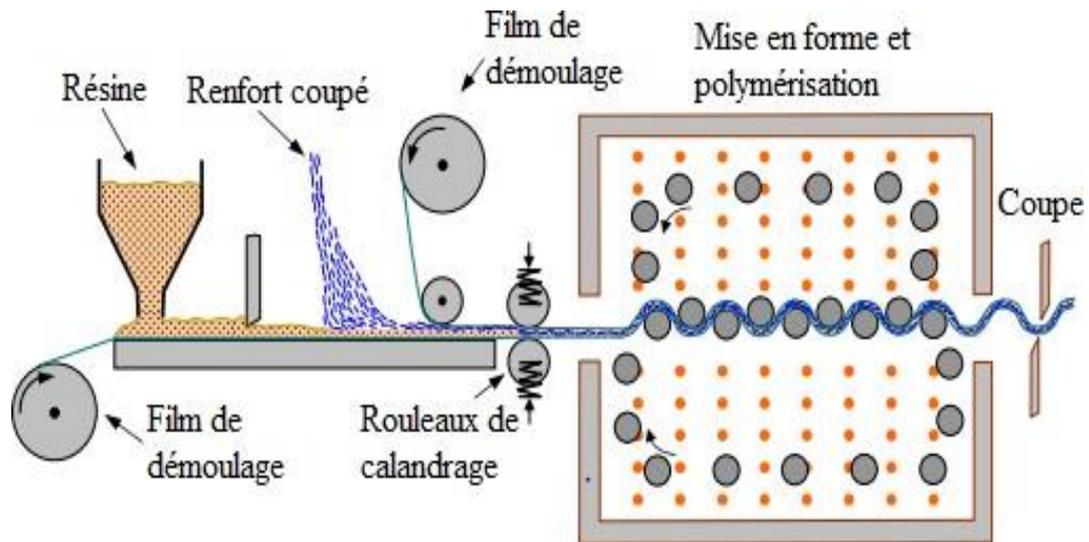


Figure 2-9 : Moulage en continu de plaques [2].

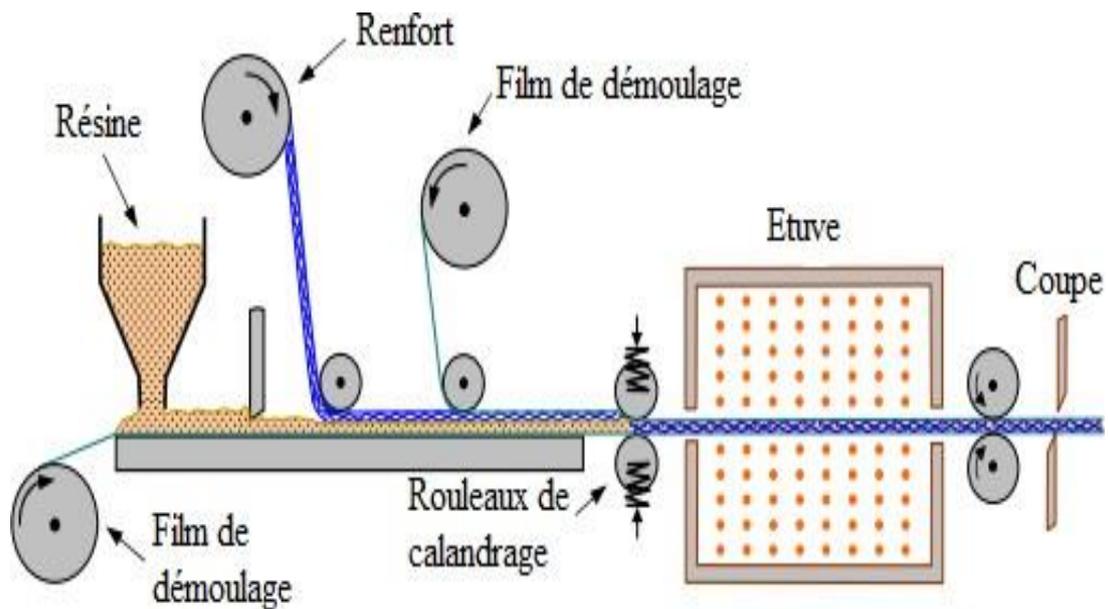


Figure 2-10 : Moulage en continu de panneaux ondulés [2].

2.1.5 Moulage par pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilé ; rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique (figure 2.10), les renforts : fils, stratifiés, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils 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.

Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées ; compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevée jusqu'à 80% en volume.

Le procédé est adapté production d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel.

Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc. [5]

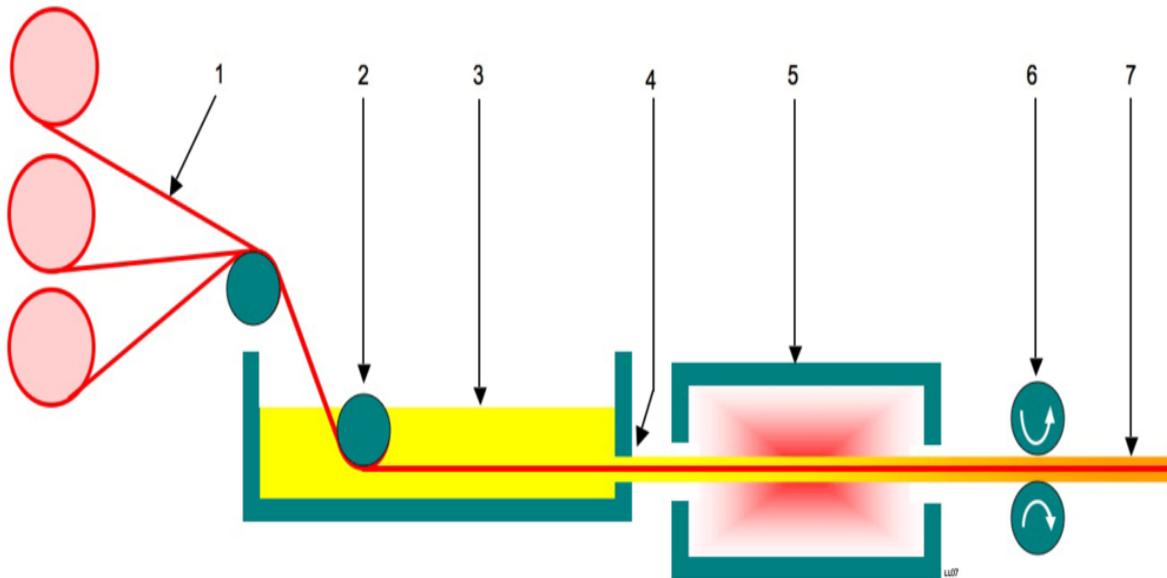


Figure 2-11 : Moulage par pultrusion.

1) rouleau continu de fibres, 2) rouleau de mise sous tension, 3) résine, 4) fibre imbibée, 5) cuisson, 6) étirage, 7) produit fini.

2.1.6 Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure 2.11) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

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

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation.

La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat ; tissu ; etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation de moule la résine est introduite ensuite lors de la centrifugation. Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés.

Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule. [5]

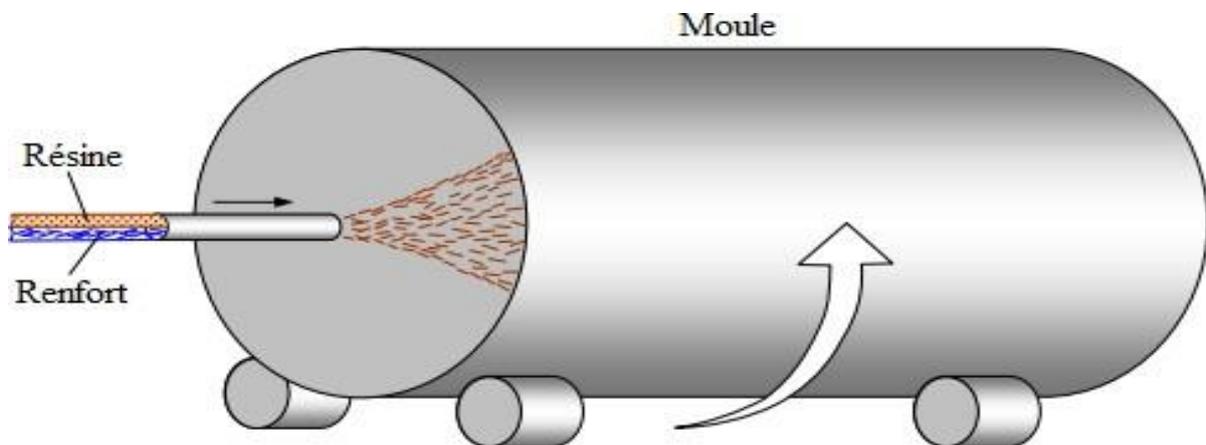


Figure 2-12 : Moulage par centrifugation [6].

2.1.7 Moulage par enroulement filamentaire

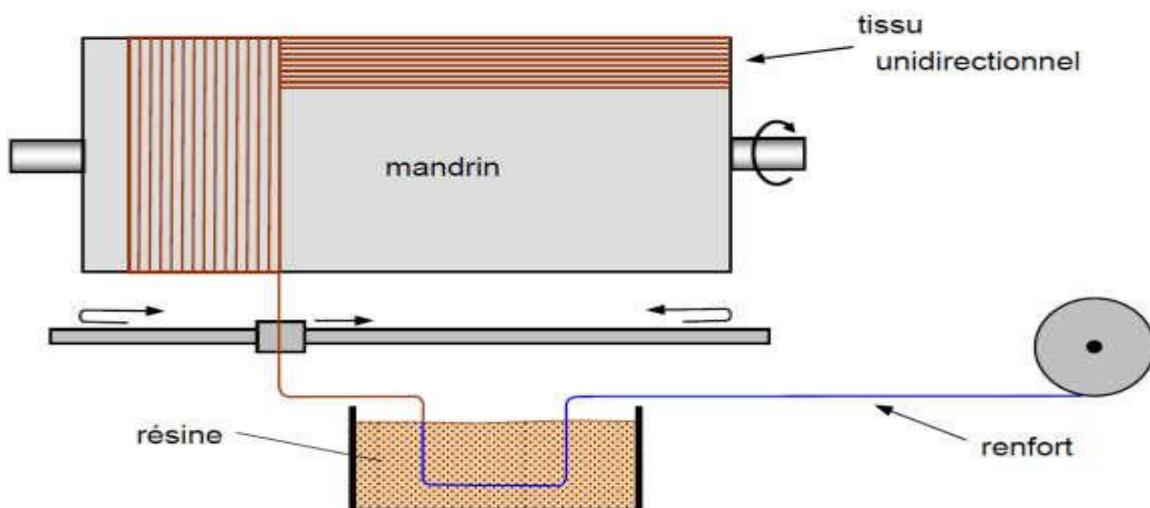


Figure 2-13 : Principe de l'enroulement circonférentiel

2.1.7.1 Principe

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) 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. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire. [5]

2.1.7.2 Enroulement circonférentiel

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

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé. [5]

2.1.7.3 Enroulement hélicoïdal

A. Enroulement discontinu

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif des guide-fils par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale.

La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs des guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin.

Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc. [5]

B. Enroulement continu

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs. [5]

2.1.7.4 Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement.

Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc. [5]

2.1.8 Les imprégnés

2.1.8.1 Utilisation de demi-produits

La mise en œuvre de demi-produits (pré-imprégnés, compounds) fait appel aux mêmes techniques que le moulage à partir de fils ou tissus, dont l'imprégnation par la résine est effectuée au moment de la mise en œuvre.

Nous en avons séparé la présentation, compte tenu du caractère propre de ces demi-produits : facilité de manipulation, possibilité d'automatisation avancée des procédés de mise en œuvre à partir de ces produits, etc. Il est ainsi concevable de penser que l'utilisation et le développement de pré-imprégnés et compounds de divers types, associés à une conception assistée par ordinateur et à une robotisation, permettront de pénétrer de plus en plus les marchés industriels : construction automobile, construction navale, armement, etc. [5]

2.1.8.2 Pré-imprégnés

➤ Principe

Les pré-imprégnés sont des produits vendus sous forme de rubans, tissus, etc., imprégnés de résine généralement dissoute dans un solvant.

Les résines peuvent être phénoliques, des polyesters, des résines époxydes, des polyamides, etc. Le pourcentage en volume de fibres est élevé (50 à 80 %) de manière à obtenir des composites à hautes performances mécaniques.

Les tissus imprégnés sont généralement minces (de l'ordre de 1/10 mm), et par conséquent de faible masse surfacique : 100 à 300 g/m². Toutefois, pour les besoins de la construction navale, certains pré-imprégnés épais ont été mis au point pour simplifier la mise en œuvre. [5]

➤ Élaboration

La fabrication des pré-imprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale, Le fil ou tissu est déroulé à vitesse lente (1 à 10 m/min), et passe dans un bac contenant une résine

d'imprégnation diluée dans un solvant. À la sortie, des racleurs et des rouleaux essoreurs éliminent l'excès de résine.

En effet, nous avons indiqué qu'un des intérêts des pré-imprégnés est d'être à faible proportion de résine. Le fil ou tissu imprégné passe ensuite dans un four, où la plus grande partie du solvant s'évapore, et où s'amorce un début de polymérisation. À la sortie du four, le pré-imprégné est refroidi par ventilation, de manière à stopper la polymérisation qui doit rester inachevée. Le tissu est ensuite :

- soit enroulé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en rouleau ;
- soit coupé et empilé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en plaques. [5]

➤ **Intérêt des pré-imprégnés**

Les avantages essentiels des pré-imprégnés résident dans :

– des performances mécaniques élevées du stratifié obtenu, résultant de la forte proportion de fibres.

– une amélioration des conditions de travail et de sécurité, du fait de la suppression des manipulations de résine et du dégagement de vapeurs toxiques. [5]

2.1.8.3 Les compounds de moulage

Les compounds composés de moulage sont des demi produits livrés en rouleaux ou en feuilles d'épaisseur d'environ 3mm, qui sont composés généralement de résine polyesters-fibres de verre, placés entre deux films de polyéthylène. Ils sont parfois considérés comme des pré-imprégnés mais qui sont différenciés par leurs utilisations.

Parmi les compounds les plus utilisés :

- les SMC : Sheet Moulding Compounds
- les HMC : High Moulding Compounds

Il existe d'autres types de compounds qui sont développés pour chaque utilisation spécifique.

Un de leurs intérêts réside dans un temps de polymérisation très courte d'où la possibilité de les utiliser dans des productions de grandes séries.

➤ **PRINCIPE**

Le SMC est un composé de moulage lamifié comportant une proportion de fibres de 30% en masse et une forte proportion en charge jusqu'à 50% dans la résine, on distingue plusieurs type de fibres :

- Des fibres coupées avec répartition aléatoire **SMC-R**
- Des fibres coupées unidirectionnelle **SMC-D**

- Des fibres continues unidirectionnelles SMC-C

On peut aussi distinguer des SMC mixtes avec des fibres coupées unidirectionnelles et réparties au hasard ou bien des fibres continues unidirectionnelles et fibres coupées répartis au hasard

Les fibres peuvent être aussi de différentes natures ou mixtes

En diminuant la proportion des charges dans la résine, il est possible d'augmenter les proportions des fibres en masse.

Alors le compound est appelé HMC avec de grandes caractéristiques mécaniques (élevées).

➤ **ELABORATION**

La résine sous forme de pâte est véhiculée par une feuille de polyéthylène, Les fibres sont disposées sur la résine puis recouvertes par une deuxième feuille de polyéthylène.

L'ensemble passe dans un système de compactage pour être ensuite enroulé la polymérisation est retardée par adjonction de magnésium de potassium.

Le compound se présente sous formes de feuilles molles et poisseuses.

➤ **MISE EN ŒUVRE**

Le moulage est réalisé selon les techniques de moulage par compression.

A la différence des prés imprégnés les compounds s'écoulent pour remplir tous le moule et on dit qu'elle flue.

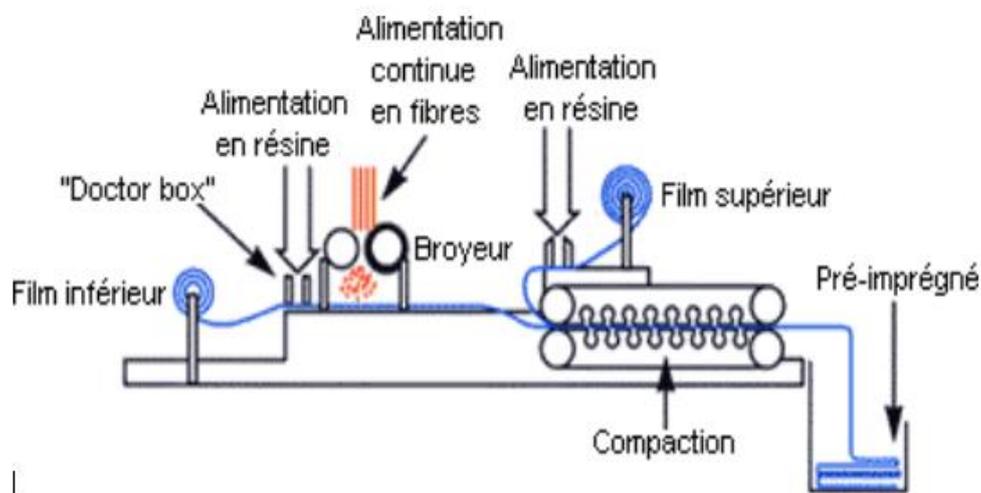


Figure 2-14 : Schéma d'une chaîne de production SMC

2.1.9 Structure des matériaux composites

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface : plaques, coques.
- par stratification de couches successives.

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

2.1.9.1 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 [13].

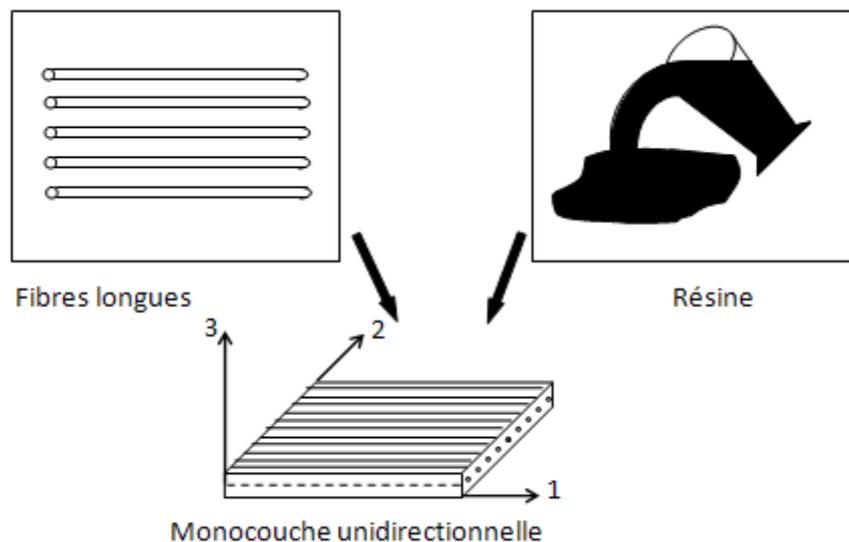


Figure 2-15 : Structure de composite monocouche

2.1.9.2 Les sandwiches

Un matériau composite à structure sandwich ou plus simplement un matériau sandwich ou structure sandwich est une classe spéciale de matériaux composites qui est fabriquée en assemblant deux peaux externes minces mais rigides à une âme interne légère mais épaisse. Le matériau constituant l'âme est normalement un matériau à faible résistance

mécanique, mais son épaisseur plus élevée confère au matériau sandwich une rigidité à la flexion élevée et une masse volumique globale faible. [12]

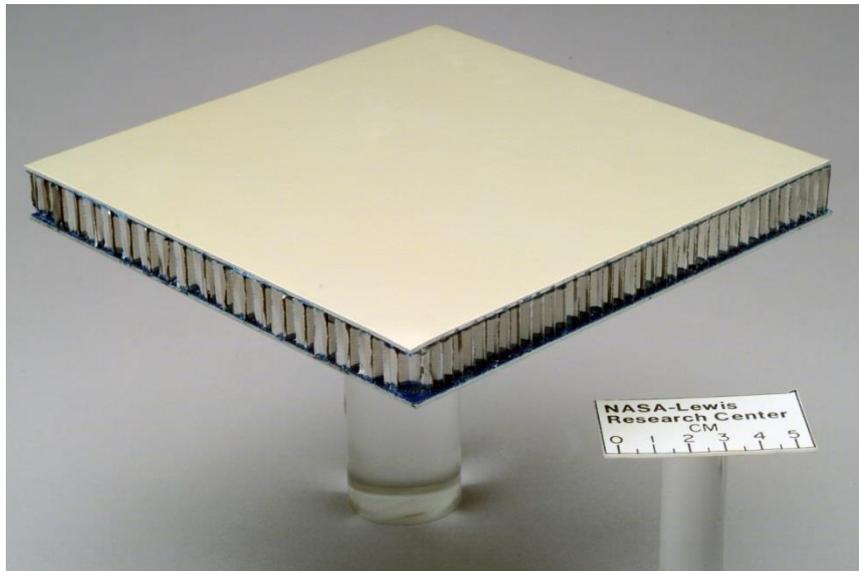


Figure 2-16 : Panneau composite à structure sandwich utilisé pour des tests a la NASA

➤ **Composition :**

▪ **L'âme :**

L'âme transmet par cisaillement les actions mécaniques d'une peau à l'autre.

L'âme peut être en :

- mousse à cellules ouvertes ou fermées composée de polyéther sulfone, de polychlorure de vinyle, de polyuréthane, de polyéthylène, de polystyrène, de bois de balsa, de métal ou de mousses syntactiques ;
- structure de nids d'abeilles en alliage d'aluminium, en papier kraft imprégné, en tissu de verre imprégné de résines en polyester insaturé, en tissu d'aramide imprégné de résines phénoliques ou en polypropylène. Parfois, la structure en nid d'abeilles est remplie d'autres mousses pour plus de résistance.
- structure ondulée, c'est le cas par exemple du carton ondulé. [12]

▪ **Les deux peaux :**

Les peaux peuvent être en bois, en tôle métallique (aluminium, titane ou acier) ou en matériaux composites stratifiés.

Les matériaux composites stratifiés peuvent être des thermoplastiques ou principalement des thermodurcissables renforcés de fibres.

Les matrices les plus utilisées sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 2-1 : Les matrices les plus utilisées.

Matrice	Principales fibres	Coût	Besoin de chauffer lors de la fabrication	Propriétés mécaniques
Polyesters insaturés	Fibres de verre	Plus faible	Peu	Plus faibles
Poly-époxydes	Fibres de carbone	Plus élevé	Oui	Plus élevées

Les renforts peuvent être des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces fibres peuvent être utilisées sous forme de : nappes unidirectionnelles ou broyée : textiles filés, tissés, non tissés, tricotés ou en rubans. [12]

▪ **Association peau- âme**

L'âme est liée aux deux peaux par collage grâce à la capacité adhésive intrinsèque des peaux ou grâce à un adhésif ou plus rarement par soudage.

➤ **Fabrication**

Les procédés de fabrication des matériaux sandwichs peuvent être les mêmes que ceux utilisés pour les autres matériaux composites ou des procédés spécifiques.

Les moulages par voie humide (imprégnation directe) les plus utilisés sont le moulage au contact, le moulage sous vide, le moulage par compression, le moulage par projection simultanée, le moulage par infusion sous vide et le moulage par transfert de résine.

Les moulages par voie sèche en utilisant des pré-imprégnés peuvent aussi être utilisés. Les procédés spécifiques aux matériaux sandwichs peuvent être réalisés en :

- collant ensemble en continu ou en discontinu des peaux et des âmes préfabriquées;
- fabriquant in-situ l'âme sous forme d'une mousse entre deux peaux déjà installées dans un moule, on parle alors de moussage in situ [12]

➤ **Utilisations**

Les matériaux sandwichs sont utilisés pour fabriquer des panneaux dans les avions, des pales d'hélicoptère, des aubes de turbines, des coques de bateaux, des planches de ski, etc.

Une structure en matériaux composites sollicitée uniquement dans la direction du renforcement (fibre) est théoriquement d'une à six fois plus légère que celle fabriquée avec des alliages métalliques. Dans la réalité, à cause de la mise en œuvre des liaisons entre pièces,

du renforcement multi directionnel, le gain de masse pratique se réduit à quelques dizaines de % (jusqu'à -45%), ce qui reste très avantageux pour des applications où ce paramètre est important (aéronautique, énergie, transports, mats techniques, etc...). [12]

2.1.9.3 Les stratifiés

Le stratifié est un panneau composite utilisé pour le revêtement de sol et de meuble. Il se compose de papier kraft (de 10 à 20 feuilles superposées) et d'une feuille de papier décoratif de surface, le tout étant imprégné de résine phénol-formaldéhyde pour les couches centrales et de résine mélamine-formaldéhyde pour la couche de surface. La couche de mélamine est appelée overlay. A ne pas confondre avec le stratifié qui est le résultat de la stratification (par exemple à base de résine époxy et fibre de verre). [12]

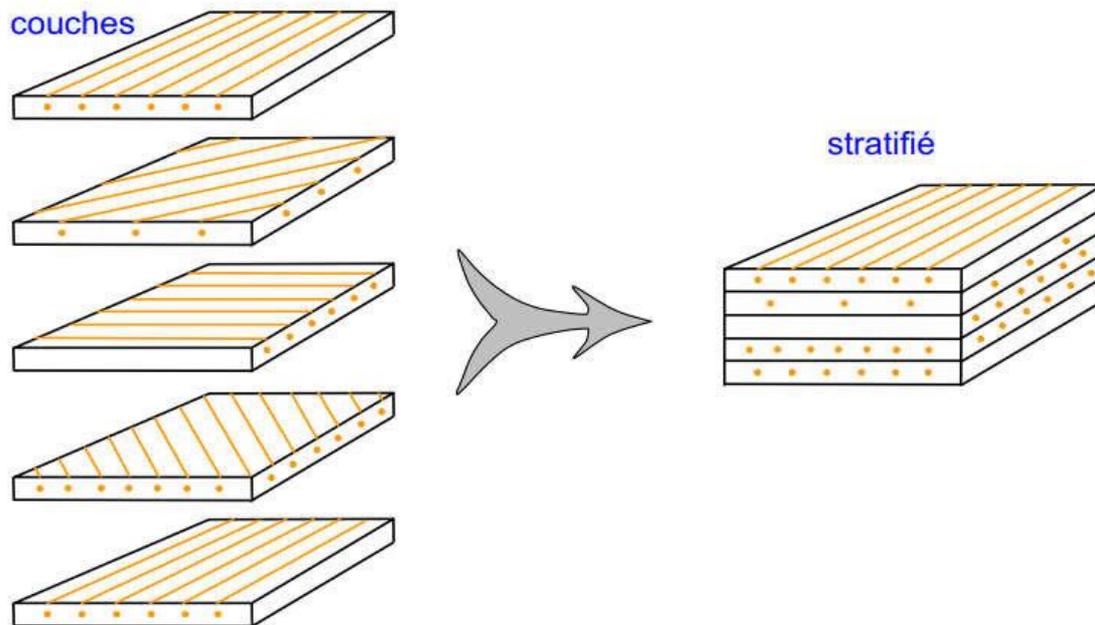


Figure 2-17 : Constitution d'un stratifié

➤ Fabrication

Les différentes feuilles qui composent le panneau sont imprégnées de résine, puis pressées à chaud pour réticuler. La température et la pression exercées rendent les couches de papier solidaires et provoquent la transparence des couches de surface. Le stratifié est ensuite poncé en contre-parement et coupé au format désiré. [12]

On pourra avoir des stratifiés de type :

- **Équilibré:** stratifié comportant autant de couches orientées dans une 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°.

➤ Typologie selon la pression de fabrication

Il existe sur le marché des stratifiés décoratifs basse pression et haute pression. Leur fabrication ne diffère pas beaucoup à l'exception de la pression appliquée lors du pressage.

- Un stratifié décoratif haute pression (en anglais high pressure decorative laminate, HPL ou HPDL) est constitué de stratifiés moulés et durcis à des pressions non inférieures à 70 kg/cm² et plus communément de 80 à 140 kg/cm².
- Un stratifié décoratif basse pression est défini comme un stratifié en plastique moulé et durci à des pressions généralement de 2,8 MPa²(28,5 kg/cm²). [12]

➤ Typologie selon l'épaisseur

Les stratifiés minces (de 0,6 mm à 2,3 mm) sont des matériaux de revêtement qui s'utilisent en placage. Ils ne doivent pas être confondus avec les panneaux mélaminés, qui sont également recouverts, à chaud et sous pression, d'une feuille unique de papier décor imprégnée de mélamine.

Les stratifiés épais (de 3,5 mm à 18 mm), nommés compacts, s'emploient tel-quels. La feuille de décoration est dans ce cas présente sur les deux faces. [12]

➤ Application

On emploie le stratifié de plus en plus dans la fabrication de mobilier intérieur, dressings, meubles de cuisine et de salle de bain, plan de travail, mobilier de bureau, et d'agencement pour lieux en tous genres (logements, locaux commerciaux, locaux professionnels) [12]

2.1.9.4 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.

- Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
- Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
- Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code. [12]

2.1.9.5 Désignation des stratifiés

La désignation des stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1) Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.

2) Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.

3) Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.

4) Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code, La désignation dépend du système d'axes choisi.

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de 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.

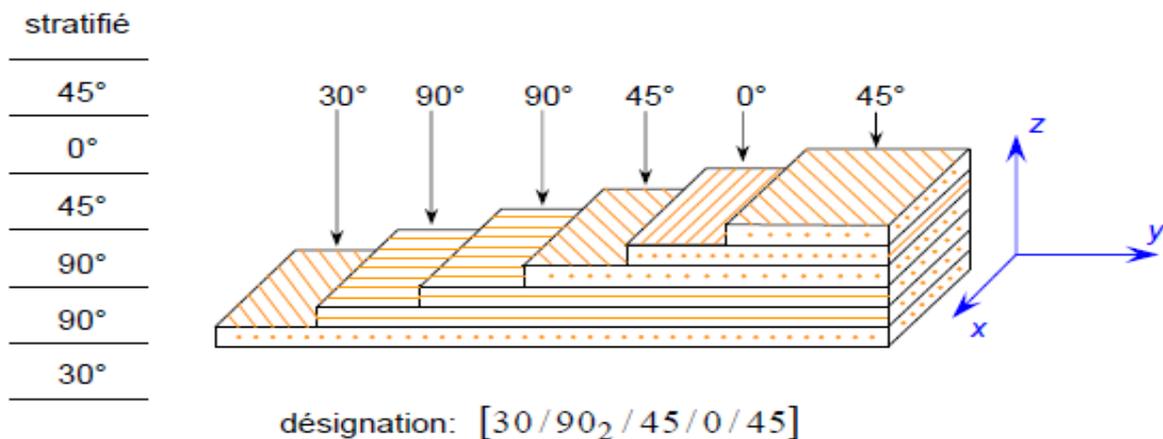


Figure 2-18 : Désignation d'un stratifié

2.2 Conclusions

Pour chaque famille de matériaux composites, nous venons de voir qu'il existe plusieurs types de procédés de mise en forme ; ces procédés consistent tous à mettre en place les fibres

et à mouler la matrice autour des fibres, le mode de dépôt et de solidification variant en fonction du type de matrice.

Le choix de l'un ou l'autre de ces procédés dépend naturellement du niveau de qualité attendu et du nombre de pièces à produire, mais pas seulement : la taille et la géométrie de la pièce, la disposition et l'orientation des renforts (que l'on choisit en fonction du chargement)... rentrent également en compte. Tous les procédés ne permettent pas d'obtenir toutes les formes de pièces ou de renforts, et ce de façon encore plus marquée qu'avec les matériaux traditionnels ; le choix du procédé doit être effectué très en amont, lors de la conception de la pièce. [9]

CHAPITRE 03

COMPORTEMENT MECANIQUE DES STRATIFIES ET LEURS ENDOMMAGEMENT

3.1 Comportement élastique des matériaux

Pour un matériau donné, la loi de comportement consiste à déterminer la relation entre les contraintes et les déformations quand il est soumis à des sollicitations extérieures. Dans un milieu continu élastique l'état de contraintes, en un point dans un repère orthonormé (x, y, z) donné est entièrement définis par le tenseur des contraintes noté σ_{ij} . Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [14].

3.2 Loi de Hooke généralisée

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme suivante [15].

$$\sigma = C \varepsilon \quad (3-1)$$

Ou sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

3.2.1 Matrice de rigidité

Dans cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, la matrice de rigidité C est symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants. La matrice de flexibilité ou de souplesse S_{ij}, peut être écrite sous la forme inverse, suivante :

$$\varepsilon = S \sigma \quad (3-2)$$

3.2.2 Matrice de souplesse

La relation d'élasticité (3-2) peut être écrite sous la forme inverse,

$$\varepsilon = S \sigma \quad (3-3)$$

En introduisant la matrice inverse de la matrice de rigidité. La matrice S est appelée matrice

de souplesse ou de flexibilité, et s'écrit sous le cas

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

Les coefficients S_{ij} sont appelés les constantes de souplesse ou constantes de flexibilité.

$$S = C^{-1} \quad (3-5)$$

Un matériau dépendant de 21 constantes indépendantes est dit un matériau anisotrope. C'est un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie.

3.3 Différents matériaux

3.3.1 Matériaux monocliniques

Si le matériau a un plan de symétrie, monoclinique, quelques constantes sont nulles et le comportement peut être décrit avec 13 constantes indépendantes [14].

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

3.3.2 Matériaux orthotropes

Un milieu est dit orthotrope pour une propriété donnée si cette propriété est invariante par changement de direction obtenue par symétrie relative à deux plans orthogonaux. On remarque alors que la symétrie par rapport au troisième plan orthogonal est automatiquement acquise. Ce mode de comportement est relativement bien réalisé pour les composites unidirectionnels [16].

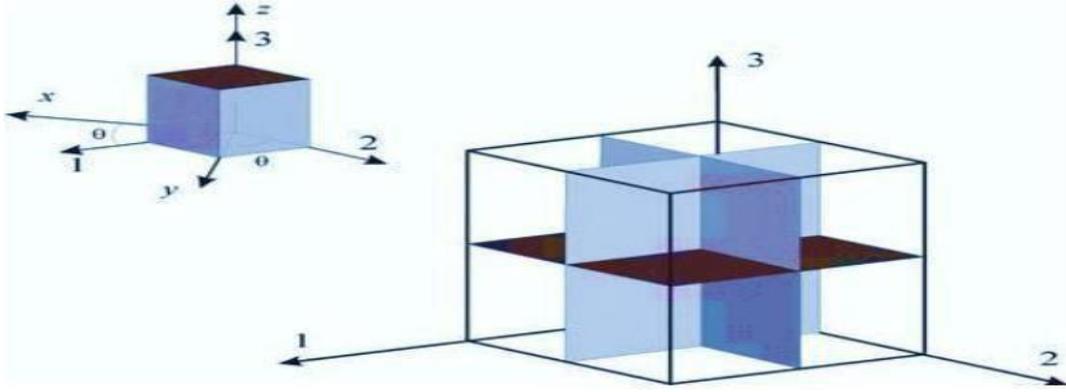


Figure 3-1 : Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope [16]

Les coefficients indépendants se réduisent à 9. La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

Ou encore :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

En introduisant les caractéristiques élastiques :

- E_1, E_2, E_3 : Modules d'élasticité.
- G_{12}, G_{13}, G_{23} : Modules de cisaillement.
- $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$: Coefficients de poisson (contraction).

La relation (3.8) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\nu_{21} & -\nu_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_{21}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{1}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12} & \frac{E_{31}}{E_{11}} & \frac{E_{32}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_{12}}{E_{11}} & \frac{E_{22}}{E_{11}} & \frac{E_{23}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_{13}}{E_{11}} & \frac{E_{23}}{E_{11}} & \frac{E_{33}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

La symétrie de la matrice de souplesse [S] impose les relations suivantes :

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}$$

$$\frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1}$$

$$\frac{\nu_{33}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3}$$

3.3.3 Matériaux isotropes

Dans ce cas toutes les directions et en tout point du matériau ont les mêmes propriétés mécaniques. Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 2 coefficients et la loi de comportement s'écrit [17].

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ & \text{sym} & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

En termes de constantes techniques l'inverse de la relation (3.10) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & -\nu & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

Avec :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

3.3.4 Matériaux isotropes transverses

Un matériau isotrope transverse est un matériau orthotrope qui comporte un axe ou un plan d'isotropie. Les propriétés suivant l'axe 2 et 3 sont identiques, donc [14].

$$C_{22} = C_{33}$$

$$C_{12} = C_{13}$$

$$C_{55} = C_{66}$$

$$C_{44} = \frac{C_{22} - C_{33}}{2}$$

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 5.

La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22}-C_{33}}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

3.3.5 Matériaux quasi isotropes transverses

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 6 coefficients, et la loi de comportement s'écrit [14].

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & C_{45} & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

3.3.6 Matériaux quasi isotropes

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 3 coefficients, la loi de comportement s'écrit [17].

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (3-14)$$

3.4 Flexion 3 points

Nous considérons une poutre en flexion 3 points (figure 3.2). La symétrie du problème conduit à ne considérer qu'une moitié de poutre.

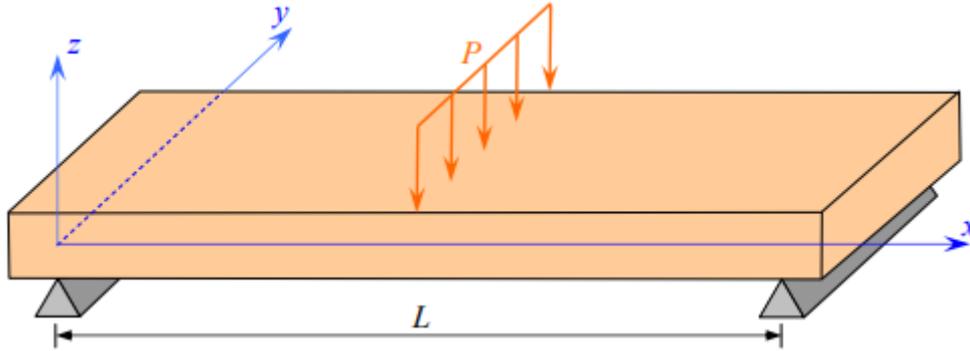


Figure 3-2 : Sollicitation d'une poutre en flexion 3-points [5]

Le moment de flexion s'exprime par la relation :

$$M = -Px/2 \quad (3-15)$$

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

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{Px}{2E_x I} \quad 0 < x < L/2 \quad (3-16)$$

I : le moment quadratique de la section droite de la poutre par rapport au plan (x, y) :

$$I = I_{xy} = \frac{bh^3}{12} \quad 0 < x < L/2 \quad (3-17)$$

E_x : est le module de flexion de la poutre :

$$E_x = \frac{12}{h^3 D_{11}^*} \quad (3-18)$$

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

$$W_c = \frac{PL^3}{(48E_x l)} = \frac{PL^3 D_{11}^*}{48b} \quad (3-19)$$

Les contraintes dans la couche K s'écrivent :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^k &= \frac{-6a_{xx}^k pxz}{bh^3} \\ \sigma_{yy}^k &= \frac{-6a_{yy}^k pxz}{bh^3} \\ \sigma_{xy}^k &= \frac{-6a_{xy}^k pxz}{bh^3} \end{aligned} \quad (3-20)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^k &= \frac{-3a_{xx}^k PLz}{bh^3} \\ \sigma_{yy}^k &= \frac{-3a_{yy}^k PLz}{bh^3} \\ \sigma_{xy}^k &= \frac{-3a_{xy}^k PLz}{bh^3} \end{aligned} \quad (3-21)$$

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

s'écrit :

$$\sigma_{xx} = -\frac{3PL}{bh^3}z \quad (3-22)$$

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

$$\sigma_{xx \max} = \sigma_0 = -\frac{3PL}{2bh^2} \quad (3-23)$$

La contrainte dans la couche K d'un stratifié peut donc s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{xx}^k = \frac{-2a_{xx}^k \sigma_0 z}{h} \quad (3-24)$$

3.5 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 (3.3)

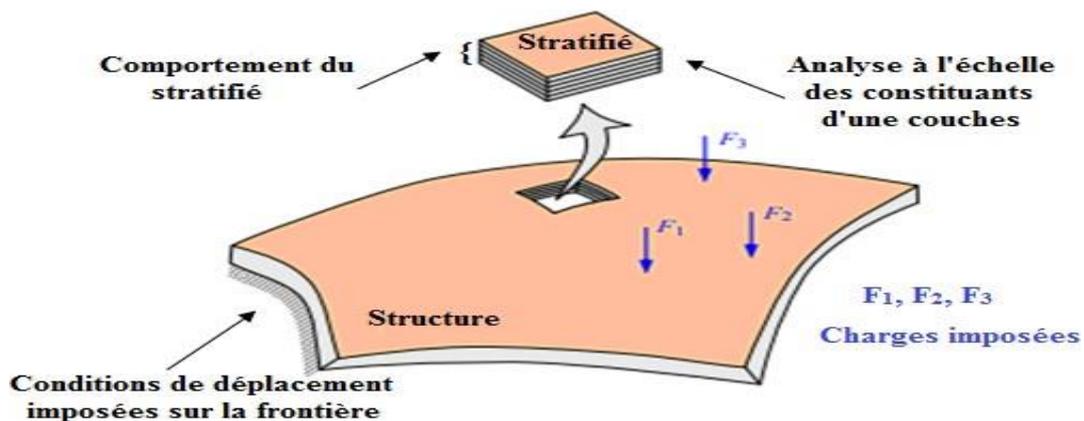


Figure 3-3 : Schéma d'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite

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

3.5.1 Constitution d'un matériau composite unidirectionnel

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

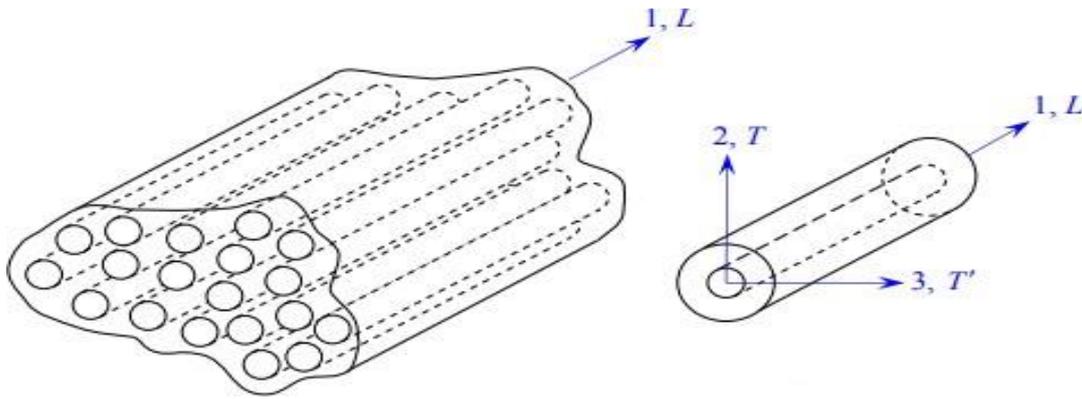


Figure 3-4 : Composite unidirectionnel [5].

Un pli de composite unidirectionnel comprend plusieurs fibres parallèles qui se noient dans la matrice (Figure 3.5). 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 .

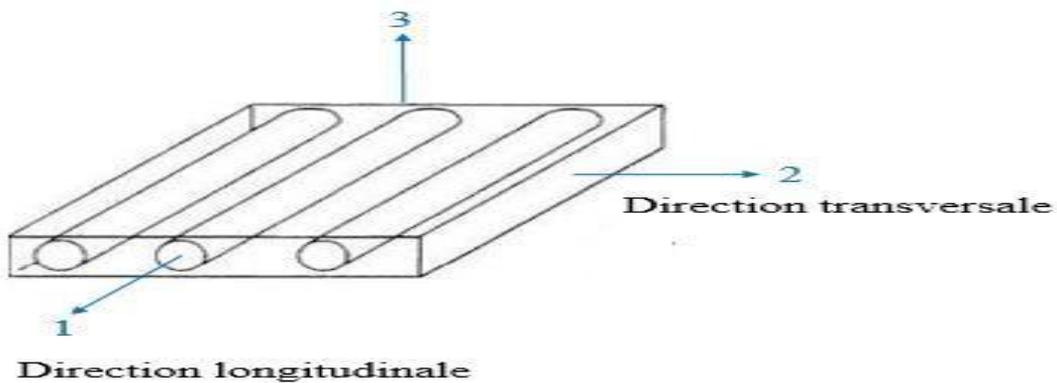


Figure 3-5 : Schéma d'un pli de composite unidirectionnel [5]

3.5.2 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.

3.5.3 Composition du composite (fibre, matrice)

3.5.3.1 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 [5].

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] :

$$P_f = \frac{P_f}{P_c} \quad (3-25)$$

$$P_m = \frac{p_m}{p_c} \quad (3-26)$$

Avec :

$$p_m = 1 - p_f \quad (3-27)$$

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 [5] :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (3-28)$$

La fraction volumique de matrice est :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3-29)$$

Avec :

$$V_m = 1 - V_f \quad (3-30)$$

Puisque :

$$v_c = v_f + v_m$$

On peut écrire aussi :

$$V_{\text{fibre}} = \frac{\frac{P_{\text{fibre}}}{\rho_{\text{fibre}}}}{\frac{P_{\text{fibre}}}{\rho_{\text{fibre}}} + \frac{P_{\text{matrice}}}{\rho_{\text{matrice}}}} \quad (3-31)$$

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 ;
- ***ρ_{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 [5] :

$$V_p = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (3-32)$$

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 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 %.

3.5.4 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.).

3.5.4.1 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 [18].

Parmi les divers travaux effectués dans ce cadre, nous citerons d'une part les travaux de Z. Hashin [19] et R. Hill [20], 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 [21] 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 [5] :

$$\begin{cases} G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (3-33)$$

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 [5] :

$$\begin{cases} K_i = \frac{E_i}{3(1-2\nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (3-34)$$

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 [5] :

$$\begin{cases} K_i = k_i + \frac{G_i}{3} \\ i = m, f \end{cases} \quad (3-35)$$

On peut écrire aussi :

$$\begin{cases} K_i = \frac{E_i}{2(1-2\nu_i)(1+\nu_i)} \\ i = m, f \end{cases} \quad (3-36)$$

D. Module d'Young longitudinal

Le module d'Young longitudinal est déterminé dans un essai de traction longitudinale (Figure 3.7). L'hypothèse simplificatrice est de supposer une déformation uniforme et identique dans la fibre et dans la matrice [5].

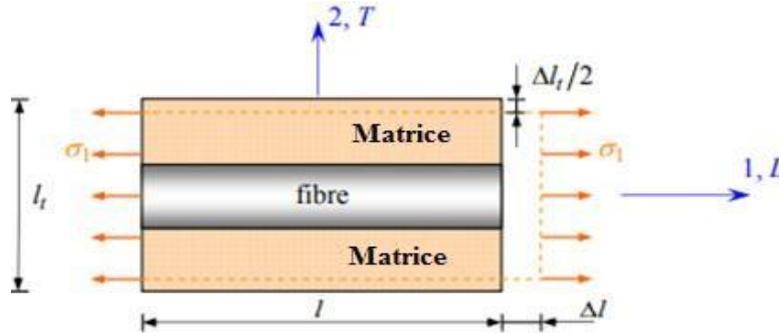


Figure 3-6 : Schéma simplifié d'une traction longitudinale [5].

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 :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (3-37)$$

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

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (3-38)$$

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

$$\begin{cases} \sigma_f = E_f \varepsilon_1 \\ \sigma_m = E_m \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3-39)$$

La charge totale appliquée est :

$$F_1 = \sigma_f s_f + \sigma_m s_m \quad (3-40)$$

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 :

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (3-41)$$

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

longitudinal :

$$\sigma_1 = E_L \varepsilon_1 \quad (03-42)$$

La combinaison des relations (3.39) à (3.40) conduit à l'expression du module d'Young longitudinal :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3-43)$$

À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de cisaillement de la matrice (\mathbf{G}_m), et des modules d'Young ($\mathbf{E}_m, \mathbf{E}_f$), modules de compressibilité latérale ($\mathbf{K}_m, \mathbf{K}_f$), et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres.

Le module d'Young longitudinal s'écrit :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) + \frac{4V_f(1 - V_f)(V_f - V_m)^2}{\frac{V_f}{k_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{(1-V_f)}{k_f}} \approx E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3-44)$$

E. Coefficient de Poisson longitudinal

Le coefficient de Poisson est déterminé dans un essai de traction longitudinal, schématisé sur la figure (3.8) [5].

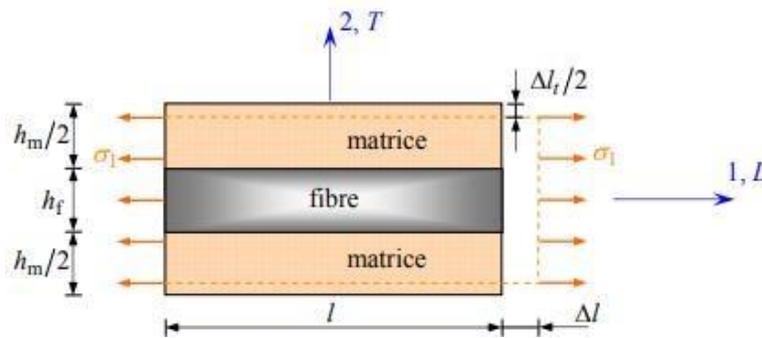


Figure 3-7 : Schéma par couches d'une traction longitudinale [5].

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

$$\begin{cases} \varepsilon_{2m} = -\nu_m \varepsilon_1 \\ \sigma \varepsilon_{2f} = -\nu_f \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3-45)$$

L'allongement transverse de la cellule élémentaire est :

$$\Delta l_t = -\nu_m \varepsilon_1 h_m - \nu_f \varepsilon_1 h_f \quad (3-46)$$

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_t}{h_f + h_m} = -[v_m(1 - V_f) + v_f V_f] \varepsilon_1 \quad (3-47)$$

D'où l'expression du coefficient de Poisson :

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) \quad (3-48)$$

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 (v_m , v_f) de la matrice et des fibres. On peut écrire aussi :

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) + \frac{V_f(1 - V_f)(V_f - v_m) \frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_f}}{\frac{V_f}{k_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{(1 - V_f)}{k_f}} \approx v_f V_f + (1 - V_f) \quad (3-49)$$

F. Module de cisaillement longitudinal

Le module de cisaillement longitudinal GLT est déterminé dans un essai de cisaillement longitudinal schématisé sur la figure (3.8) [5].

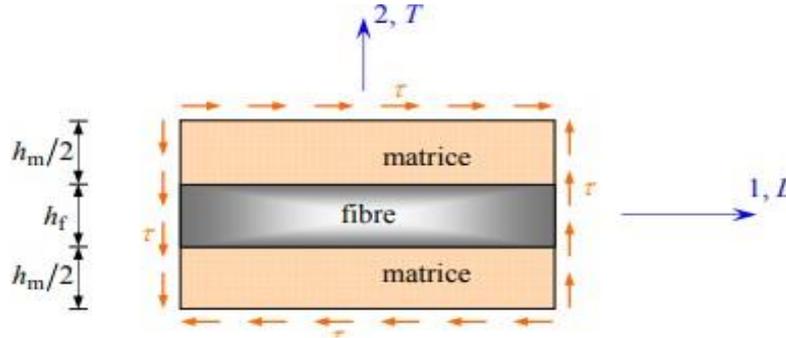


Figure 3-8 : Schéma par couches d'un essai de cisaillement longitudinal [5].

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

$$\begin{cases} \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \\ \gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \end{cases} \quad (3-50)$$

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

$$\begin{cases} \sigma_f = h_f \gamma_f \\ \sigma_m = h_m \gamma_m \end{cases} \quad (3-51)$$

La déformation totale de la cellule est :

$$\delta = \delta_f + \delta_m = h_f \gamma_f + h_m \gamma_m \quad (3-52)$$

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

$$\gamma = \frac{\sigma}{h_f + h_m} = (\gamma_f V_f) + \gamma_m (1 - V_f) \quad (3-53)$$

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

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{LT}} \quad (3-54)$$

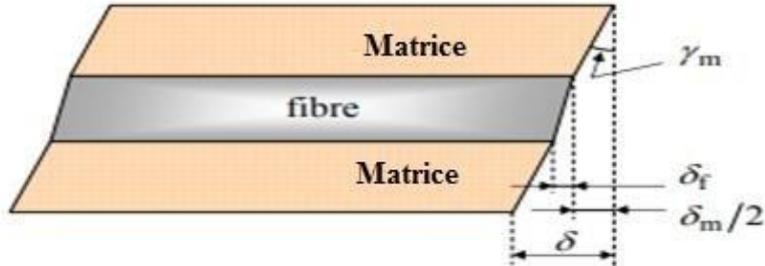


Figure 3-9 : Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre [5].

En combinant les expressions (3.50) à (3.54), nous obtenons :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{(1-V_f)}{G_m} \quad (3-55)$$

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

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f (1+V_f) + G_m (1-V_f)}{G_f (1-V_f) + G_m (1+V_f)} \quad (3-56)$$

G. Module de compression latéral

L'expression de module de compression latérale été établie par R. Hill [22] et Z. Hashin [24]. 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 :

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{K_f - K_m + \frac{(G_f - G_m)}{3}} + \frac{1 - V_f}{K_m + \frac{4}{3}G_m}} \quad (3-57)$$

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 [5].

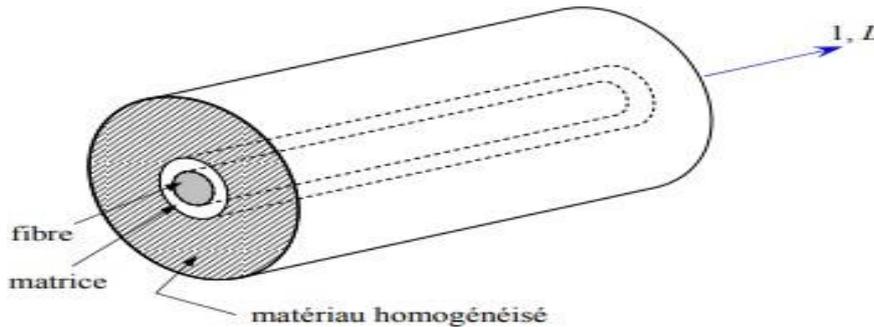


Figure 3-10 : Modèle cylindrique à trois phases [5].

La méthode utilisée pour lever les difficultés évoquées dans le paragraphe précédent consiste à considérer un modèle cylindrique à trois phases (Figure 3.10). 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 [24, 29], à partir des travaux effectués par J.J. Hermans [23]. Ce modèle conduit à l'expression du module transverse [5].

À l'aide de la fraction volumique des fibres, module de compressibilité (km), 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 :

$$G_{TT'} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{K_m + \frac{7}{3}G_m}{2K_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right) \quad (3-58)$$

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 [5].

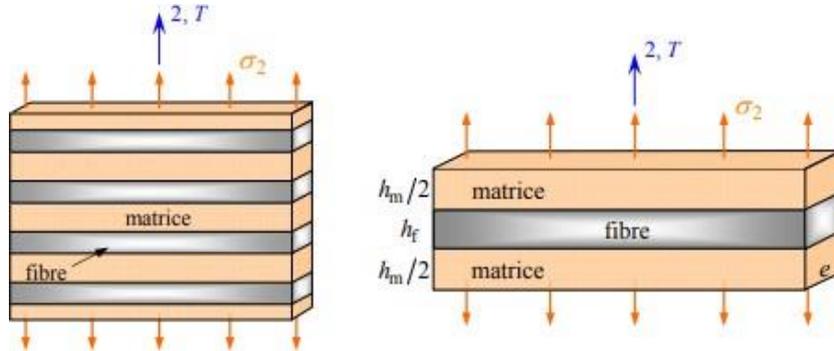


Figure 3-11 : Schématisation par couches d'un composite unidirectionnel [5].

La hauteur des couches doit simplement vérifier :

$$V_f = \frac{h_f}{h_f + h_m} \quad (3-59)$$

$$V_m = \frac{h_m}{h_f + h_m} \quad (3-60)$$

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

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_2$$

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

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \\ \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \end{cases} \quad (3-61)$$

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

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \quad (3-62)$$

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m} = \varepsilon_f \frac{h_f}{h_f + h_m} + \varepsilon_m \frac{h_m}{h_f + h_m} \quad (3-63)$$

Soit :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \quad (3-64)$$

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

$$\sigma_2 = E_T \varepsilon_2 \quad (3-65)$$

La combinaison de l'expression $\sigma_m = \sigma_f = \sigma_2$ à (3.65) conduit à l'expression du module transverse :

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \quad (3-66)$$

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 :

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_m}{E_f} - 1\right) V_f} \quad (3-67)$$

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 :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2\frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} \quad (3-68)$$

3.6 Mécanismes d'endommagement et de rupture

L'hétérogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement nombreux et complexes.

Ces endommagements peuvent apparaître très tôt dans la vie d'une structure et constituer des zones fortement préjudiciables à son intégrité.

On se propose à présent de mettre en évidence ces différents mécanismes élémentaires amenant la création de surfaces de décohésion au sein des composites stratifiés.

3.6.1 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 [5] :

- Rupture de la matrice ;
- Rupture des fibres ;
- 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 [5].

3.6.1.1 Rupture de la matrice

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (Figure 3.12) lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice [5].

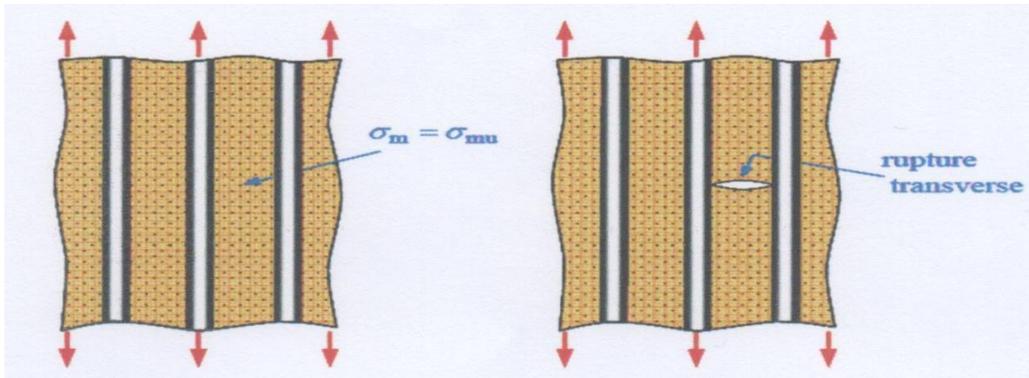


Figure 3-12 : Rupture transverse de la matrice [5]

Soit par fissuration longitudinale (Figure 3.13) lorsque la contrainte de cisaillement τ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture τ_{mu} [5].

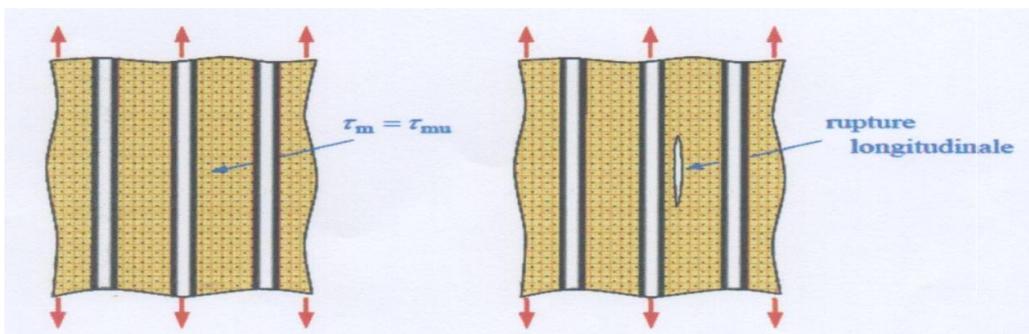


Figure 3-13 : Rupture longitudinal de la matrice [5]

3.6.1.2 Rupture des fibres

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de fibre (figure 3.14). Cela se produit en général lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture a lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement produit ne cesse de progresser à mesure que la contrainte est appliquée, et provoque ainsi la rupture de la matrice et autres fibres jusqu'à la rupture totale du matériau.

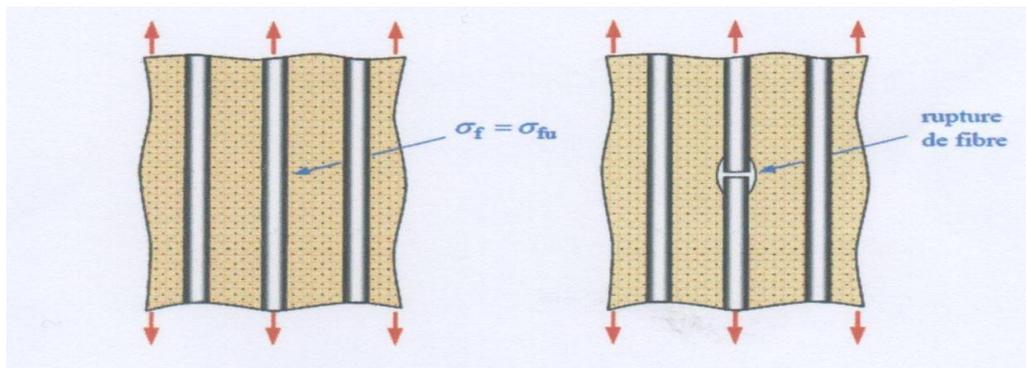


Figure 3-14 : Rupture de fibre [5]

La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée, des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc. La figure (3.15) montre les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

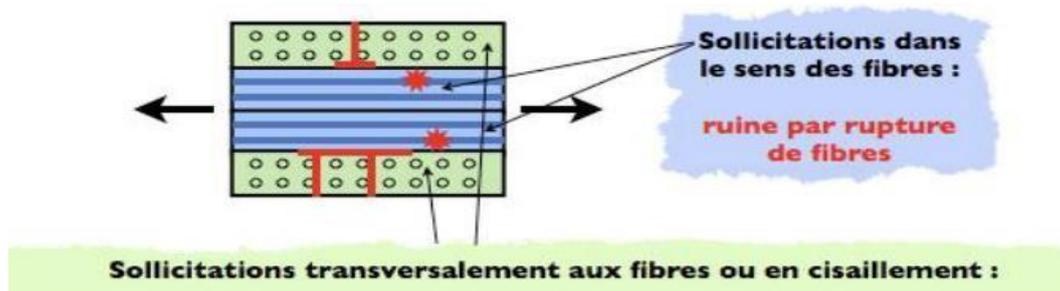


Figure 3-15 : Ruine par rupture de fibre [5]

3.6.1.3 Décohésion fibre-matrice

Pour les résines plastiques présentant une importante déformation à rupture, l'interface fibres-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 stratifiés unidirectionnels ou longitudinales dans le plan des plis dans le cas de composites tissés.

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:

- Si l'interface est forte, elle peut limiter voire stopper l'extension des fissures en assurant un transfert de charges 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)

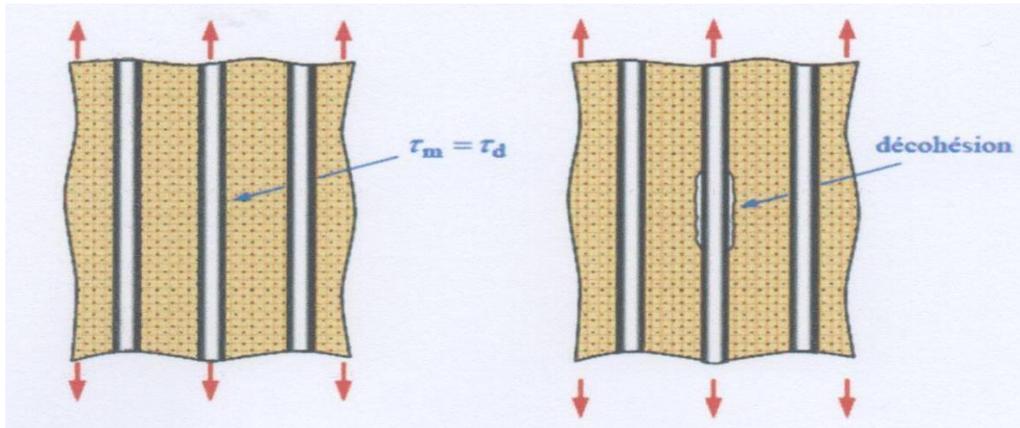


Figure 3-16 : Ruine par rupture de fibre [5]

3.6.1.4 Rupture des stratifiés (délaminage)

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par délaminage. Ce type d'endommagement dépend de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitations mécaniques imposées. Le délaminage qui apparaît après la phase d'endommagement intra laminaire, commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond une fissuration qui a tendance à séparer les plis ou couches de la composite.

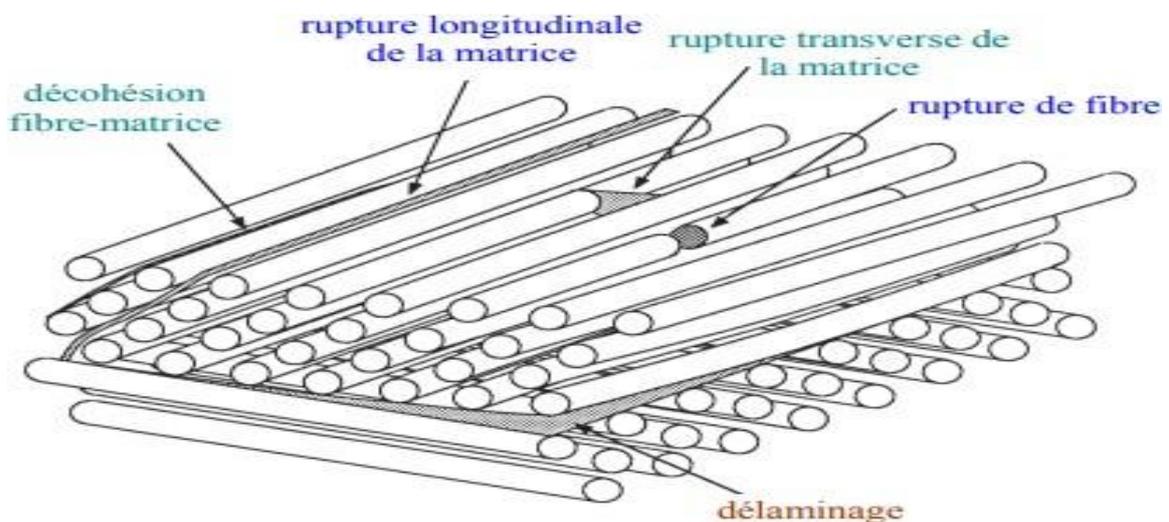


Figure 3-17 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [5]

3.6.2 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 [5].

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.

3.6.3 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.

3.6.3.1 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 [5].

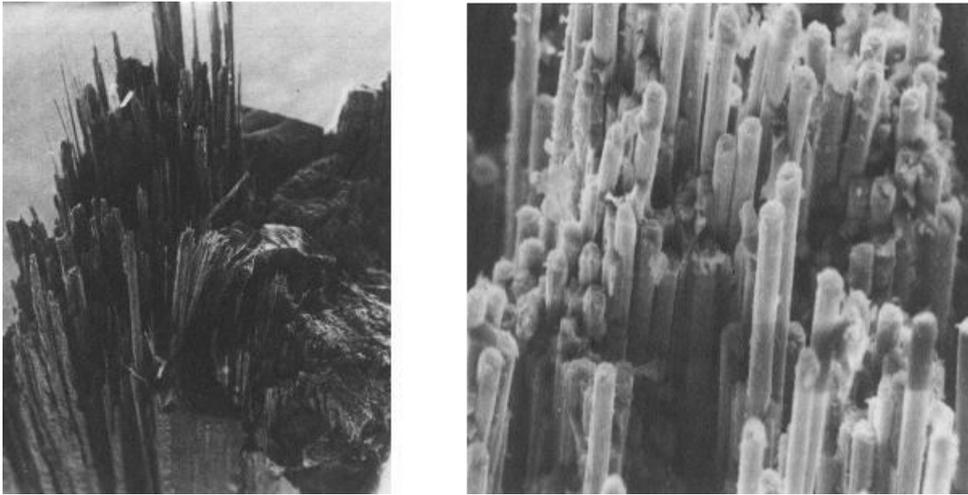


Figure 3-18 : Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone [5].

CHAPITRE 04 :

COMPORTEMENT

MECANIQUE EN

FLEXION TROIS (3)

POINTS STATIQUE

DU STRATIFIE

FIBRE DE

VERRE/POLYESTER

4.1 Introduction

Dans le monde industriel, les matériaux composites prennent une place prépondérante dont leur utilisations augmente continuellement dans les différents domaines aussi bien dans le transport (aéronautique, aérospatial, maritime, ferroviaire....) que dans le domaine des loisirs et de sport, car ils présentent des caractéristiques plus intéressantes : grande rigidité dans une direction donnée, simplicité d'élaboration, légèreté, bonne résistance a la fatigue et des gains de masse, donc ils permettent d'atteindre des performances que les matériaux classique ne peuvent fournir [1, 2].

Un nombre considérable de travaux visant d'une part le comportement mécanique et d'autre part le suivi et l'évolution des mécanismes de rupture et d'endommagement ont été réalisés.

Dans le but d'apporter notre contribution et vu la complexité et la diversité de ces matériaux liées à la technique de stratification, les modes de fabrications et les types de renforts utilisés, nous présentons dans ce chapitre le matériau considéré, sa mise en œuvre suivi de sa caractérisation sous sollicitation de flexion 3 pts, tout en observant le mécanisme d'endommagement.

Le chapitre est composé de deux parties :

- dans la première, on présente le matériau à étudier, le banc et le principe d'essai en flexion trois points statiques et les résultats obtenus.
- la deuxième partie est consacrée à l'étude des différents mécanismes d'endommagement par une observation macroscopique des faciès de rupture des éprouvettes testés.

4.2 Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans ce travail est un composite stratifié pré-imprégné composé de quatre couches de mat de fibre de verre (E) d'une masse surfacique de 300 g/m², et la matrice utilisée est une résine polyester.

Le matériau est fabriqué par moulage par compression de mat pré-imprégné SMC (Sheet Molding Compound). Il est constitué d'une matrice polyester chargée de particules du carbonate de calcium CaCO₃ et renforcé par le mat de fibre de verre, en forme de plaque de (300x300) mm avec une épaisseur de 2,5 mm.

4.3 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes parallélépipédiques ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté. Leurs dimensions, selon la norme AFNOR NFT 57-105, sont : $l = 60$ mm; $b = 15$ mm et $h = 2,5$ mm ; ou L , b , et h sont respectivement la longueur totale, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette (figure 4.1 et 4.2).

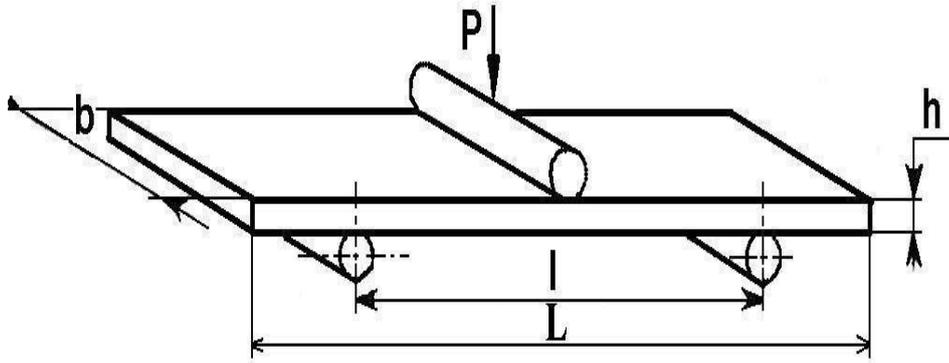


Figure 4-1 : Forme et dimensions des éprouvettes d'essai en flexion 3 points statique

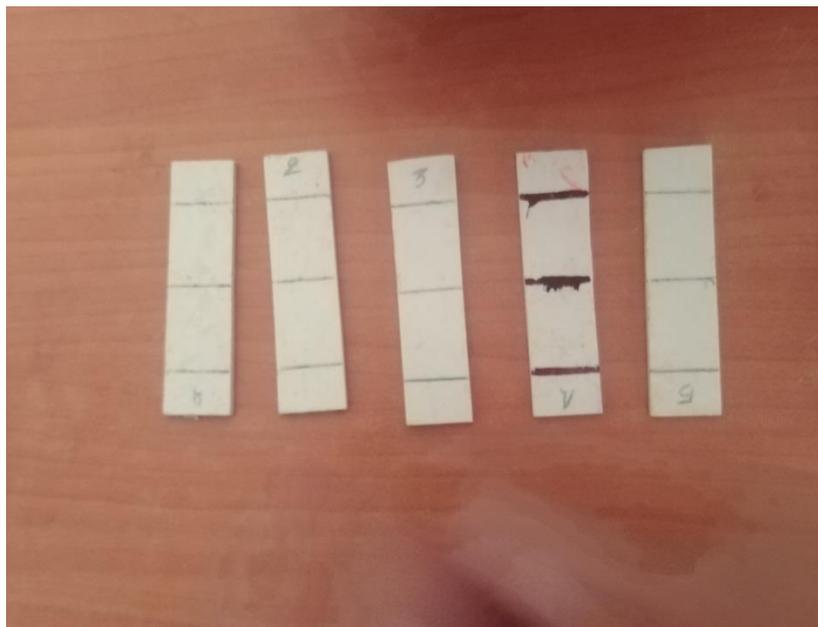


Figure 4-2 : Les éprouvettes d'essai du matériau étudié

4.4 Bancs et principe de l'essai de flexion 3 points

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort au milieu de l'éprouvette (cas de flexion 3 points).

On impose à une éprouvette normalisée soit une déformation ; ou flèche, à une vitesse de déformation constante ($v = 5 \text{ mm/s}$); et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation, soit on impose une charge pour arriver à définir la flèche correspondante.

Dans notre cas, les essais de flexion 3 points sont réalisés sur une machine d'essais « Zwick/roell » Z20 de capacité de 20 KN, pilotée par ordinateur (figure 4.3).



Figure 4-3 : Machine d'essai Zwick/Roell Z20

La figure (4.4) représente le principe de l'essai, l'éprouvette est posée sur deux appuis cylindriques de cinq millimètres de rayon (panne inférieures), la charge est appliquée au milieu de l'éprouvette à l'aide de la panne supérieure. Selon la norme AFNOR NF T 57-105 la distance entre appuis $l = 40 \text{ mm}$.



Figure 4-4 : Principe d'essai de flexion 3 points

4.5 Essais statiques

Cinq éprouvettes sont testées pour notre type de matériau. Leurs courbes de comportement mécanique charge-déplacement ainsi que la courbe moyenne obtenues en flexion 3 points statique sont représentées sur les figures (4-5) et (4-6)

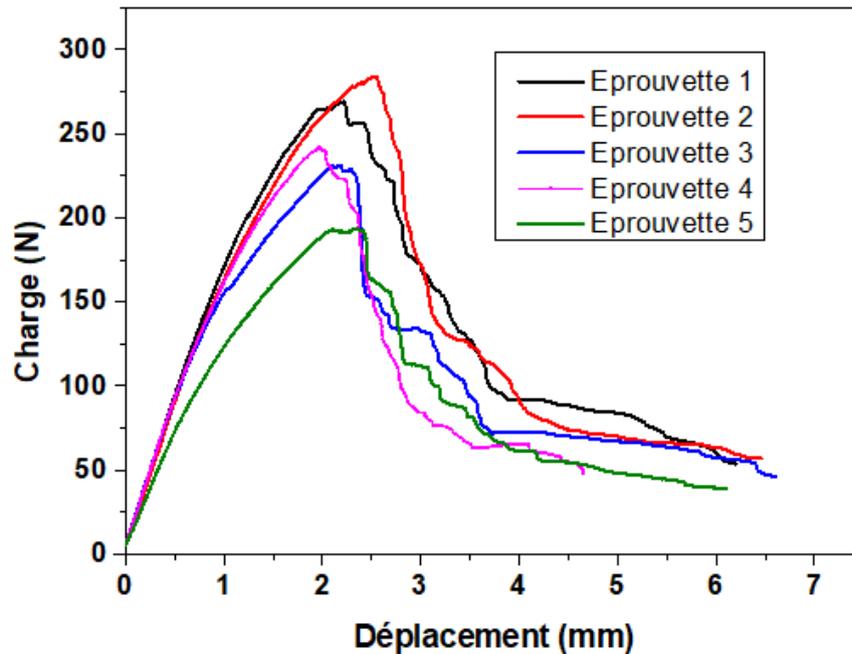


Figure 4-5 : Courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique pour le stratifié

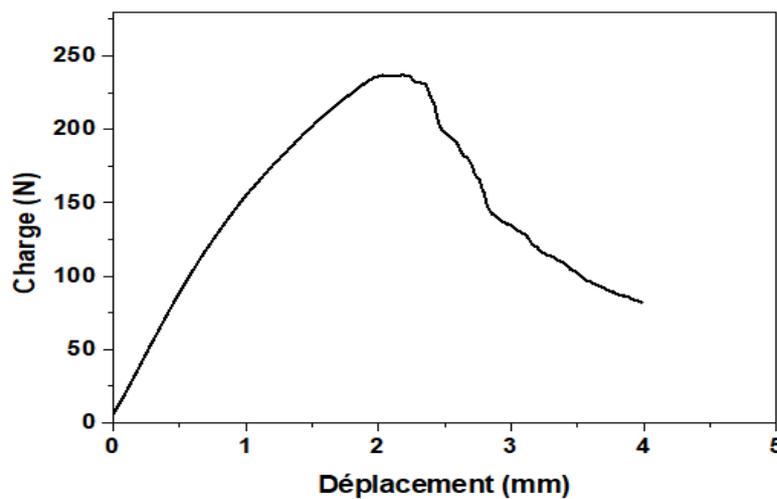


Figure 4-6 : Courbe moyenne de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique pour le stratifié

➤ **Interprétation et discussions des résultats**

Le comportement (effort - déplacement) des éprouvettes lors de la flexion statique (chargements monotones) est représenté par des courbes ayant la même allure et composées de trois phases principales : évolution proportionnelle linéaire de la charge en fonction du déplacement, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale. Finalement on assiste à une diminution de cette dernière jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La rupture finale n'est obtenue qu'après une baisse soudaine de la charge en raison de la coalescence des macros fissures qui conduisent directement à la ruine des éprouvettes.

➤ **Calcul de la contrainte à la rupture et le module d'élasticité en flexion 3 points statiques**

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion 3-points statiques est basé sur la relation (4.1) pour les contraintes à la rupture en flexion σ_f et par l'utilisation de la relation (4.2) pour la détermination de la valeur du module d'élasticité en flexion E_f .

l : longueur entre appui [mm] ;

$$\sigma_f = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \quad (4-1)$$

$$E_f = \frac{l^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (4-2)$$

Où :

σ_f : contrainte à la rupture ;

F_{max} : charge maximale à la rupture ;

E_f : module de Young en flexion ;

ΔF : variation de la force sur la partie rectiligne de la courbe charge – déplacement

$\Delta \delta$: variation de la flèche en [mm], correspondante à la variation de la force.

l : longueur entre appui.

b : largeur de l'éprouvette [mm] ;

h : épaisseur de l'éprouvette [mm] ;

- **Calcul de la contrainte à la rupture σ_f**

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (4-1) :

Tableau 4-1 : Calcul de la contrainte à la rupture (MPa)

Éprouvettes	Charge maximale à la rupture F_{max} (N)	Contrainte à la rupture calculée (MPa)	Contrainte à la rupture moyenne (MPa)
Éprouvette 1	268.89	172.09	156.11
Éprouvette 2	283.99	181.75	
Éprouvette 3	231.07	147.88	
Éprouvette 4	241.95	154.84	
Éprouvette 5	193.75	124.00	

- **modules d'élasticités en flexion 3 points**

Pour calculer le module d'élasticité expérimentalement nous avons choisis deux points sur la partie linéaire (élastique) de notre courbe charge – déplacement (figure 4-7) et on a calculé ΔF qui est la variation de la force F ainsi que $\Delta \delta$ correspondante.

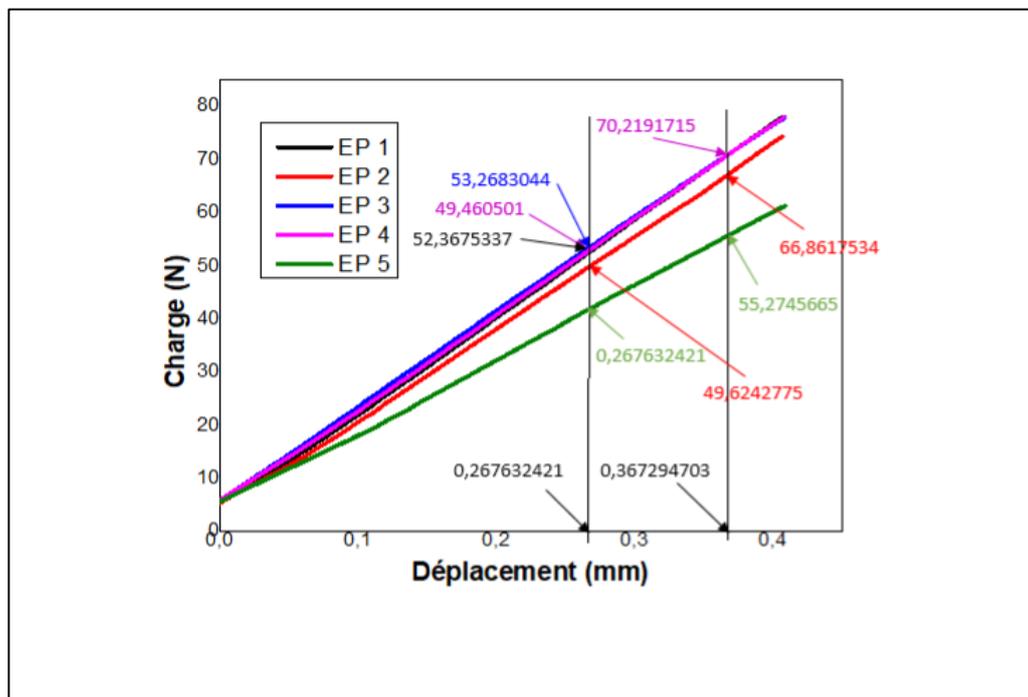


Figure 4-7 : Calcul du module d'élasticité en flexion

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (4-2)

Tableau 4-2 : Module d'élasticité en flexion 3 points

Eprouvettes	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	F_1 (N)	F_2 (N)	$\Delta F / \Delta \delta$ (N/mm)	E_f (MPa)	E_f (moy) (MPa)
1	0,267632421	0,3672947	52,3675337	70,2191715	179,121303	12228,0143	11840,9808
2	0,267632421	0,3672947	49,6242775	66,8617534	172,958872	11807,3257	
3	0,267632421	0,3672947	53,2683044	70,2191715	170,083072	11611,0044	
4	0,267632421	0,3672947	49,460501	70,2191715	208,290138	14219,2734	
5	0,267632421	0,3672947	41,6401734	55,2745665	136,805949	9339,28614	
1	0,267632421	0,3672947	52,3675337	70,2191715	179,121303	12228,0143	

4.6 Endommagement de l'éprouvettes testées sous sollicitations statiques

L'observation réalisée, par microscope optique du faciès endommagé (figure 4-8), sur l'éprouvettes 1 et l'éprouvette 3 du matériau a permis de distinguer les types d'endommagements suivants :



Figure 4-8 : Microscope optique

- Délaminage du stratifié.
- Ruptures transversales et longitudinales de la matrice.
- Des ruptures des fibres.

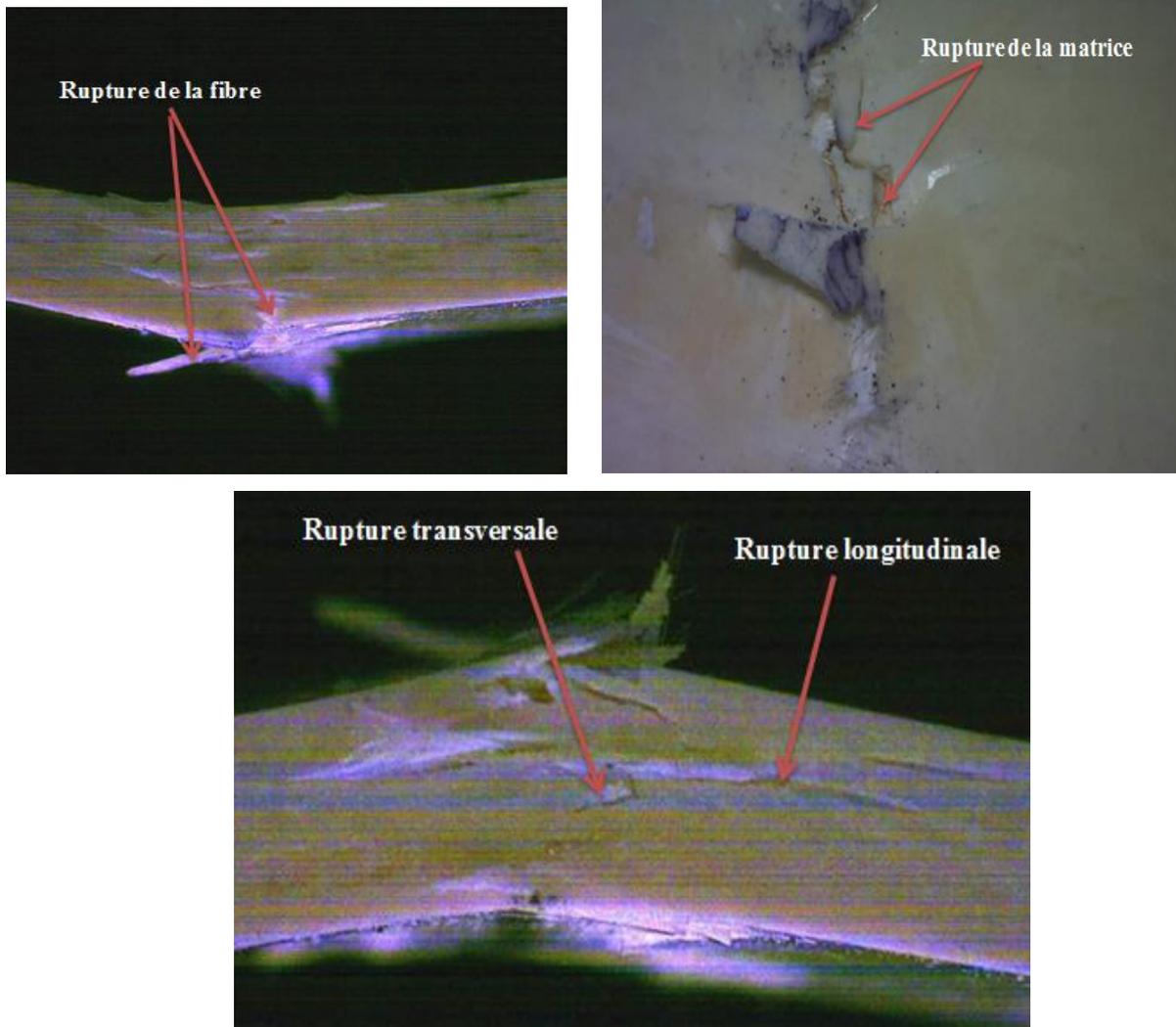


Figure 4-9 : Observation microscopique des faciès endommagés de l'éprouvette N° 01

Ces observations montrent que les éprouvettes soumises en flexion trois points ont subi une rupture totale de toute la structure, elles montrent aussi que l'amorce de la fissure a lieu tout d'abord à la surface tendue de l'éprouvette. Ensuite on constate qu'il y a propagation de la fissure vers l'axe de l'éprouvette.

Des ruptures transversales et longitudinales de la matrice et de la fibre sont aussi observées.

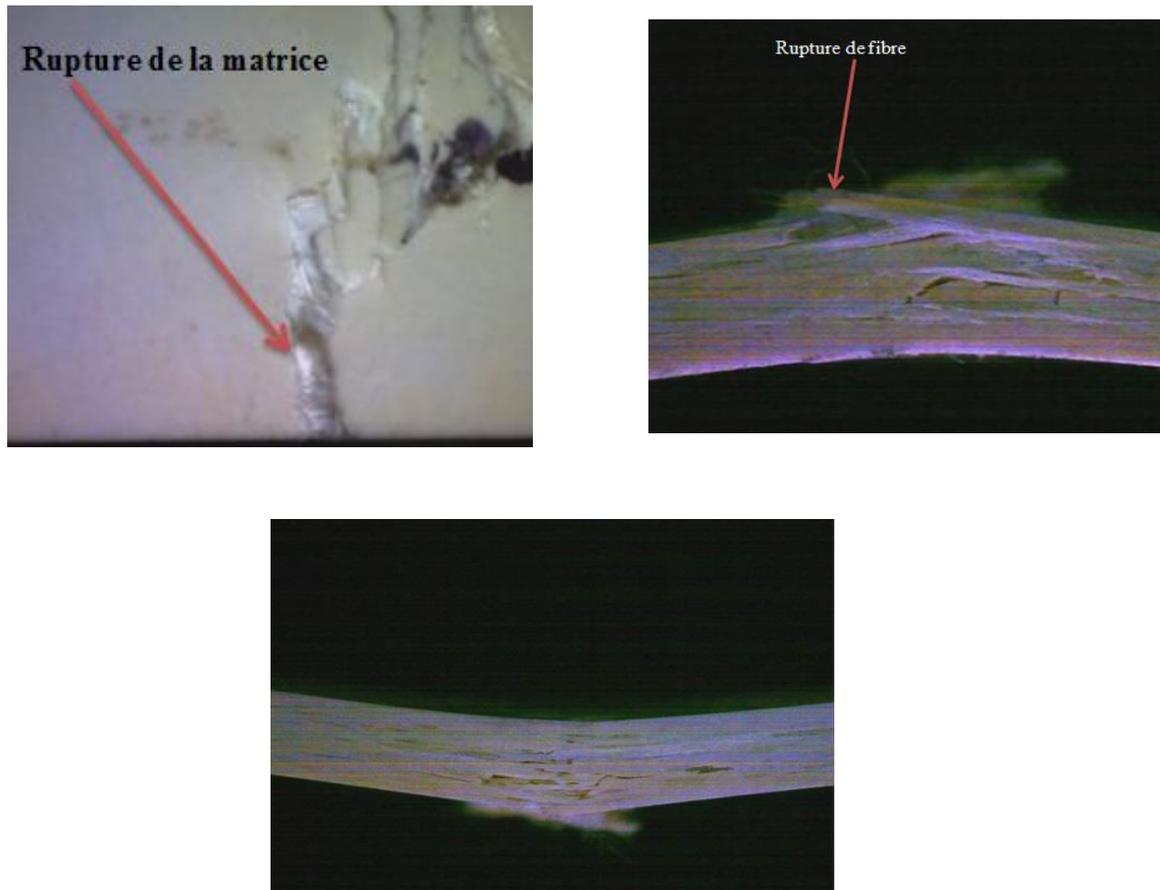


Figure 4-10 : Observation microscopique des faciès endommagés de l'éprouvette N° 03

4.7 Conclusion

L'étude statique nous a permis d'une part, de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau (contrainte maximale à la rupture et module d'élasticité en flexion) et d'autre part, de mettre en évidence la nature de leur endommagement (fissures de la matrice, rupture du fibre et délaminage).

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

- Rupture longitudinales et transversales des fibres de verre;
- Fissuration de la matrice (résine polyester) ;
- Délaminage entre les plis.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre travail consiste en l'étude d'un matériau composite stratifié pré-imprégné composé de quatre couches de mat de fibre de verre (E) et une résine polyester chargée de particules du carbonate de calcium CaCO_3 . A cet effet, après l'élaboration du matériau au laboratoire et sa découpé en éprouvettes selon la norme AFNOR NFT 57-105, nous avons réalisé des essais de flexion 3 points statique destinées à l'étude des caractéristiques mécaniques du matériau.

Cette étude expérimentale nous a permis d'une part, de tracer les courbes charge/déplacement pour cinq éprouvettes. Ces courbes obtenues ont la même allure et se composent de trois phases principales : évolution proportionnelle linéaire de la charge en fonction du déplacement, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale. Finalement on assiste à une diminution de cette dernière jusqu'à la rupture de l'éprouvette et d'autre part, de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau (contrainte maximale à la rupture et module d'élasticité en flexion).

Enfin, l'observation des faciès de rupture, a mis en évidence la nature de leur endommagement et qui a fait ressortir un délaminage des plis avec rupture des fibres et fissuration accompagnée de rupture de la matrice.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [01] J.M. Berthelot, « Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures », 3eme édition, TEC et DOC, Paris, France, 1999.
- [02] D. Gay, « Matériaux composites », 5e édition révisée, Lavoisier, Paris. France, 2005.
- [03] D. Trichet, « Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites », Thèse de doctorat, école doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes, 2000.
- [04] Abderrezak GHARBI « Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézoélectriques » thèse de magister Université Mentouri- Constantine 2005.
- [05] Jean-Marie. Berthelot, matériaux composites « comportement mécaniques et analyse des structures », édition TEC et DOC, 5ème édition 2012.
- [06] Laurant Gornet « Généralités sur les Matériaux composites » école Centre de Nantes_2011 HAL, cel-00470296.
- [07] « GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES », centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006.
- [08] J. LUYCKX, "Fibres de carbone," Techniques de l'Ingénieur, vol. A2210.
- [09] Université-paris saclay « les grandes familles de matériaux composite Lionel GENDRE édité le 04/05/2011.
- [10] Mr MENAIL YOUNES Cours Matériaux composite.
- [11] F. Laurin introduction générale sur les matériaux composites ONERA.
- [12] Wikipédia
- [13] R. ZENASENI « influence du vieillissement hygrothermique sur le comportement à la rupture des composites à matrice thermoplastique. Thèse de doctorat, université des sciences et technologie Oran.
- [14] Boubeker, R., Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites, 2016, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [15] Molimard, J., Mécanique des Matériaux composites. EMsE Version, 2004.

- [16] Kollar, L.P. and G.S. Springer, *Mechanics of composite structures* 2003: Cambridge university press.
- [17] Berthelot J. M, «Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures », 4^{ème} édition, 2010.
- [18] Christensen R.M. (1979). *Mechanics of composite materials*. John Wiley & Sons, New York.
- [19] Hashin Z. (1965). On elastic behaviour of fibre reinforced materials of arbitrary transverse plane geometry. *J. Mech. Phys. Solids*, 13: 199.
- [20] Hill R. (1964). Theory of mechanical properties of fiber-strengthened materials: I. Elastic behavior. *J. Mech. Phys. Solids*, 12: 199.
- [21] Hashin Z., Rosen B.W. (1964). The elastic moduli of fiber-reinforced materials. *J. Appl. Mech.* (Juin): 223-232.
- [22] Hashin Z. (1966). Viscoelastic fiber-reinforced materials. *AIAA J.*, 4:1411.
- [23] Hermans J.J. (1967). The elastic properties of fiber reinforced materials when the fibers are aligned. *Proc. K. Ned. Akad. Wet.*, B70 :1.
- [24] Bourouis Fairouz. *Etude Du Comportement Mécanique De Structures Sandwiches à Différents Matériaux De Revêtements /2009/ Mémoire.*