

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : GENIE MECANIQUE

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : CONSTRUCTION MECANIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**ETUDE D'UN COMPOSITE UNIDIRECTIONNEL VERRE-
POLYESTER A USAGE MARIN**

Présenté par : *RAMDANI MOHAMED ALI*

Encadrant : *MENAIL YOUNES*

MCA

U.B.M. Annaba

Jury de Soutenance :

BEY KAMEL	PROF	U.B.M. Annaba	Président
MENAIL YOUNES	MCA	U.B.M. Annaba	Encadrant
BENAMIRA MOHAMED	MCB	U.B.M. Annaba	Examineur
BOUARICHA AMOR	MCB	U.B.M. Annaba	Deuxième examinateur / Membre invité

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existence. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les choses.

Je tiens tout d'abord à examiner mes remerciements les plus sincères à notre encadreur MR MENAIL YOUNES, pour ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.

A tous les enseignants de l'université d'ANNABA en particulier ceux du département Mécanique pour la formation qu'ils m'ont offert et leurs orientations.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

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

Toute ma famille,

*Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants
et mes camarades,*

.

Ramdani Mohamed Ali

ملخص

المواد المركبة هي مواد ذات أداء ميكانيكي عالٍ ، والتي يمكن تشكيلها حسب رغبة المصمم وبالتالي تتمتع بإمكانيات غير محدودة. يتم تطوير هذه المواد اليوم في جميع المجالات تقريبًا وهي مصدر تحديات هائلة في مختلف مشاريع التكنولوجيا الفائقة. درسنا أربع عينات من الألياف الزجاجية أحادية الاتجاه لاختبار الشد. تم إجراء اختبارات الشد على آلة الشد ZO50 حيث تمت معالجة النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة Excel. وأن نتائج الشد تظهر تشابهًا بين المنحنيات المختلفة لكل عينة.

Résumé

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité. Ces matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie.

Nous avons étudié quatre éprouvettes d'une fibre de verre unidirectionnel pour l'essai de traction. Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction ZO50 ou les résultats obtenus ont été traité par Excel. Et que les résultats de traction montrent une similitude entre les différentes courbes de chaque éprouvette.

Abstract

Composite materials are materials with high mechanical performance, which can be shaped at will by the designer and therefore endowed with unlimited potential. These materials are being developed today in practically all fields and are the source of formidable challenges in various high-tech projects. We studied four specimens of a unidirectional fiberglass for the tensile test. The tensile tests were carried out on a ZO50 tensile machine where the results obtained were processed by Excel. And that the tensile results show a similarity between the different curves of each specimen.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I

ETUDE THEORIQUE

I. Généralités.....	1
I.1. Historique.....	1
I.2. Définition.....	1
I.2.1. Les grandes Classes des matériaux composites.....	1
I.3. La composition d'un matériau composite.....	2
I.3.1. Les résines.....	3
I.3.1.1. Les divers types de résines.....	4
a. Résines thermodurcissables <i>TD</i>	4
b. Résines thermoplastiques <i>TP</i>	7
c. Résines thermostables <i>TS</i>	8
I.3.2. Les fibres et les tissus.....	9
I.3.2.1. Les divers types de fibres.....	10
a. La fibre de verre.....	10
b. La fibre de carbone.....	11
c. La fibre aramide.....	12
d. La fibre céramique.....	12
e. La fibre synthétique thermostable.....	13
I.4. Les charges et les additifs.....	13
a. Les additifs.....	13
b. Les solvants.....	14
c. Les charges.....	14
d. Les pigments.....	14

Chapitre II

MISE EN FORME

II. Introduction.....	15
II.1. Moulage au contact.....	15
II.2. Moulage par projection simultanée.....	16
II.3. Moulage sous vide.....	17
II.4. Moulage par compression.....	17
II.4.1. L'infusion de résine sous membrane souple.....	17
II.4.1.1. Moulage par compression à froid.....	17
II.4.1.2. Moulage par compression à chaud.....	18
II.4.2. Moulage par projection de résine.....	19
II.5. Moulage par enroulement filamentaire.....	19
II.5.1. Enroulement circonférentiel.....	20
II.5.2. Enroulement hélicoïdal.....	20
a. Enroulement discontinu.....	20
b. Enroulement continu.....	21
II.5.3. Enroulement polaire.....	21
II.5.4. Mandrins.....	22
II.5.5. Applications de l'enroulement filamentaire.....	22
II.6. Moulage par centrifugation.....	23
II.7. Structure des matériaux composites.....	24
II.7.1. Les monocouches.....	24
II.7.2. Les stratifié.....	25
II.7.3. Sandwich.....	26
II.8. Les domaines d'utilisations.....	28

Chapitre III

MATERIEL ET METHODES

III.1. Machine de traction.....	29
III.1.1. Essai de traction.....	29
III.1.2. La machine de traction ZO50.....	29
III.1.3. Interprétation du diagramme efforts-allongements $F=f(\Delta L)$	30
III.1.4. Principales caractéristiques mécaniques d'un matériau.....	32
III.2. Fibre de verre unidirectionnel UN.....	35
III.3. Résine époxy.....	35
III.4. Réalisation des éprouvettes.....	36
III.5. Normes utilisées.....	36
III.6. Protocole expérimental.....	37
III.6.1. L'installation des éprouvettes sur la machine de traction ZO50.....	37
III.6.2. Les résultats d'essai de traction pour éprouvettes fibre de verre unidirectionnel/résine époxy.....	39
III.6.3. Les résultats expérimentaux obtenus.....	39
III.6.4. La comparaison entre fibre de verre unidirectionnelle et sergé.....	41

Chapitre IV

Etude microscopique des facies des endommagements

IV.1. Différents endommagements des matériaux composites.....	44
IV.1.1. Rupture de matrice.....	46
IV.1.2. Décohésion.....	46
IV.1.3. Délaminage.....	47
IV.1.4. Rupture de fibre.....	47

Chapitre V

Hygiène et sécurité du travail

IV. Hygiène et sécurité du travail	48
IV.1. Hygiène.....	48
IV.2. Sécurité.....	48
IV.2.1. Machines dangereuse (machine de traction).....	49
IV.2.2. Produits chimiques.....	49
IV.2.3. Le risque d'incendie.....	49
IV.2.4. Le risque d'exposition aux vapeurs toxiques, aux poussières de résine et de fibre de verre.....	49
IV.2.5. Effets et impacts des COV.....	49
IV.2.6. Les instructions relatives à la manipulation sécurisée de ces systèmes et de comprendre les propriétés chimiques.....	50
IV.2.7. Les situations de contact possibles avec la résine époxy.....	50
IV.3. Consignes de sécurité.....	51
IV.3.1. Consignes de sécurité pour le risque d'incendie.....	51
IV.3.2. Consignes de sécurité pour le risque d'exposition aux vapeurs toxiques, aux poussières de résine et fibre de verre.....	51
IV.4. Equipements de sécurité.....	51
IV.3. Vérification des équipements et matériels.....	54
IV.5. Respect des consignes de sécurité	54
CONCLUSION GENERALE	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure 1.1 :	Représentation schématique d'un matériau composite.....	2
Figure 1.2 :	Composition d'un matériau composite.....	3
Figure 1.3 :	Classification de différentes familles de matrice.	3
Figure 1.4 :	Carte des caractéristiques des résines thermodurcissables.....	4
Figure 1.5 :	Carte des caractéristiques des résines thermoplastiques.....	7
Figure 1.6 :	Différents formes de fibres.....	9
Figure 1.7 :	Classification de différentes familles de renforts.....	10
Figure 1.8 :	Différents types de fibre de verre.....	11
Figure 1.9 :	Fibre de carbone.....	12
Figure 1.10 :	Fibre aramide.....	12

Chapitre II

Figure 2.1 :	Principe du moulage au contact.....	15
Figure 2.2 :	Principe du moulage par projection simultanée.....	16
Figure 2.3 :	Moulage sous vide.....	17
Figure 2.4 :	Principe du moulage par compression à froid.....	18
Figure 2.5 :	Principe du moulage par compression à chaud.....	19
Figure 2.6 :	Moulage par injection de résine.....	19
Figure 2.7 :	Principe de l'enroulement circonférentiel.....	20
Figure 2.8 :	Enroulement hélicoïdal discontinu.....	21
Figure 2.9 :	Enroulement hélicoïdal continu.....	21
Figure 2.10 :	Enroulement polaire.....	22
Figure 2.11 :	Moulage par centrifugation.....	23
Figure 2.12 :	Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	24

Figure 2.13 :	Composite Monocouches.....	25
Figure 2.14 :	Composite stratifié.....	25
Figure 2.15 :	Convention de signe pour la désignation des stratifiés.....	25
Figure 2.16 :	Composite sandwichs.....	26
Figure 2.17 :	Composite sandwichs : a) Ame en nid d'abeille, b) Ame plein (mousse,résine) c)Ame ondulé.....	26
Figure 2.18 :	les différent types de sandwich : a) Fibre de verre nid d'abeille, b) Fibre de carbone nid d'abeille, c) Fibre de verre mousse polyuréthane, d) Fibre de verre mousse PVC.....	27

Chapitre III

Figure 3.1 :	La machine de traction ZO50.....	30
Figure 3.2 :	Allure du diagramme efforts-allongements d'un acier doux.....	30
Figure 3.3 :	déformation d'une éprouvette.....	32
Figure 3.4 :	Allures du diagramme efforts-allongements.....	33
Figure 3.5 :	fibre de verre unidirectionnelle UD.....	35
Figure 3.6 :	Le produit résine époxy.....	35
Figure 3.7 :	Eprouvettes de type Fibre de verre unidirectionnel des angles 0°-90°-90°-0°.....	36
Figure 3.8 :	Les éprouvettes avant et après l'essai de traction.....	38
Figure 3.9 :	Courbes contrainte allongement des éprouvettes N°44, N°45, N°47, N°416.....	39
Figure 3.10 :	Histogramme représente la différence de la résistance élastique du matériau $R_{p0,2}$ et de la résistance à la rupture R_r pour chaque type d'éprouvette.....	40
Figure 3.11 :	Histogramme représente la différence de module de Young pour chaque type d'éprouvette.....	40
Figure 3.12 :	L'éprouvette fibre de verre sergé (N°300) avant et après l'essai de traction.....	41
Figure 3.13 :	Courbes contrainte allongement des éprouvettes fibres de verre : unidirectionnelle (N°45) et sergé (N°300).....	42

Figure 3.14 :	Histogramme représente la différence de la résistance élastique du matériau $R_{p0,2}$ et de la résistance à la rupture R_r entre les éprouvettes de fibre de verre unidirectionnelle N°45 et fibre de verre sergé N°300.....	42
Figure 3.15 :	Histogramme représente la différence de module de Young entre les éprouvettes de fibre de verre : unidirectionnel N°45 et sergé N°300.....	43

Chapitre IV

Figure 4.1 :	Coupage linéaire CL et coupage tangentiel de l'éprouvette N°416.....	44
Figure 4.2 :	Microscope électronique à balayage (MEB).....	45
Figure 4.3 :	Observation des faciès de rupture de matrice.....	46
Figure 4.4 :	Observation des faciès de décohésion des fibres.....	46
Figure 4.5 :	Observation des faciès de délaminage entre des fibres.....	47
Figure 4.6 :	Observation des faciès de rupture de fibre.....	47

Chapitre V

Figure 5.1 :	Hygiène avant et après le travail.....	48
--------------	--	----

LISTTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau 1.1 :	Les avantages et les inconvénients des résines polyester	5
Tableau 1.2 :	Les avantages et les inconvénients des résines époxydes.....	6
Tableau 1.3 :	Influencent et améliorent des charges.....	13

Chapitre III

Tableau 3.1 :	Les dimensions da chaque éprouvette de fibre de verre unidirectionnel....	36
Tableau 3.2 :	Norme d’essai de traction pour la fibre de verre unidirectionnel.....	36
Tableau 3.3 :	Résultats expérimentaux obtenus.....	39
Tableau 3.4 :	Les dimensions de fibre de verre sergé N°300.....	41
Tableau 3.5 :	Résultats expérimentaux obtenus de fibre de verre sergé N°300.....	41

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité. Ces matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ils sont devenus indispensables pour la construction dans plusieurs domaines comme l'aérospatiale, la construction navale, l'automobile, etc.... Comme leur nom l'indique, ils sont composés de plusieurs constituants qui se présentent principalement en deux phases : la matrice et le renfort. Par ailleurs, les matériaux composites, peuvent être choisis et utilisés en fonction d'impératifs techniques et économiques à satisfaire en agissant principalement sur la nature , la proportion, et la composition des constituants, et également sur le mode d'élaboration.

Les ingénieurs recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion : une combinaison de propriétés assez exceptionnelle. Les matériaux résistants sont souvent relativement denses et une augmentation de la résistance et de la rigidité fait généralement diminuer la résilience. Dans ce cas il est absolument nécessaire, avant de lancer un matériau pour une utilisation dans un domaine donné, de faire une étude (des essais) sur ce matériau.

Dans ce contexte que nous proposons l'étude de la résistance à l'essai de traction d'un composite unidirectionnel verre-résine époxy Par utiliser quatre éprouvettes de cette matériau.

Pour mener à bien cette étude, nous avons départagé notre travail en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est « Etude théorique » comporte des définitions sur les matériaux composites, la composition de matériaux.
- Le deuxième chapitre intitulé « Mise en forme » présente les techniques de fabrication d'un matériau composite par exemple moulage au contact, moulage par projection simultanée.....etc.

- Le protocole expérimental utilisé pour les quatre éprouvettes d'une fibre de verre unidirectionnel – résine époxy dans l'essai de traction et faire comparaison entre de l'essai de traction de fibre de verre unidirectionnel –résine époxy et fibre de verre sergé les résultats sont détaillé dans le chapitre trois qui est « matériel et méthodes ».
- Le quatrième chapitre « étude microscopique des facies des endommagements » présent les résultats de l'observation microscopie électronique de matériau composite.
- le dernier chapitre est « Hygiène et sécurité du travail », ou nous présentons les précautions d'hygiène et de sécurité pendant le travail.
- Une conclusion générale est tirée dans le but d'accentuer nos résultats et nous terminons notre travail par des perspectives.

Premier Chapitre

ETUDE THEORIQUE

Chapitre I

ETUDE THEORIQUE

I. Généralités

L'objectif de ce chapitre est de présenter une description de matériau composite, et des différents constituants entrant dans la mise en forme de matériau composite en les regroupant par catégories : la matrice (résine) et le renfort (fibre), et on présente les principales caractéristiques de ces constituants.

I.1. Historique

Le bois fut historiquement le premier matériau naturel composite connu, on trouvera parmi les paramètres composites fabriqués par l'homme les arcs mongols (2000 ans av. J.-C). leur âme en bois était contrecollé de tendon au dos et de corne sur sa face interne, puis le torchis utilisé pour la construction pour ses propriétés d'isolation et son coût [1].

I.2. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [2].

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

- Leur résistance : le matériau peut notamment supporter de nombreux chocs et pressions externes grâce au renfort,
- Leur faible volume : la masse est plus compacte et donc moins volumineuse, ce qui entraîne un allègement parfois considérable du produit final,
- Leur durée de vie : du fait de leur résistance, le matériau est durable et ne s'abîme pas ou peu avec le temps.

I.2.1. Les grandes Classes des matériaux composites

On distingue, généralement, deux grandes familles :

a. Les composites de grande diffusion (GD)

Est l'association renfort fibre de verre (les métaux) résine polyester. Ces composites apportent des propriétés mécaniques intéressantes et ils sont peu coûteux, occupent une large part de marché,

b. Les composites hautes performances (HP)

Dont les caractéristiques mécaniques spécifiques sont supérieures à celles utilisées dans les composites (GD), généralement on utilise comme renforts les fibres de carbone ou d'aramide (kevlar) avec des résines époxydes. Les coûts de ces matériaux sont élevés.

I.3. La composition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué d'un renfort (des fibres et des tissus) et d'une matrice (aussi appelé résine) (Fig.1.1), L'importante diversité de renfort et de matrice permet de façonner les matériaux composites en fonction du besoin exprimé. L'amélioration des caractéristiques physicomécaniques de ces matériaux constitue une des clés de leur développement industriel [3].

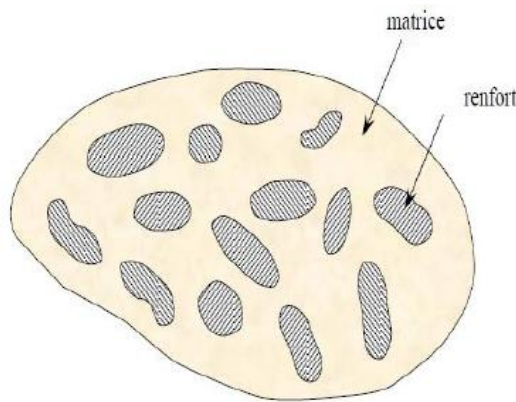


Figure 1.1: Représentation schématique d'un matériau composite.

Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple le Béton, le contreplaqué.....), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure suivante:

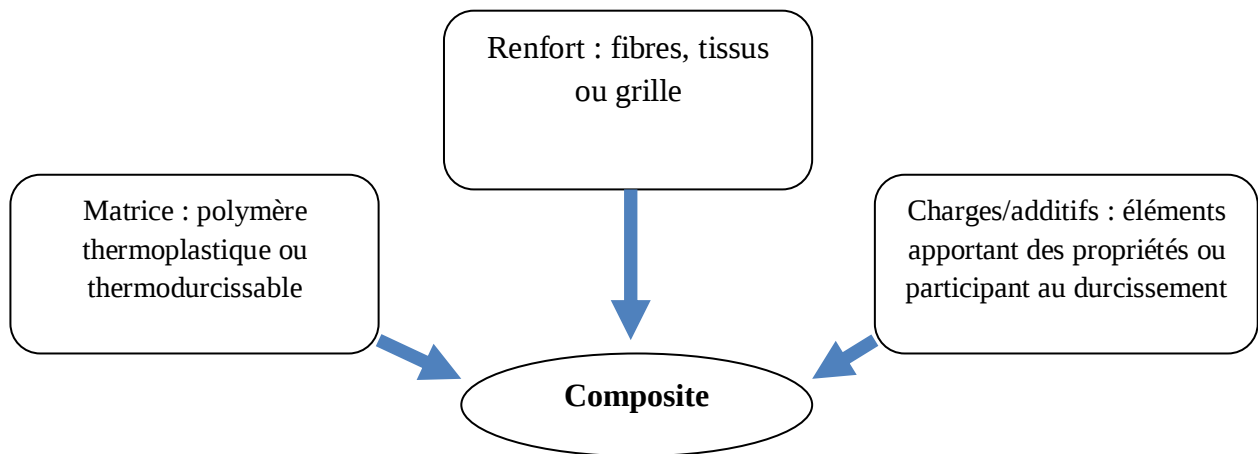


Figure 1.2 : Composition d'un matériau composite.

I.3.1. Les résines

Les résines ont pour rôle d'enrober les renforts produisant le lien entre ceux-ci. Elle transmet les efforts aux fibres et les répartit dans les différentes directions. De plus, la matrice protège les fibres des agressions extérieures et permet l'obtention de la forme désirée par un procédé de moulage.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Fig. 1.3.

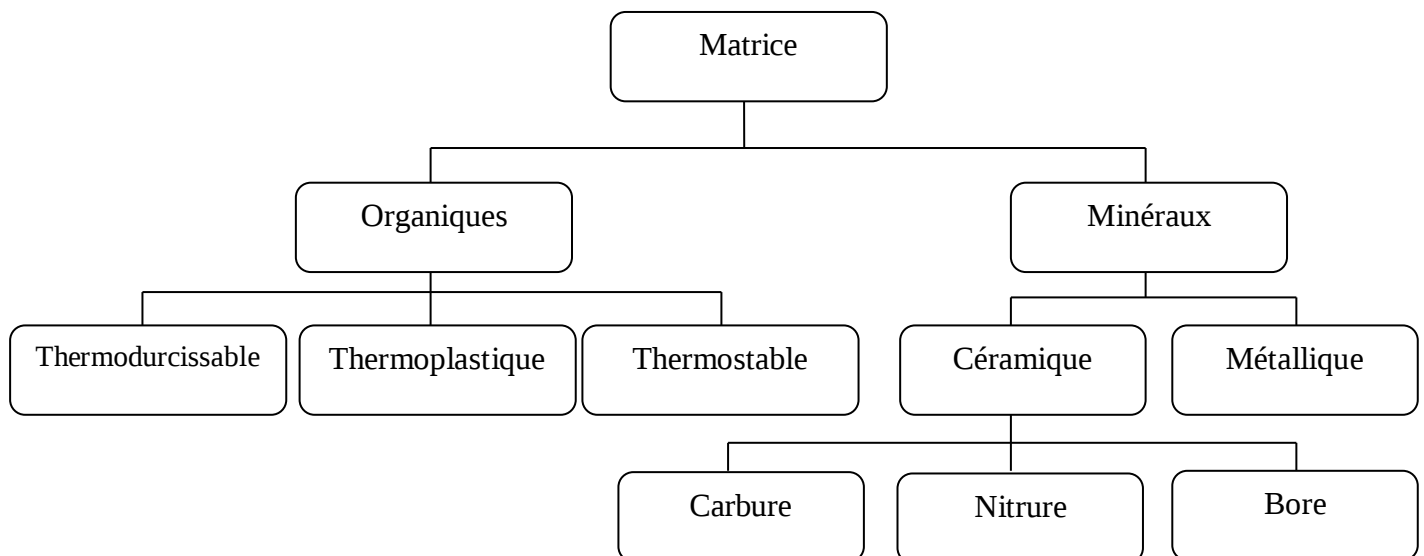


Figure 1.3 : Classification de différentes familles de matrice.

I.3.1.1. Les divers types de résines

a. Résines thermodurcissables TD

Les résines thermodurcissables sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de pièces en matériaux composites.



Figure 1.4 : Carte des caractéristiques des résines thermodurcissables.

Elles se répartissent en différentes familles dont chacune possède une composition chimique particulière.

Parmi ces matrices, on distingue principalement :

➤ **Les résines polyesters (usage courant),**

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique

Il existe différents types de résines

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en oeuvre des matériaux composites sont de type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

- ❖ Masse volumique1200 Kg/m³
- ❖ Module d'élasticité en traction..... 2,8 à 3,5 GPa
- ❖ Module d'élasticité en flexion..... 3 à 4,5 GPa
- ❖ Contrainte à la rupture en traction..... 50 à 80 MPa
- ❖ Contrainte à la rupture en flexion..... 90 à 130 MPa
- ❖ Allongement à la rupture en traction..... (2 à 5) %
- ❖ Allongement à la rupture en flexion (7 à 9) %
- ❖ Resistance en compression.....90 à 200 MPa
- ❖ Resistance au cisaillement10 à 20 MPa

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients des résines polyesters.

Avantages	Inconvénients
✓ Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé ; ✓ Une bonne stabilité dimensionnelle ; ✓ Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus ; ✓ La facilité de mise en oeuvre ; ✓ Une bonne tenue chimique ; ✓ Un faible coût de production ;	✓ Une tenue médiocre en température : inférieur à 120°C en service continu ; ✓ Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs ; ✓ Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 % ; ✓ Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résine polyester d'une couche de « gel-coat » de manière à les rendre étanches ; ✓ Une inflammabilité ;

➤ **Les résines époxydes (tenue mécanique et chimique),**

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé.

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ❖ Masse volumique.....1100 à 1500 Kg/m³
- ❖ 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

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

Tableau 1.2 : Les avantages et les inconvénients des résines époxydes.

Avantages	Inconvénients
✓ De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) ; ✓ Une bonne tenue en température : 150 à 190°C en service continu ; ✓ Une excellente résistance chimique ; ✓ Un faible retrait au moulage (0,5 à 1%). ✓ Une très bonne mouillabilité des renforts ; ✓ Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.	✓ Un temps de polymérisation long ; ✓ Un coût élevé ; ✓ La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en oeuvre ; ✓ Une sensibilité à la fissuration.

➤ **Les résines condensation,**

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques et les aminoplastes.

- Les résines phénoliques : sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Parmi les avantages, nous citerons :

- ✓ une excellente stabilité dimensionnelle,
- ✓ une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- ✓ une bonne résistance aux agents chimiques,
- ✓ un faible retrait,
- ✓ de bonnes caractéristiques mécaniques,
- ✓ un faible coût.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- ✓ une mise en oeuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- ✓ les couleurs foncées des résines,
- ✓ une non adaptation à des utilisations alimentaires.
- Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :
 - ✓ la possibilité d'utilisations alimentaires,
 - ✓ la possibilité de colorer les résines. [4]

b. Résines thermoplastiques TP

Les résines thermoplastiques occupent une place de plus en plus importante dans la fabrication des matériaux composites.



Figure 1.5 : Carte des caractéristiques des résines thermoplastiques.

Elles sont :

- ✓ Économiques et moins polluantes lors de leur transformation, elles offrent une bonne résistance à l'impact et permettent des cadences de production élevées grâce à des cycles relativement courts.
- ✓ Plus facilement recyclables que les matrices thermodurcissables, leurs propriétés restent généralement plus faibles, exceptées pour quelques polymères très techniques et forcément plus onéreux (Le polyoxyméthylène (POM), Les polyaryléthercétones (PEAK).

Les principales résines utilisées pour la fabrication de pièces en composites thermoplastiques :

- Les polyamides (bonnes propriétés mécaniques en général),
- Les polyesters saturés (rigidité élevée, bonnes propriétés diélectriques, dureté élevée),
- Les polyoléfines (excellente tenue aux solvants, excellente résistance mécanique),
- Les polycarbonates (bonne transparence, bonne résistance aux chocs),
- Les polyacétals (bonne dureté, bonnes propriétés électriques)[4].

c. Résines thermostables TS

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C.

Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées.

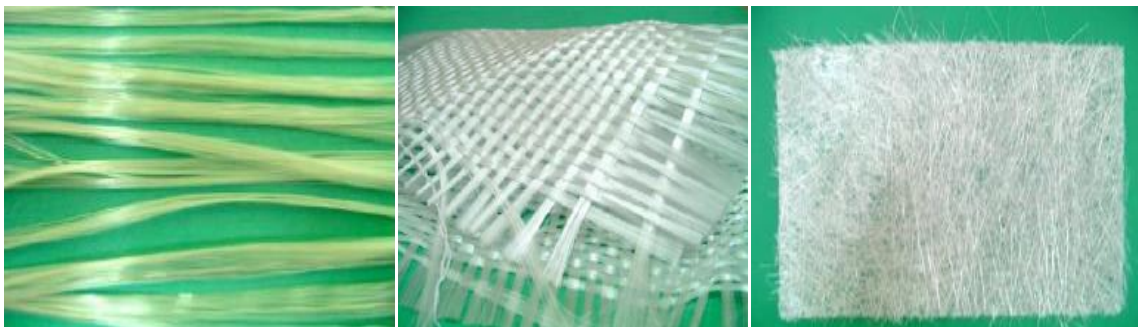
- Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.
- Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium [3].

I.3.2. Les fibres et les tissus

Les renforts sont en générale des fibres qui contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Elles constituent une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % (rapport du volume de fibres au volume total du composite). Les fibres se présentent sous forme de filaments de plus ou moins grande longueur dont les qualités recherchées sont les suivantes :

- bonnes caractéristiques mécaniques ;
- légèreté ;
- résistance thermique ;
- compatibilité avec les résines ;
- adaptabilité aux procédés de mise en oeuvre ;
- faible prix.

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils fig.1.6.a, mèches), tissus surfaciques (tissus fig.1.6.b, mats fig.1.6.c), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).



a) Roving de verre

b) Tissu de verre

c) Mat de verre

Figure 1.6 : Différents formes de fibres.

- **Différents catégories des fibres :**

Deux grandes catégories peuvent être distinguées :

1. Les fibres à hautes performances : fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou de bore qui ont une fonction mécanique prépondérante mais il existe également quelques fibres synthétiques qui ont d'excellentes propriétés thermiques.

2. Les fibres à utilisation particulière : Ce sont des fibres d'origine naturelle (bois, coton, papier...) synthétique (polyamide, polyester...) ou métallique.

I.3.2.1. Les divers types de fibres

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1.7

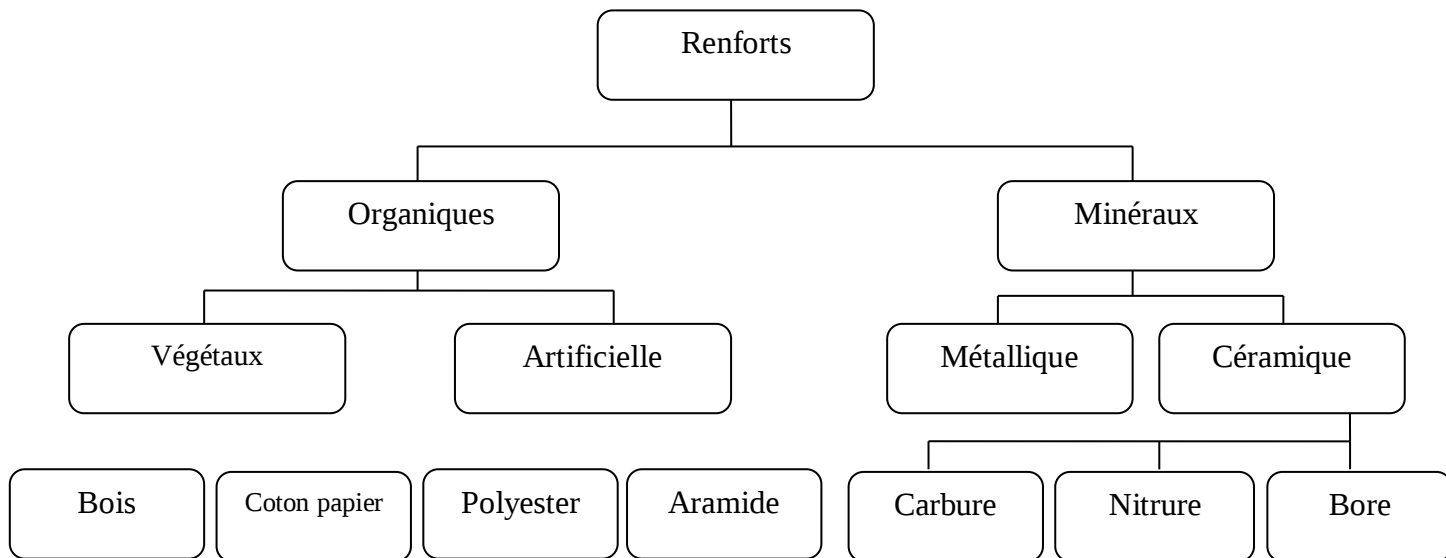


Figure 1.7 : Classification de différentes familles de renforts.

a. La fibre de verre

Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

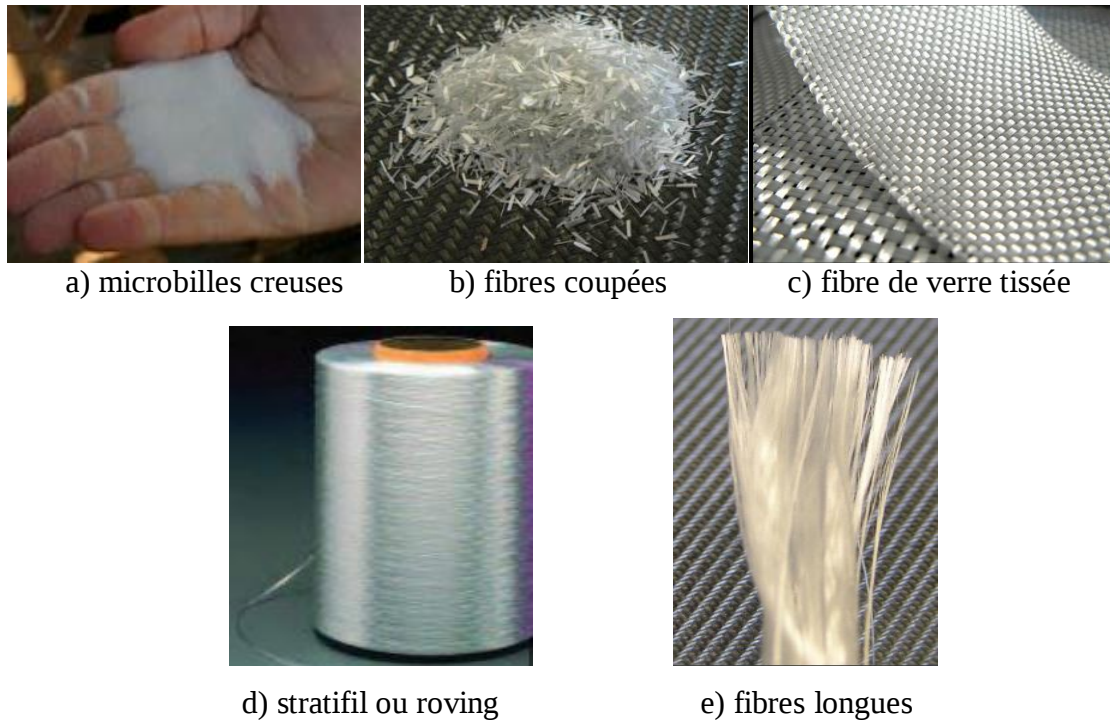


Figure 1.8 : Différents types de fibre de verre.

Et leurs avantages sont :

- Utilisé dans plus de 95 % des composites
- Prix bas
- Grande déformation à rupture
- Rigidité insuffisante dans certaines pièces de structure

b. La fibre de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres 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.

Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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

Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

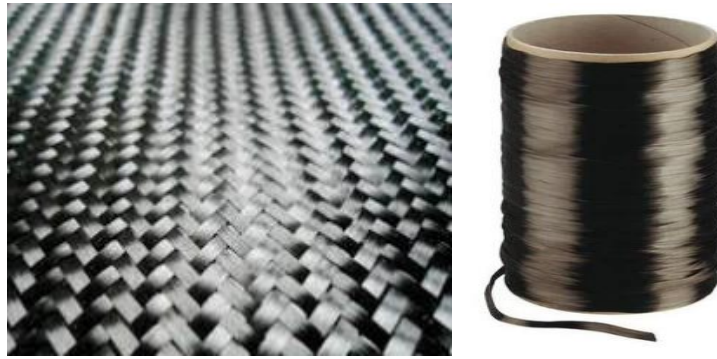


Figure 1.9 : Fibre de carbone.

c. La fibre aramide

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



Figure 1.10 : Fibre aramide.

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon).

d. La fibre céramique

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

- ❖ fibres de Carbure de Silicium (SiC)

- ❖ fibres de Bore (B)
- ❖ Les fibres de bore-carbure de bore (B-B₄C)
- ❖ fibres de Bore carbure de silicium (BorSiC) [4]

e. La fibre synthétique thermostable

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

I.4. Les charges et les additifs

Les charges et additifs sont des matières d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique se présentant sous forme pulvérulente ou fibreuse chimiquement pures et inertes vis-à-vis des résines.

Mélangées à une résine, elles apportent de nouvelles propriétés et modifient les caractéristiques du produit fini [4].

Tableau 1.3 : Influencent et améliorent des charges.

	Influencent	Améliorent
Les charges	▪ L'aspect du produit ▪ La viscosité ▪ La densité ▪ L'opacité ▪ Le temps de gel ▪ Le prix de revient	▪ La résistance à l'humidité ▪ La résistance aux agents chimiques ▪ La résistance au feu ▪ La résistance à la chaleur ▪ La résistance aux chocs

Exemple :

- Carbonate de calcium : augmente la viscosité, réduit le cout.
- Hydrate d'alumine : augmente la tenue au feu.
- Oxyde de titane : coloration ultra-blanche.
- Poudre de Quartz : Augmente la dureté, augmente la résistance à l'abrasion, augmente la résistance à la rayure, confère des propriétés diélectriques.

a. Les additifs

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés. Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.

- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur

b. Les solvants

Les solvants sont des produits organiques liquides, simples ou mixtes, généralement transparents et volatils. Leur rôle est de rendre la peinture ou tout filmogène (résine), assez fluide pour faciliter son application. Après son élimination par évaporation, il est facile de retrouver une phase solide. Les principaux solvants utilisés sont : dans quatre familles distinctes [5] [6]:

- hydrocarbures : hydrocarbures aliphatiques, hydrocarbures aromatiques, hydrocarbures cycliques ;
- solvants halogénés : bromés (1-bromopropane), chlorés (trichloréthylène), iodés (iodure de propyle), fluorés (2,3-dihydrodécafluoropentane) ;
- solvants oxygénés : alcools, cétones, esters, éthers, éthers de glycol ;
- autres solvants : acétonitrile, N,N-diméthylformamide, disulfure de carbone, nitroparaffines

c. Les charges

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

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- des particules de carbone (noir de carbone) [7].

d. Les pigments

Ce sont des substances minérales ou organiques qui se présentent généralement sous forme de fine particules insolubles dans le milieu de suspension (liant et solvant). Ils sont utilisés pour colorer et rendre opaque le film de peinture pour masquer le support et lui donner l'aspect désiré. Ils ont également pour rôle de renforcer les qualités protectrices du feuil de peinture soit par leurs propriétés chimiques ou physiques (optique, protectrice et décorative) [7].

Au fait, les pigments sont classés comme suit:

- pigments minéraux : dioxyde de titane, oxyde de fer rouge ;
- pigments organiques : vert phtalo, rouge molybdène ;
- pigments métalliques : poussière de zinc, pâte d'aluminium.

Deuxième Chapitre

MISE EN FORME

Chapitre II

MISE EN FORME

II. Introduction

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit final.

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit, et l'importance des séries

Ce chapitre a pour objet de proposer la technologie de mise en forme des matériaux composites, les principes de différents processus de mise en œuvre et nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

II.1. Moulage au contact

Le moulage au contact (figure 2.1) est utilisé pour les composites « grandes diffusions » ; le procédé consiste à déposer sur la forme à mouler une succession de couches ou plis composites. L'ensemble de ces plis forme un empilement dont la séquence est préalablement définie. La première couche a pour fonction de protéger la pièce à l'aide d'un « gel-coat ». Ensuite, les plis sont stratifiés par imprégnation des renforts (mats ou tissus) à l'aide d'une résine (polyester dans notre cas d'étude) accompagnée de son système catalytique.

Pour chaque pli, un compactage manuel au rouleau est nécessaire afin de chasser l'excédant d'air et garantir une bonne imprégnation des renforts.

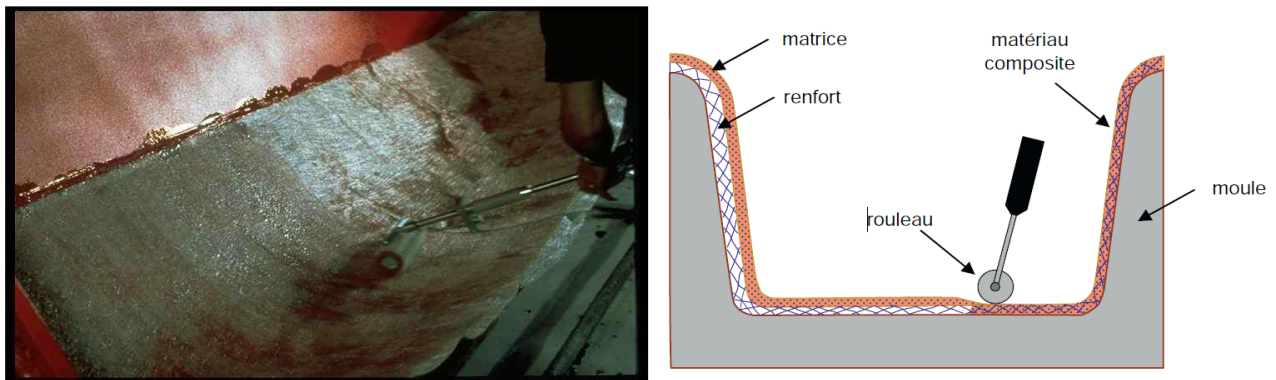


Figure 2.1 : Principe du moulage au contact.

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 (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
- 7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc [2].

II.2. Moulage par projection simultanée

Le moulage par la projection simultanée (figure 2.2), qui est une variante du moulage au contact, permet de déposer simultanément sur le moule la résine catalysée et les fibres de renforts coupées. Cette opération s'effectue au moyen d'un pistolet et peut être automatisée.

La matière projetée (résine et fibres) aboutit à un renforcement de type mat qui nécessite souvent un compactage au rouleau comme pour le moulage au contact.

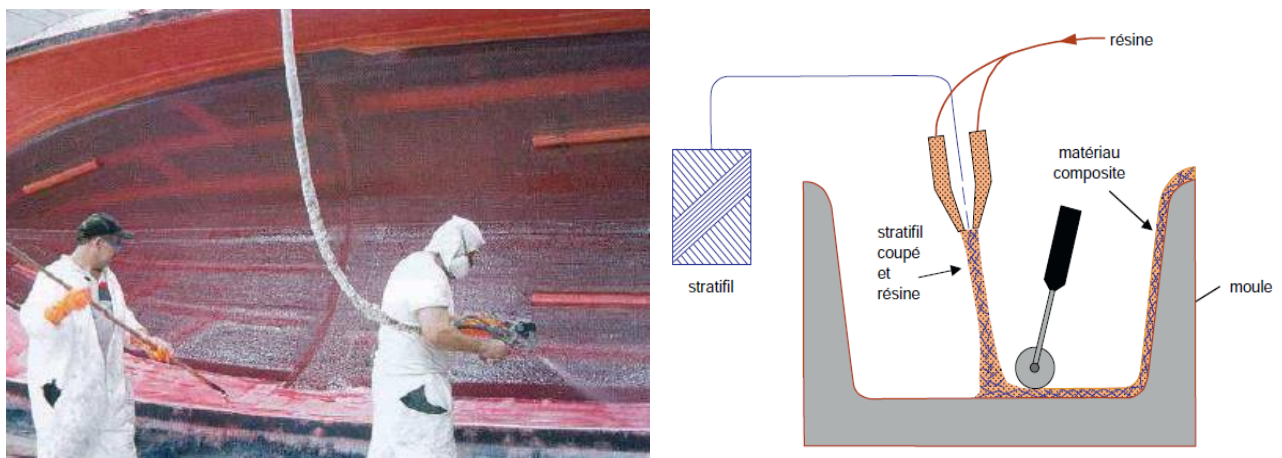


Figure 2.2 : Principe du moulage par projection simultanée.

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 [2].

II.3. Moulage sous vide

Le moulage sous vide (figure 2.3) 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 débulle 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 [2].

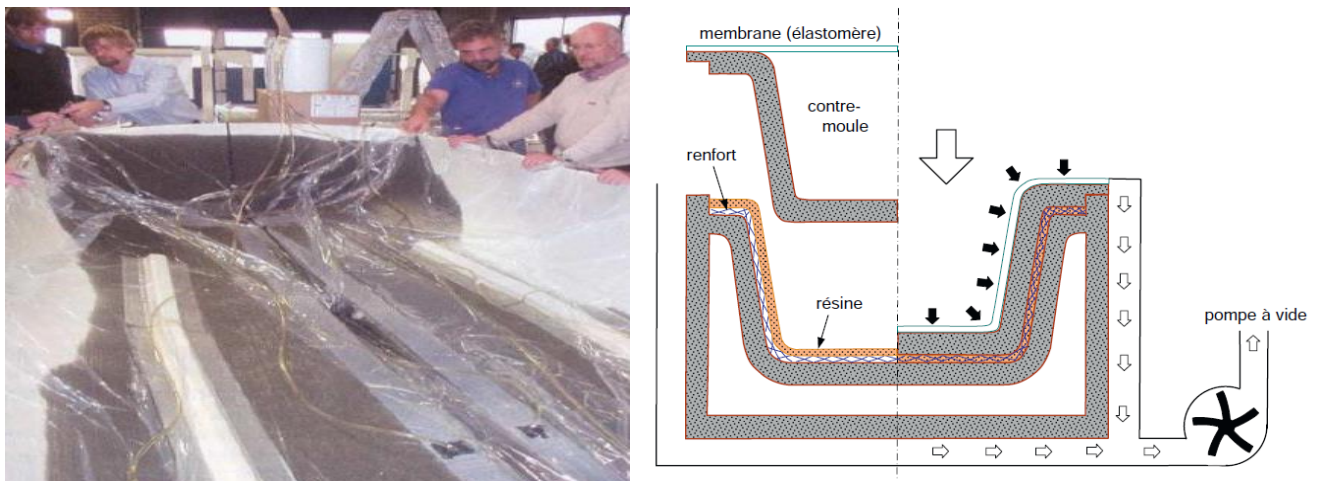


Figure 2.3 : Moulage sous vide.

II.4. Moulage par compression

II.4.1. L'infusion de résine sous membrane souple

II.4.1.1. Moulage par compression à froid

Le moulage est effectué à basse pression (<5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exotherme 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 pièce 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 presse à chaud.

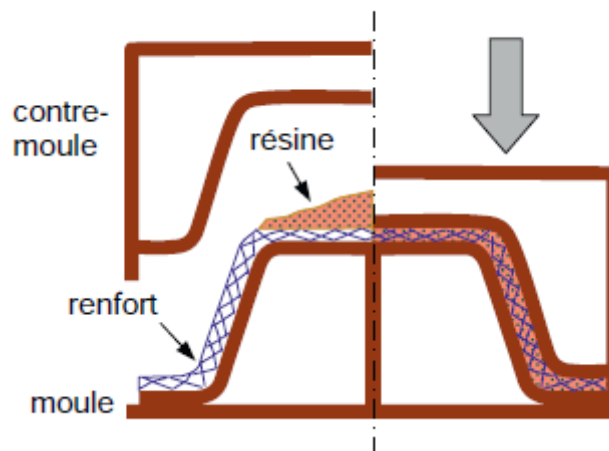


Figure 2.4 : Principe du moulage par compression à froid.

II.4.1.2. 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 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 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.

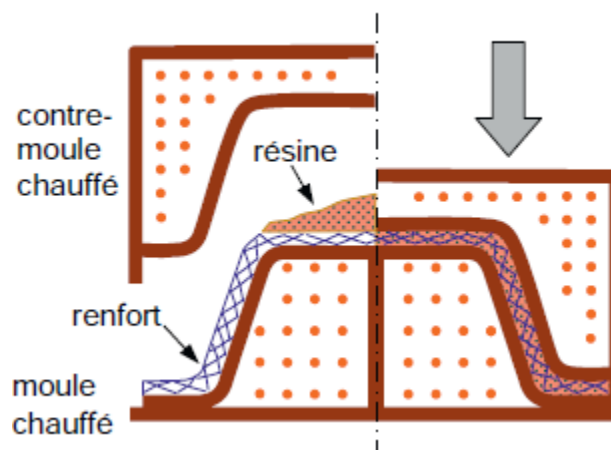


Figure 2.5 : Principe du moulage par compression à chaud.

II.4.2. Moulage par projection de résine

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression (figure.2.6), 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 pièce profondes et de forme compliquées [2].

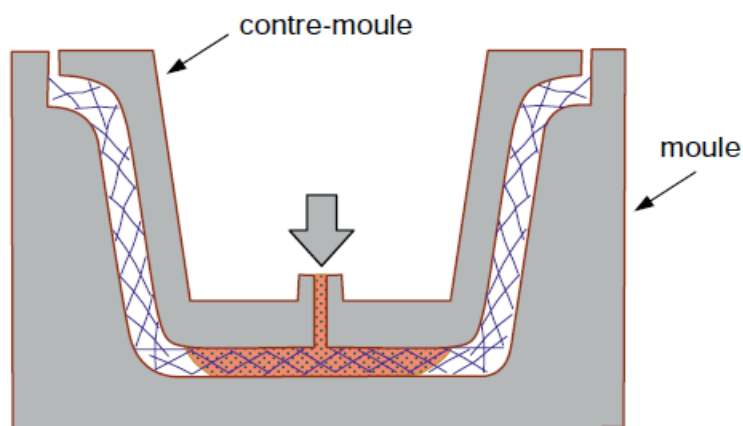


Figure 2.6 : Moulage par injection de résine.

II.5. Moulage par enroulement filamentaire

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 [2].

II.5.1. Enroulement circonférentiel

Le bobinage est effectué à 90° par 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[2].

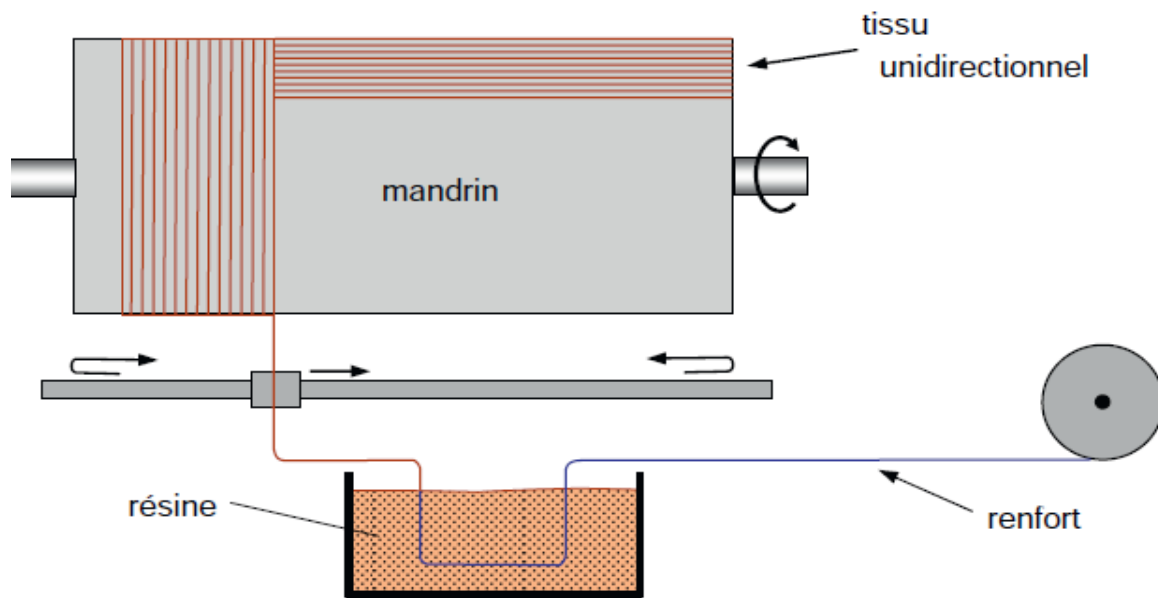


Figure 2.7 : Principe de l’enroulement circonférentiel.

II.5.2. 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 du guide-fils par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l’angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du 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 tube de forage pétrolier, bouteilles de gaz, etc [2].

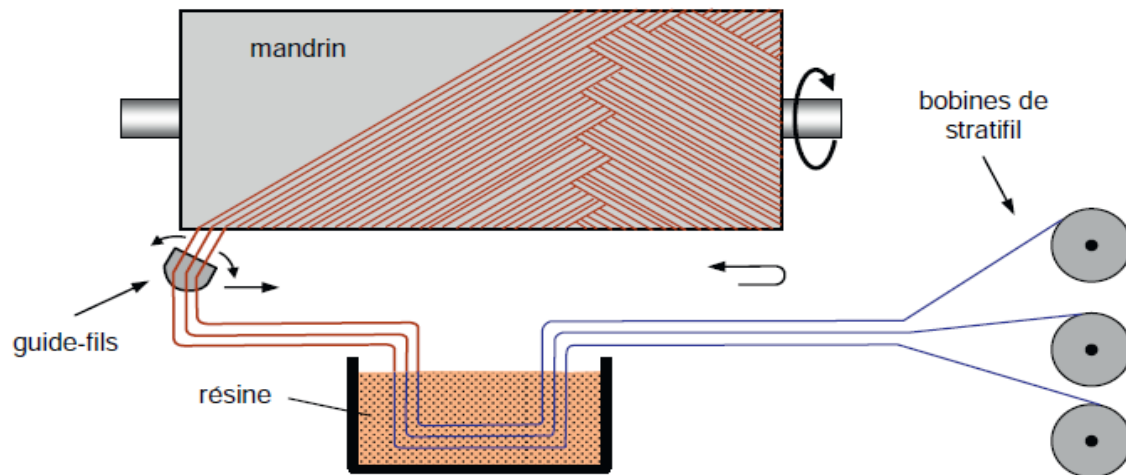


Figure 2.8 : Enroulement hélicoïdal discontinu.

b. Enroulement continu

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs [2].

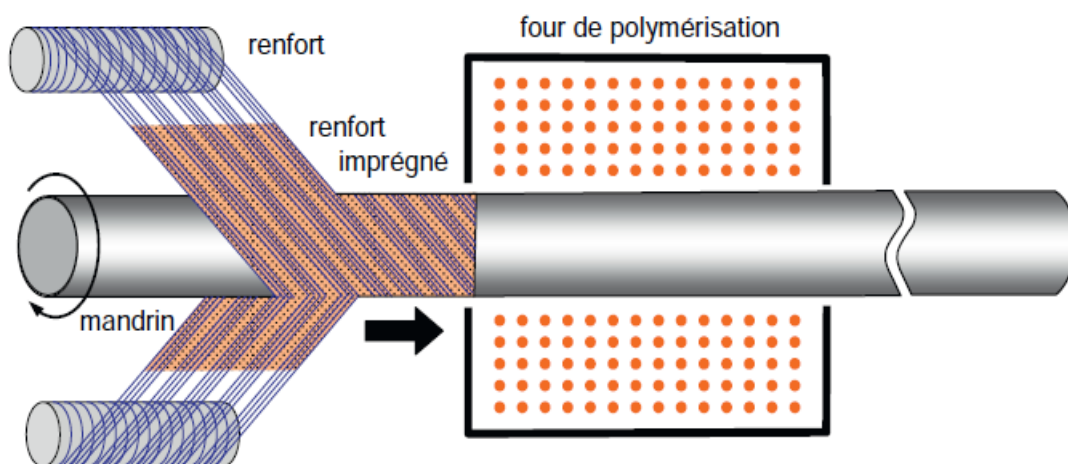


Figure 2.9 : Enroulement hélicoïdal continu.

II.5.3. Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabrication 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 trois rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabrication des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc [2].

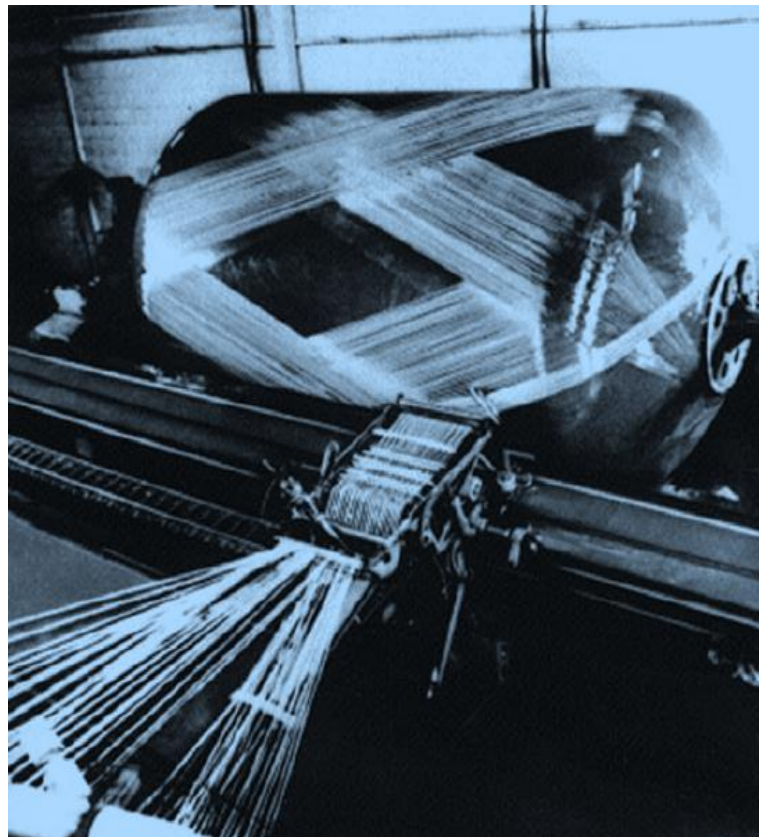


Figure 2.10 : Enroulement polaire.

II.5.4. Mandrins

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage. Ils peuvent être :

En métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables ;

En matériau à bas point de fusion ;

En matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans liant soluble sans l'eau ;

En élastomère gonflable [2].

II.5.5. Applications de l'enroulement filamentaire

Les applications de l'enroulement filamentaire ont été dégagées dans les paragraphes précédents. D'une manière générale, ce processus de mise en œuvre est utilisé pour fabrication des pièces ayant une symétrie de révolution : tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz, enveloppes cylindrique, etc. des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée. L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Le procédé d'enroulement filamentaire est également applicable à des pièces sans symétrie de révolution : pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc [2].

II.6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé (figure 14).

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 stratifil 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 du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés.

Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule [2].

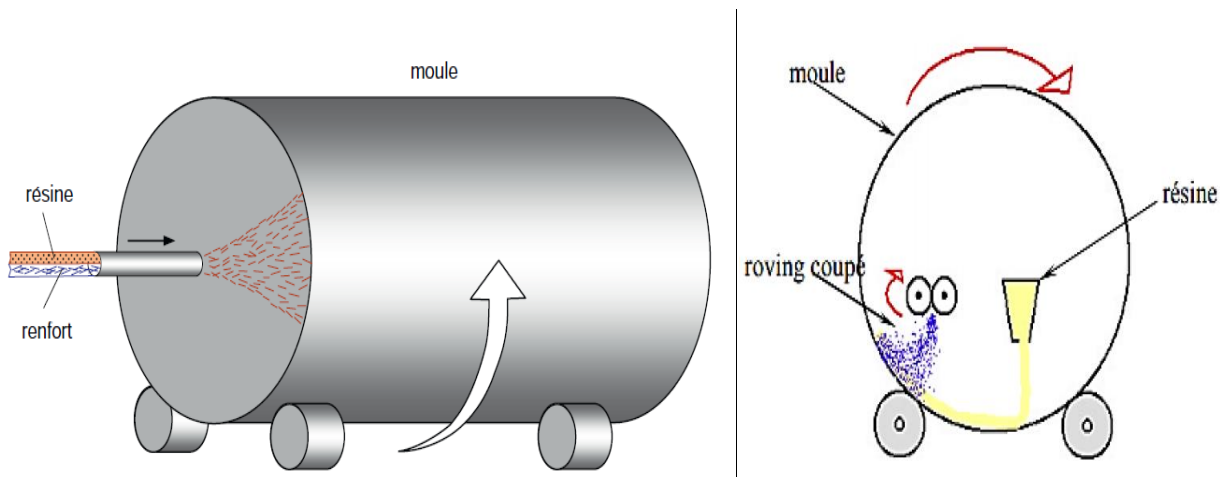


Figure 2.11 : Moulage par centrifugation.

II.7. Structure des matériaux composites

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts.

La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir.

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants, comme illustré sur la figure 2.19, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre.

En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches) [8].

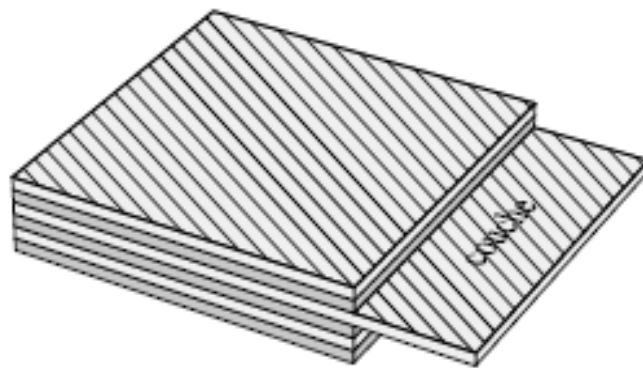


Figure 2.12 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.

II.7.1. Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat.

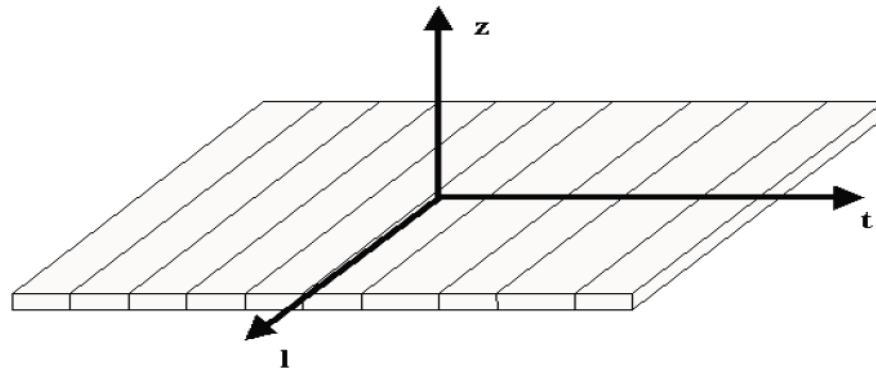


Figure 2.13 : Composite Monocouches.

II.7.2. Les stratifié

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile.

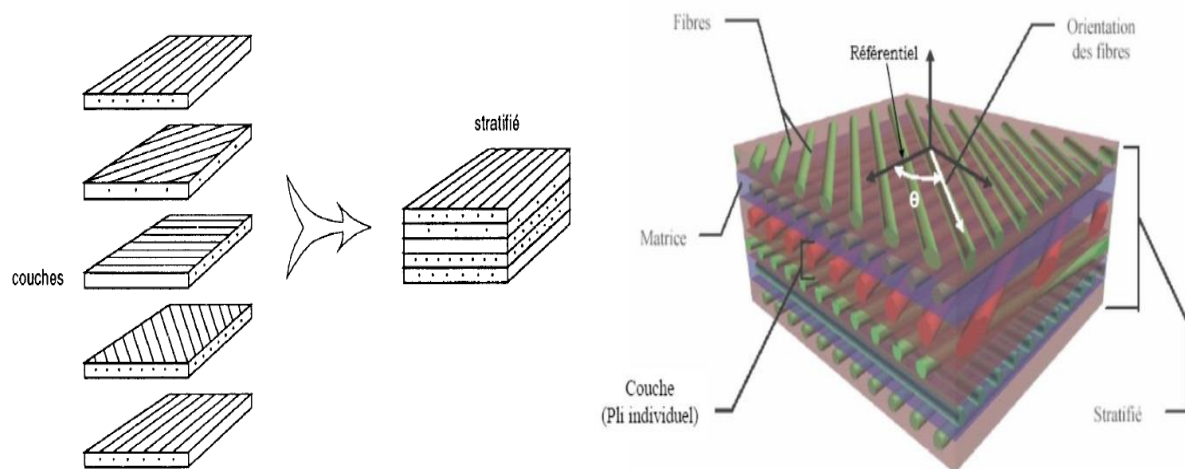


Figure 2.14 : Composite stratifié.

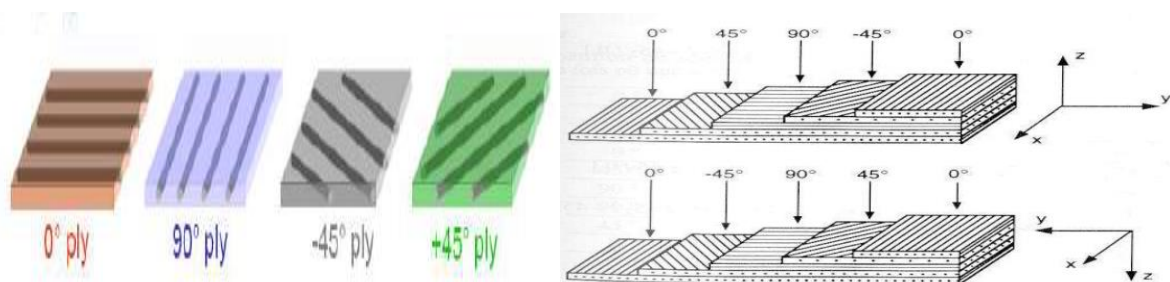


Figure 2.15 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés.

II.7.3. Sandwich

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou coeur) de forte épaisseur et faible résistance.

L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

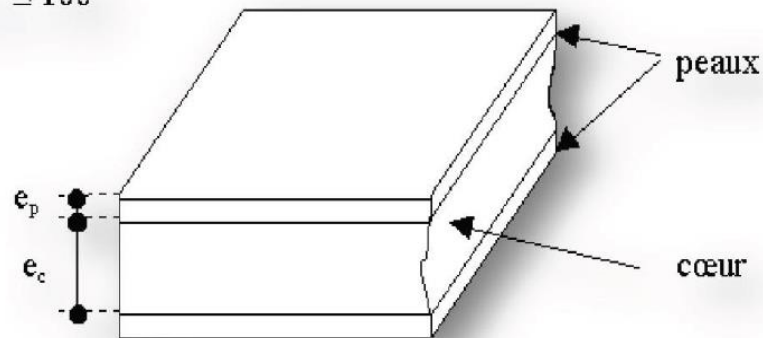


Figure 2.16 : Composite sandwichs.

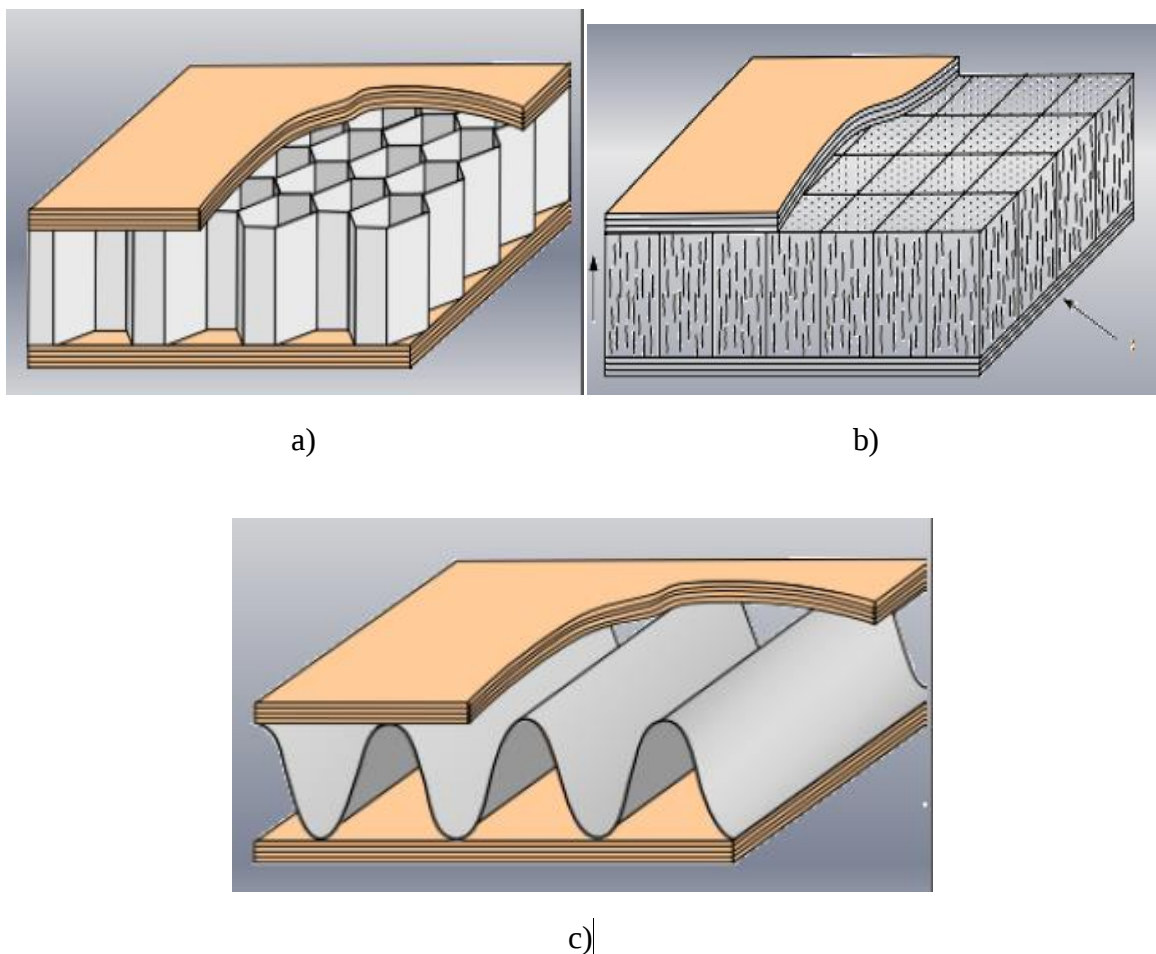
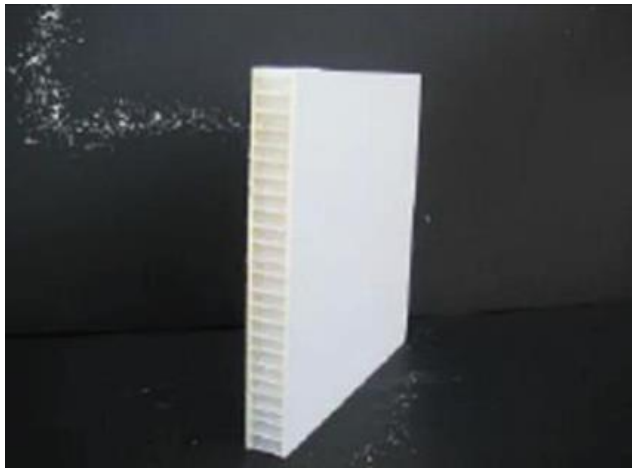
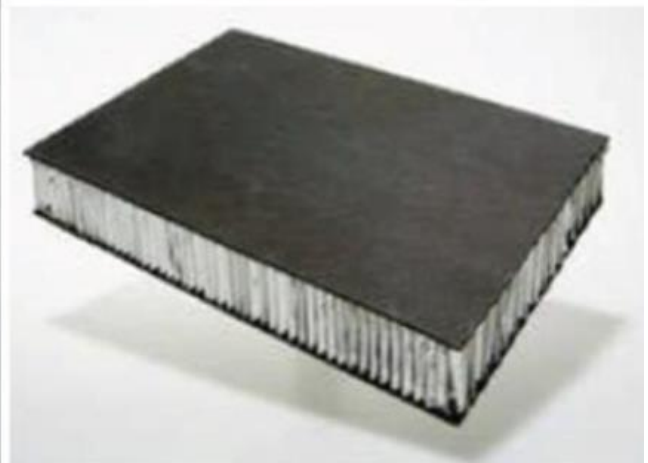


Figure 2.17 : Composite sandwichs : a) Ame en nid d'abeille, b) Ame plein (mousse, résine)
 c) Ame ondulé.

Différent types de sandwich : sont montre sur la figure suivante :



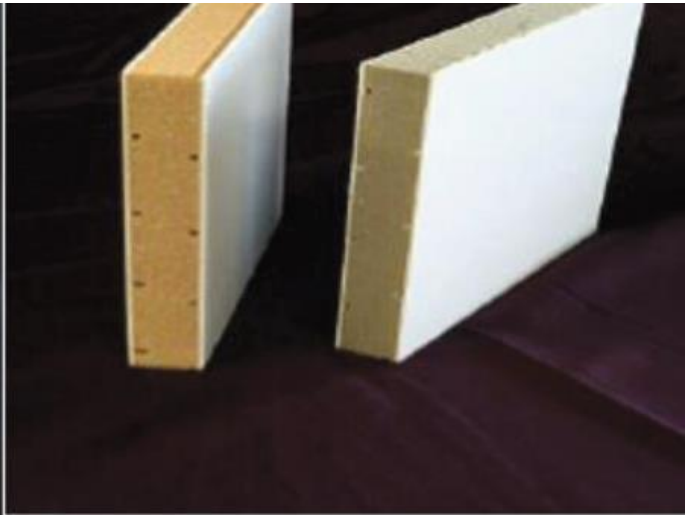
a)



b)



c)



d)

Figure 2.18 : les différent types de sandwich : a) Fibre de verre nid d'abeille, b) Fibre de carbone nid d'abeille, c) Fibre de verre mousse polyuréthane, d) Fibre de verre mousse PVC.

II.8. Les domaines d'utilisations

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et leur faible masse volumique. Les fibres de verre sont utilisées notamment dans la fabrication de pièces industrielles, de piscines, de pièces pour bateaux, d'éléments automobiles, de transports, et agricoles, de supports publicitaires, ou pour quelques pièces ou objets de décoration et d'ameublement. Les fibres de carbone sont utilisées principalement dans les secteurs de l'aviation et du nautisme. Cependant, nombre de secteurs d'activités demeurent à explorer quant à l'usage des matériaux composites et leurs valeurs intrinsèques.

Troisième Chapitre

MATERIEL ET METHODES

Chapitre III

MATERIEL ET METHODES

III.1. Machine de traction

III.1.1. Essai de traction

L'essai de traction est généralement réalisé en introduisant une éprouvette dans une machine de traction universelle. Cette machine consiste en une base plane et un piston hydraulique ayant un mouvement linéaire perpendiculairement cette même base. De plus, des mâchoires (hydrauliques ou manuelles) se trouvent sur le piston ainsi que sur la base. Ces dernières sont installées de manière à ce que leurs axes soient colinéaires avec celui du piston. Alors, une fois l'éprouvette insérée dans les mâchoires, le piston est déplacé verticalement et la force axiale nécessaire à ce déplacement est enregistrée. De plus, des jauges de déformations sont collées sur l'éprouvette afin de mesurer les déformations intervenant dans le calcul des propriétés mécaniques.

Ces propriétés mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante. Premièrement, la contrainte axiale σ , dans l'éprouvette est obtenue en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section utile de l'éprouvette au début de l'essai. Deuxièmement, le module élastique en tension est calculé en divisant la contrainte axiale par la déformation mesurée par la jauge. Finalement, la contrainte à la rupture est habituellement identifiée comme étant la contrainte maximale enregistrée durant tout l'essai. Ceci étant établi, les différentes géométries d'éprouvettes ainsi que les manières d'introduire la charge axiale proposées dans la littérature peuvent être discutées [9].

III.1.2. La machine de traction ZO50

La machine de traction ZO50 est une machine de traction universelle à un seul poste de travail, c'est une machine à vis sans fin Figure (3.1). Elle est constituée des parties essentielles suivantes : la traverse sur colonnes et la partie électronique de commande. Elle est dotée d'un extensomètre avec les deux palpeurs



a) Ordinateur transfère les données de l'essai de traction

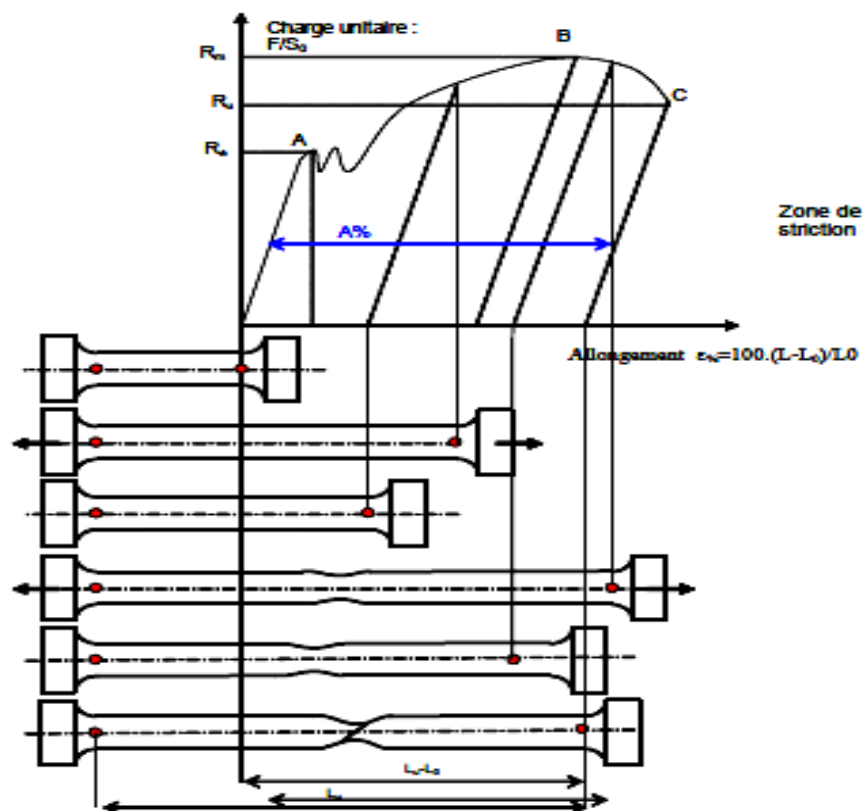


b) Machine de traction

Figure 3.1 : La machine de traction ZO50

III.1.3. Interprétation du diagramme efforts-allongements $F=f(\Delta L)$

Sur un diagramme effort-déformation, on observe les phases successives suivantes :

**Figure 3.2 : Allure du diagramme efforts-allongements d'un acier doux.**

- **Zone OA** : domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales
- **Zone AB** : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.
- **Zone BC: la déformation plastique se localise** dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la **striction** on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

- ❖ en abscisse, l'allongement relatif $\Delta L/L_0$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure L_0 (L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette) ;

$$\varepsilon\% = 100 \times \frac{L - L_0}{L_0}$$

- ❖ en ordonnée : la charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

- Le point A est la limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction)

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

- Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

- Le point C correspondant, lui, à la charge ultime.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou **A pour cent** de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100 \times \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

Cet allongement est la somme de l'allongement réparti A_r jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction A_z :

$$A = A_r + A_z$$

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (figure 26). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \times \frac{S_u - S_0}{S_0}$$

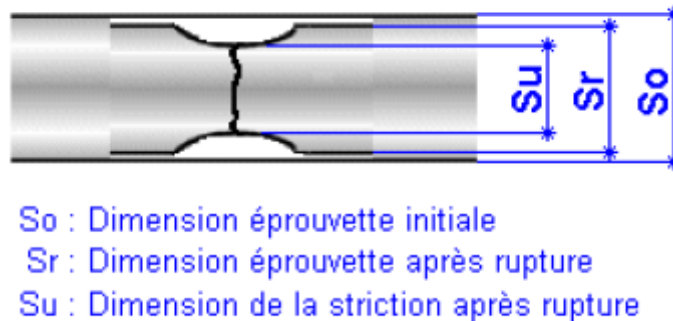


Figure 3.3 : déformation d'une éprouvette.

Cette déformation est également la somme de la déformation homogène répartie et de la déformation de striction proprement dite.

III.1.4. Principales caractéristiques mécaniques d'un matériau

Pour donner une évaluation quantitative des propriétés du matériau on trace de nouveau le diagramme efforts-allongements en coordonnées σ et ε (avec $\sigma = F/S_0$ et $\varepsilon = \Delta L/L_0$). A cet effet réduisons de S_0 fois les ordonnées et de L_0 fois les abscisses. Comme ces grandeurs sont constantes, le diagramme $\sigma = f(\varepsilon)$ a la même allure que le diagramme $F=f(\Delta L)$, mais il caractérise non pas les propriétés de l'éprouvette, qu'on vient de voir, mais celles du matériau. Le diagramme obtenu qui ne diffère du précédent que par la graduation des axes, s'appelle diagramme contraintes-allongements relatifs ou diagramme conventionnel de traction (figure 2.4).

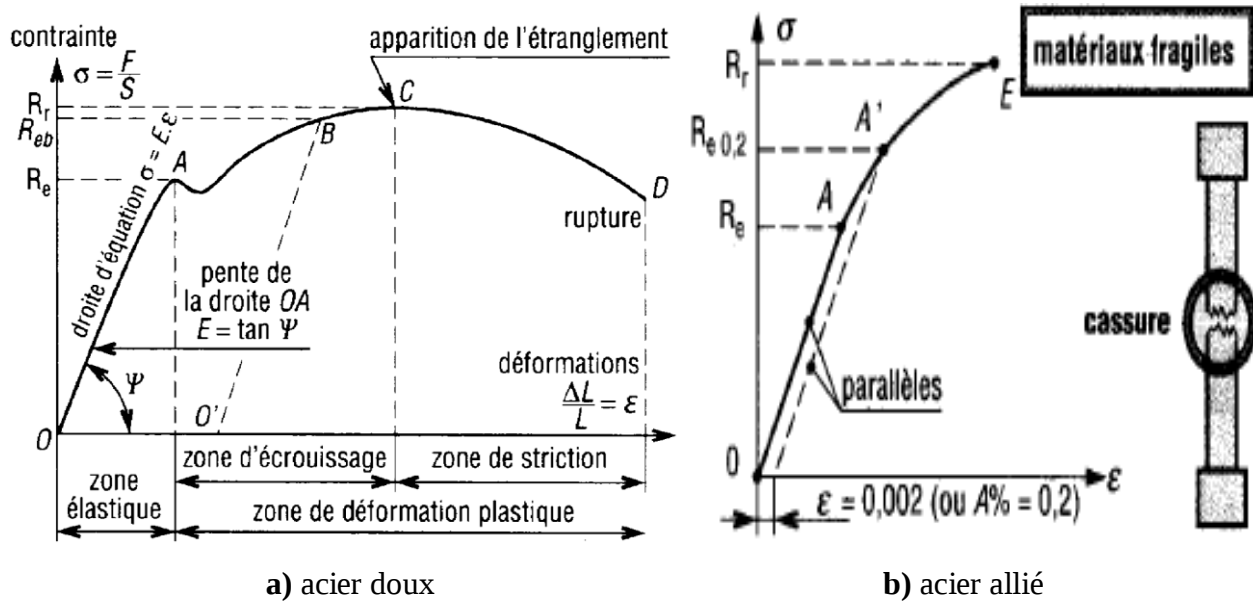


Figure 2.4 : Allures du diagramme efforts-allongements.

A partir du diagramme $\sigma = f(\epsilon)$ (Figure 2.4) on définit les caractéristiques mécaniques essentielles suivantes :

1) Limite apparente d'élasticité ou Limite d'élasticité " σ_e ":

Par définition c'est la contrainte maximale pouvant être appliquée dans un essai de tension pure, tel qu'après suppression de la charge il ne subsiste aucune déformation permanente, $\sigma_e = F_e/S_0$ avec F_e = charge à la limite apparente d'élasticité et S_0 = aire initiale de la section droite de l'éprouvette.

Parfois il n'est pas possible de situer le point A qui caractérise la fin de la période élastique. Dans ce cas la limite d'élasticité est définie d'une manière conventionnelle: c'est la valeur de la contrainte qui donne un allongement permanent relatif égal à 0,2% (figure 2.4).

2) Résistance à la traction ou Résistance limite ou Résistance à la rupture " σ_r ":

Par définition c'est le quotient de la Force maximum F_m que peut supporter l'éprouvette par l'aire initiale S_0 de la section droite de l'éprouvette, $\sigma_r = F_m/S_0$.

C'est la plus forte contrainte supportée pendant l'essai mais n'est pas la contrainte de rupture de l'éprouvette.

3) Module d'élasticité longitudinale ou Module de Young ou coefficient de Hooke " E ":

Il caractérise la résistance que le matériau oppose à son allongement élastique.

Dans le diagramme $\sigma = f(\epsilon)$, la courbe OA a été remplacée d'une manière approchée par une droite et comme elle passe par l'origine O on a donc $\sigma = a \epsilon$ (les contraintes sont proportionnelles aux allongements), par suite $a = \sigma/\epsilon = \tan \alpha = \text{constante} = E$ la loi de Hooke $\sigma = E \epsilon$ qui est une loi

approchée. On déduit $E = Fx L_0/S_0 \times \Delta L$ (voir point IV- déformation élastique), E s'exprime en N/mm^2 ou MPa.

Remarque :

“E” élevé matériau rigide (acier, iridium, diamant,...), “E” faible matériau peu rigide c.à.d. souple, élastique ou flexible (caoutchouc, cuir, PVC, ...).

Pour les aciers “E” est compris entre 190000 et 220000 N/mm^2 ,

Pour les fontes “E” est compris entre 90000 et 100000 N/mm^2

4) Coefficient de Poisson “ μ ” :

L'expérience montre que dans le domaine élastique (ou dans des limites déterminées) l'allongement longitudinal de l'éprouvette s'opère avec amincissement transversal proportionnel, il en résulte alors :

$\epsilon_{trans.} = \mu \epsilon_{long.}$ avec :

- $\epsilon_{trans.} = \Delta d/d_0$ rétrécissement relatif transversal (Δd = diminution du diamètre de l'éprouvette, d_0 = diamètre initial de l'éprouvette),
- $\epsilon_{long.} = \Delta L/L_0$ allongement relatif longitudinal, (ΔL = augmentation de la longueur de l'éprouvette, L_0 = longueur initiale de l'éprouvette),
- μ = coefficient de proportionnalité sans dimension appelé coefficient de Poisson.

III.2. Fibre de verre unidirectionnel UN

La fibre de verre dans le sens chaîne (0°) fournies par Owens Corning. Ces fibres combinent les avantages du verre E de qualité électrique typique et la résistance à la corrosion de verre C-R. En moyenne, 98% des fibres sont dans le sens chaîne, donc les fibres dans la trame (90°) ne sont présents que pour lier les faisceaux de fibres ensemble et ne contribuent pas à la propriétés mécaniques. Le tissu a une densité surfacique de 9,6 oz/yd³ (327 g/m²). Par le fabricant, les fibres de verre ont un diamètre moyen de 10 μ m, une densité de 2,62 g/cm³, et module de young de 82 GPa. Advantex est un matériau sans bore recommandé pour une utilisation dans milieux acides.

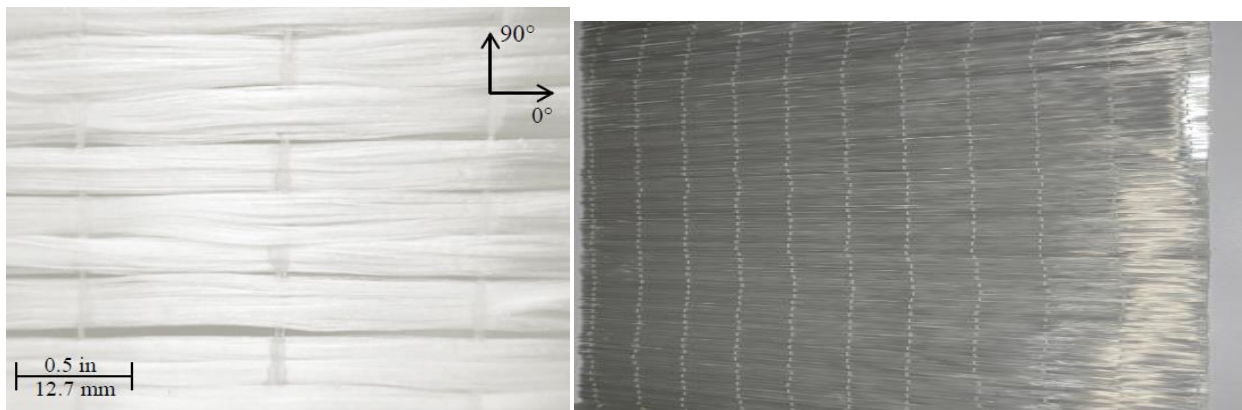


Figure 3.5 : fibre de verre unidirectionnelle UD.

III.3. Résine époxy

La résine époxy est un produit composé de deux ingrédients à mélanger pour obtenir une solution dure et solide. Facile à travailler, colorable à l'envie, esthétique et originale, la résine époxy est idéale pour donner vie à de nombreuses réalisations pratiques et décoratives. Découvrez son fonctionnement et les utilisations possibles de ce produit à la mode.

La résine époxy est un polymère liquide thermdurcissable constitué de deux composants. A durcir une fois exposée à une température de 10 à 15°C.



Figure 3.6 : Le produit résine époxy.

III.4. Réalisation des éprouvettes

Nous avons réalisé quatre d'éprouvettes de type Fibre de verre unidirectionnel par enfillement quatre couches de Fibre de verre unidirectionnel par des angles 0° - 90° - 90° - 0° sur le manchon isolé chaque couche mouler par résine époxy utilisant le moulage au contact et découper par partie.



Figure 3.7 : Eprouvettes de type Fibre de verre unidirectionnel des angles 0° - 90° - 90° - 0° .

Tableau 3.1 : Les dimensions da chaque éprouvette de fibre de verre unidirectionnel.

N°	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
44	200	19,6	1,2
45	200	19,6	1,2
47	200	19,6	1,2
416	210	19,8	1

III.5. Normes utilisées

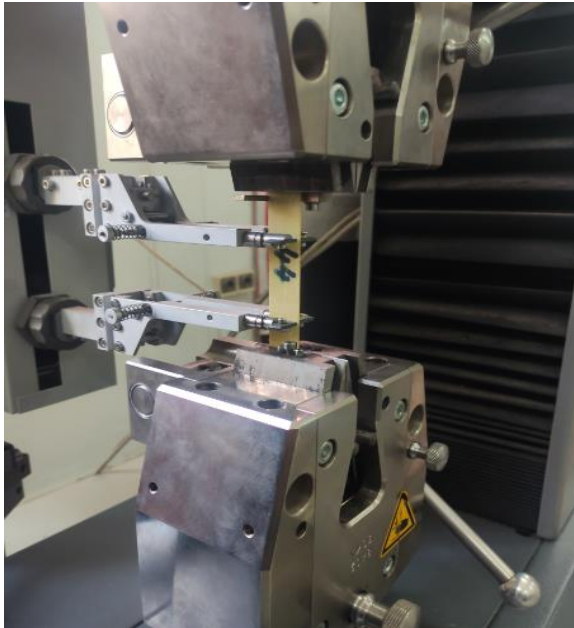
Tableau 3.2 : Norme d'essai de traction pour la fibre de verre unidirectionnel.

Normes	Description
DIN EN 10002-1	Cette méthode d'essai déterminer les propriétés de résistance à la traction des fibres de verre.

III.6. Protocole expérimental

III.6.1. L'installation des éprouvettes sur la machine de traction ZO50

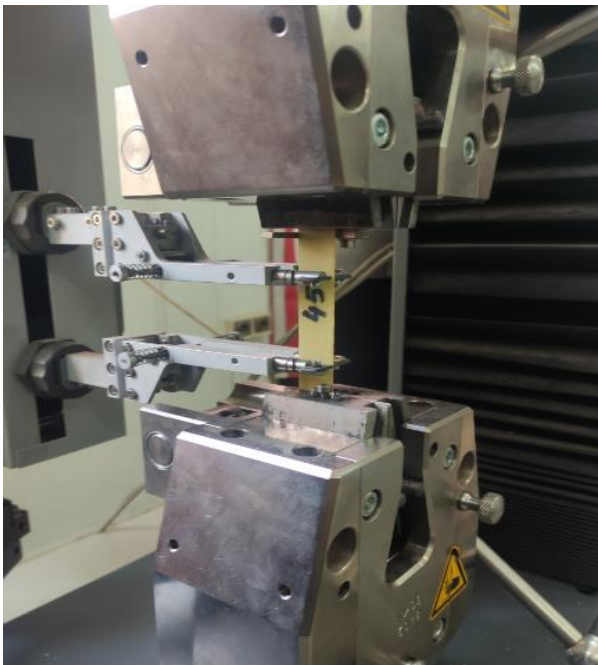
Les éprouvettes sont soumises à une traction sur une machine d'essai universelle ZWICK 1051 avec un capteur de force et commandée par ordinateur. La vitesse de déplacement de la croix est directement imposée au programme de test la figure 3.8 représente les éprouvettes avant et après l'effet de traction.



a) avant



b) après



c) avant



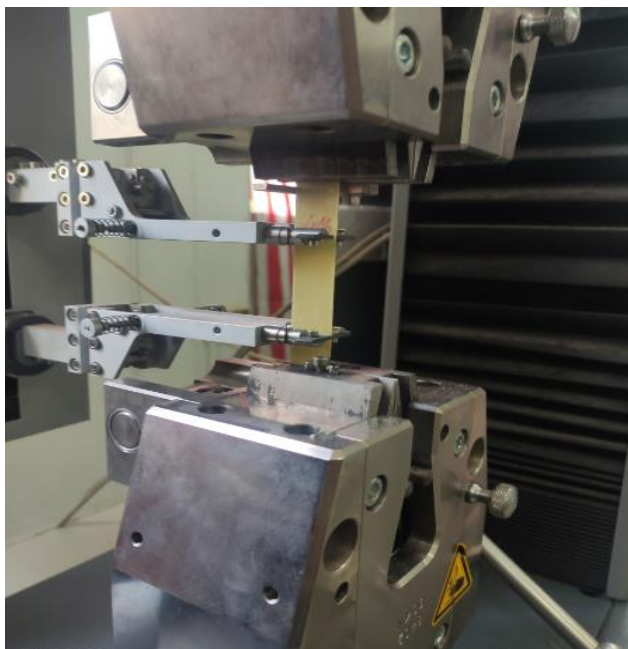
d) après



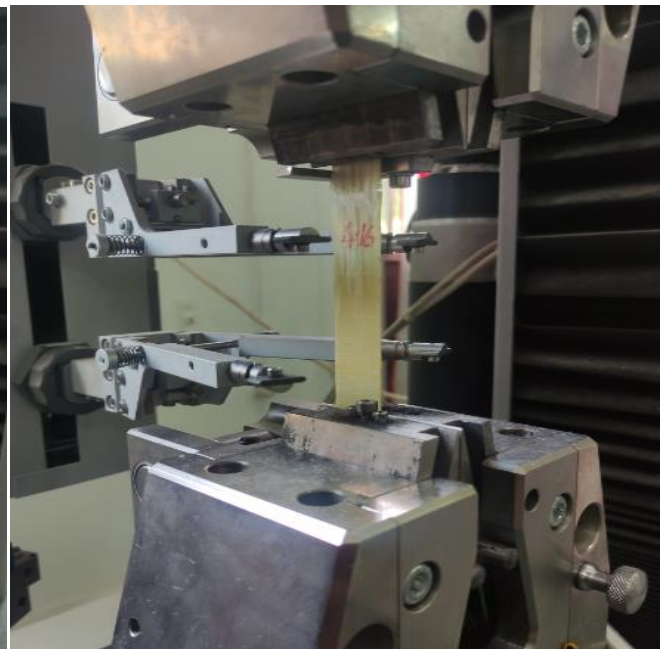
e) avant



f) après



j) avant



h) après

Figure 3.8: Les éprouvettes avant et après l'essai de traction.

III.6.2. Les résultats d'essai de traction pour éprouvettes fibre de verre unidirectionnel/résine époxy

La figure 3.9 montre l'évolution moyenne de la pression appliquée sur la surface de l'éprouvette en fonction de l'allongement en %, pour chaque type d'éprouvette (N°44, N°45, N°47, N°416).

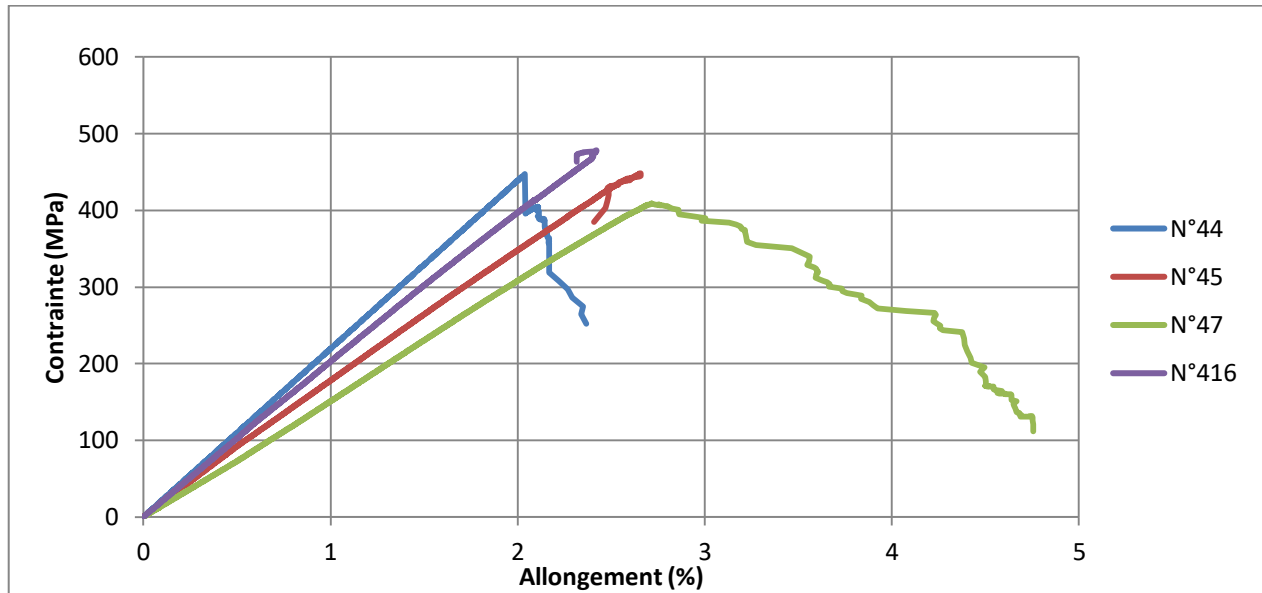


Figure 3.9: Courbes contrainte allongement des éprouvettes N°44, N°45, N°47, N°416.

III.6.3. Les résultats expérimentaux obtenus

Les résultats de l'essai de traction pour chaque éprouvette sont donnés dans le tableau 3.3, la surface initiale S_0 en mm^2 , le module de Young en GPa E , la résistance élastique du matériau (l'éprouvette s'est allongée de 0,2 %) $R_{p0,2}$, la résistance à la rupture R_r , Allongement élastique A_ϵ , Allongement à la rupture A_r , le temps de l'essai de traction t_{essai} .

Tableau 3.3 : Résultats expérimentaux obtenus.

N°	S_0	E	$R_{p0,2}$	R_r	A_ϵ	A_r	t_{essai}
	mm^2	GPa	MPa	MPa	%	%	s
44	23,52	18,5158138	392,494312	395,714169	2,32097885	2,5800986	370,190002
45	23,52	17,971102	430,177005	437,101652	2,65915986	2,40848585	401,47998
47	23,52	15,5640105	395,356321	398,049491	2,67789274	4,71788817	380,700012
416	19,8	22,1647298	395,070615	467,318793	2,37162222	2,26602234	376,539978

Les histogrammes des Figures 3.10 et 3.11 présentent les différentes présentations entre les éprouvettes d'étude. Les résultats ont clairement montré que l'éprouvette N°45. Parmi les propriétés recherchées : le module de Young E et la résistance à la rupture $R_{p0,2}$ est la plus résistante.

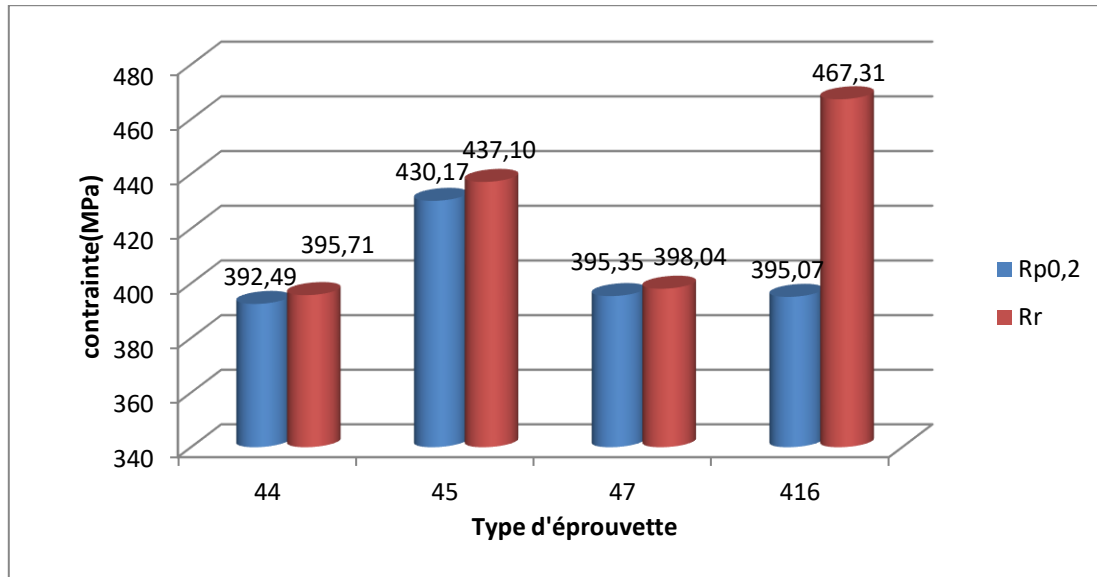


Figure 3.10 : Histogramme représente la différence de la résistance élastique du matériau $R_{p0,2}$ et de la résistance à la rupture R_r pour chaque type d'éprouvette.

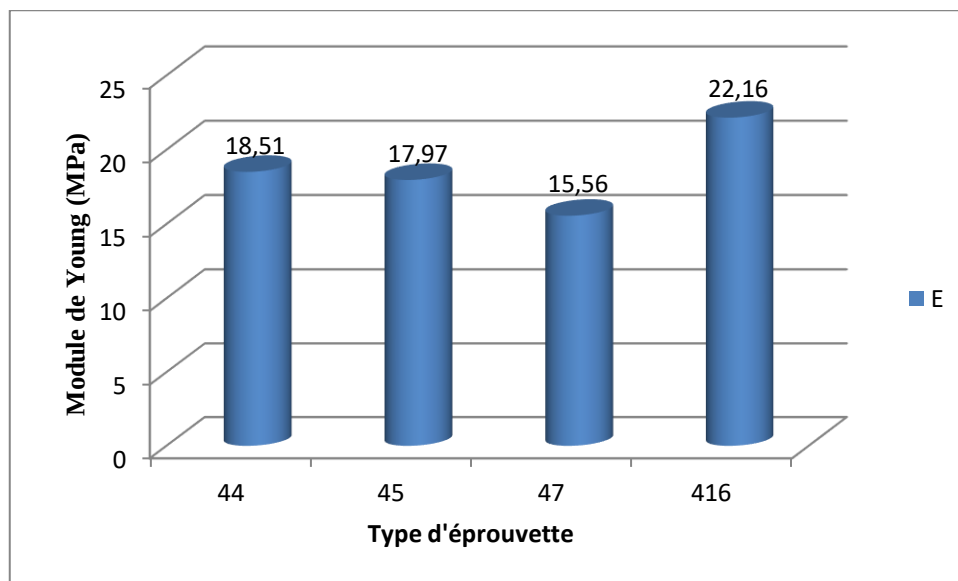


Figure 3.11 : Histogramme représente la différence de module de Young pour chaque type d'éprouvette.

D'après les résultats d'éprouvettes on remarque qu'il existe des variations sur les résultats obtenus dans le module de Young et dans la contrainte à la rupture. Ceci est dû surtout aux défauts

d'élaboration de ce stratifié (bulles, porosités) et aussi à la découpe des éprouvettes (erreurs dans leur dimensionnement ou le processus d'élaboration de matériau).

III.6.4. La comparaison entre fibre de verre unidirectionnelle et sergé

Dans ce paragraphe on va comparer entre les fibres de verre unidirectionnelle (N°45) et sergé (N°300) qui est la plus résistante dans l'essai de traction.



Figure 3.12: L'éprouvette fibre de verre sergé (N°300) avant et après l'essai de traction.

Tableau 3.4 : Les dimensions de fibre de verre sergé N°300.

N°	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
300	200	19,6	1,2

Les résultats de l'essai de traction pour l'éprouvette de fibre de verre sergé N°300 sont donnés dans le tableau 3.4, la surface initiale S_0 en mm^2 , le module de Young en GPa E , la résistance élastique du matériau (l'éprouvette s'est allongée de 0,2 %) $R_{p0,2}$, la résistance à la rupture R_r , Allongement élastique A_ϵ , Allongement à la rupture A_r , le temps de l'essai de traction t_{essai} .

Tableau 3.5 : Résultats expérimentaux obtenus de fibre de verre sergé N°300.

N°	S_0	E	$R_{p0,2}$	R_r	A_ϵ	A_r	t_{essai}
	mm^2	GPa	MPa	MPa	%	%	s
Sergé N°300	28	16,1867823	288,323247	290,886091	2,00296571	1,99937012	312,56994

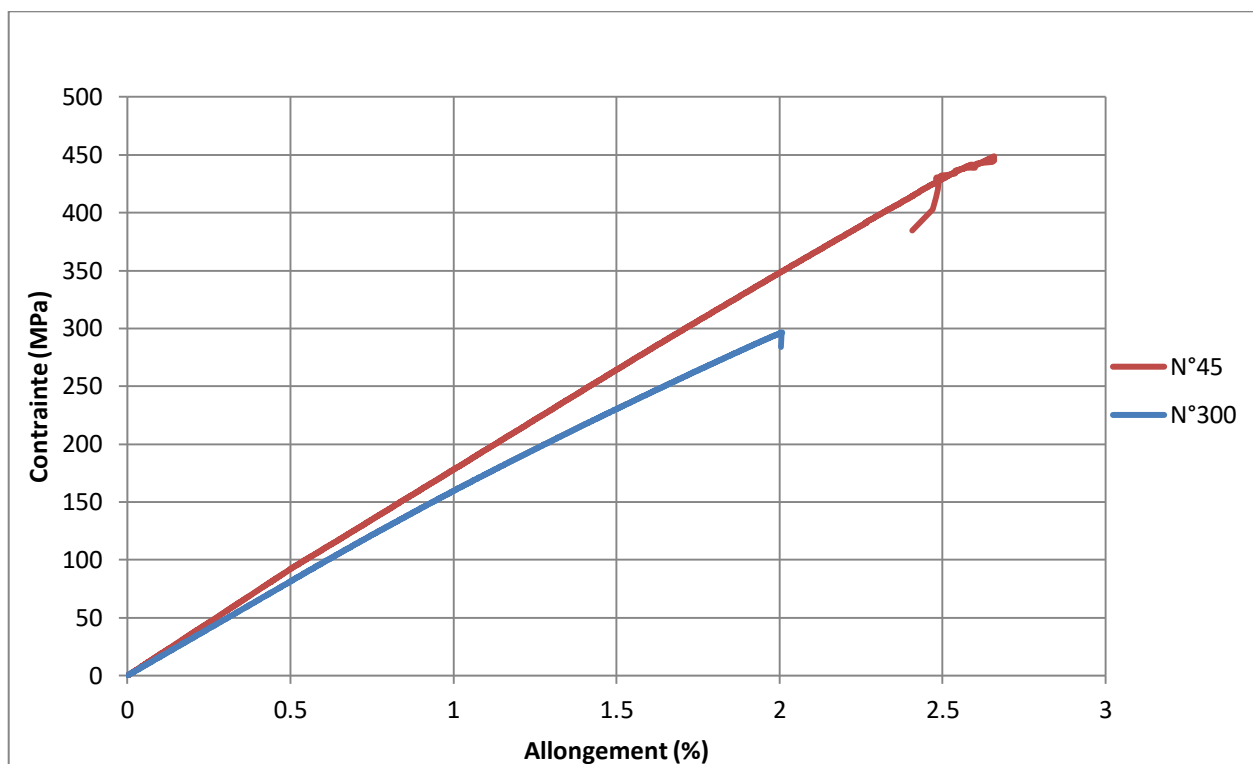


Figure 3.13 : Courbes contrainte allongement des éprouvettes fibres de verre : unidirectionnelle (N°45) et sergé (N°300).

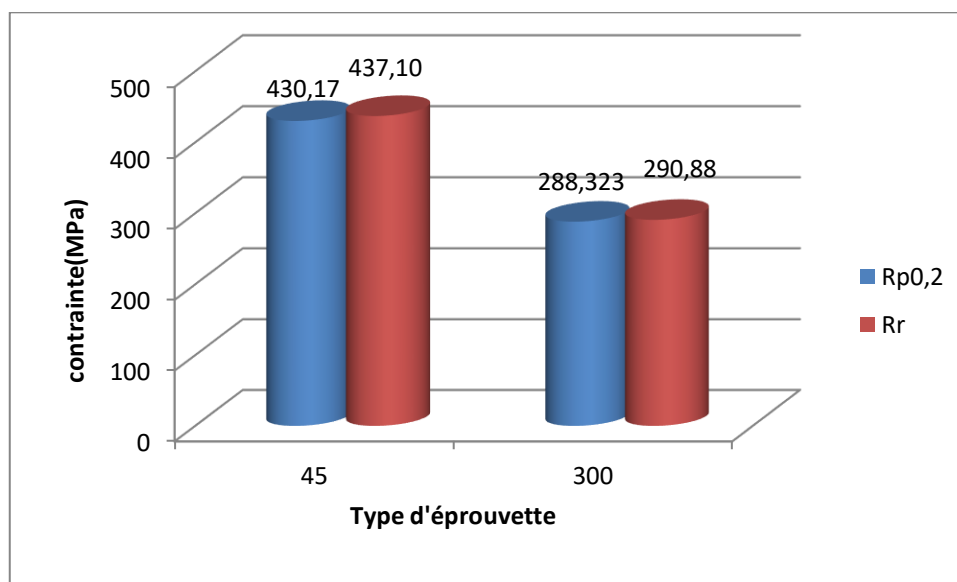


Figure 3.14 : Histogramme représente la différence de la résistance élastique du matériau $R_{p0,2}$ et de la résistance à la rupture R_r entre les éprouvettes de fibre de verre unidirectionnelle N°45 et fibre de verre sergé N°300.

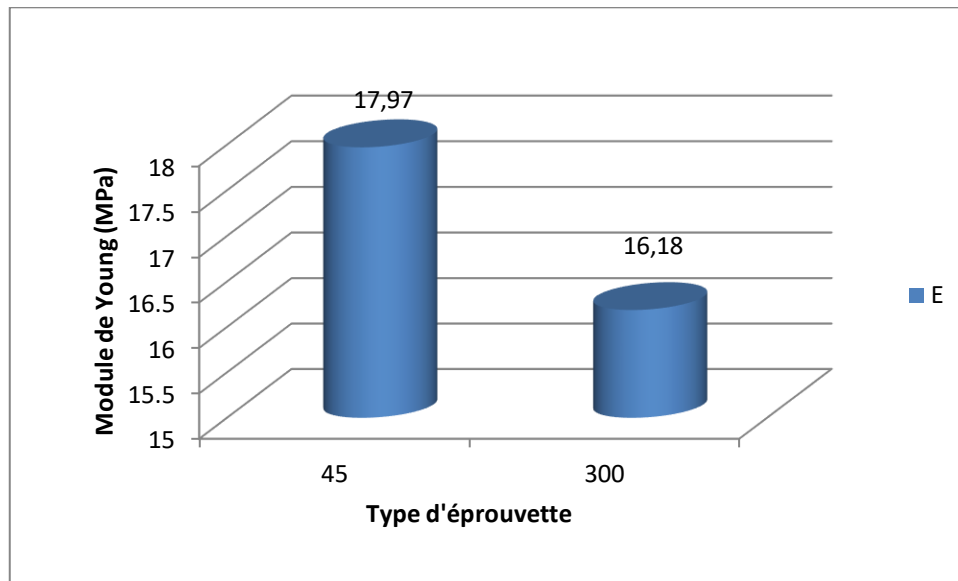


Figure 3.15 : Histogramme représente la différence de module de Young entre les éprouvettes de fibre de verre : unidirectionnel N°45 et sergé N°300.

La résistance du matériau dépend de sa nature et de sa texture. L'éprouvette de fibre de verre : unidirectionnel N°45 et sergé N°300 de nature différentes et à dimensions égales ne présentent pas les mêmes résultats. Dans ce cas la fibre de verre unidirectionnel N°45 a la plus grande valeur de la résistance élastique du matériau a $R_{p0,2} = 430,177005$ MPa que la fibre de verre sergé N°300 $R_{p0,2} = 288,323247$ MPa. Et nous en concluons que la fibre de verre unidirectionnelle est résiste plus de la fibre de verre sergé.

Quatrième Chapitre

**ETUDE MICROSCOPIQUE DES FACIES
DES ENDOMMAGEMENTS**

Chapitre IV

ETUDE MICROSCOPIQUE DES FACIES DES ENDOMMAGEMENTS

IV.1. Différents endommagements des matériaux composites

Pour étudier les endommagements des matériaux composites après l'essai de traction on a coupé l'éprouvette N°416 coupage linéaire CL et coupage tangentiel CT (figure 4.1), et nous les mettons dans microscope électronique à balayage (MEB)(figure 4.2), puisque elle est capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.



Figure 4.1 : Coupage linéaire CL et coupage tangentiel de l'éprouvette N°416.



a) ordinateur transfère les résultats.

b) Chambre de microscope à balayage.

Figure 4.2 : Microscope électronique à balayage (MEB).

Les différents endommagements des matériaux composites sont

- Rupture de matrice ;
- Décohésion ;
- Délaminage ;
- Rupture de fibre.

IV.1.1. Rupture de matrice

La rupture de matrice est la première dégradation qui apparaît au sein des matériaux composites, étant donné que cette dernière est le maillon faible de ses matériaux. Les deux photos représentant la coupe tangentielle à gauche et la coupe longitudinale à droite montrent des ruptures de matrice entre les plis 90/90 et 90/0. Cette dégradation va contribuer au délaminage.

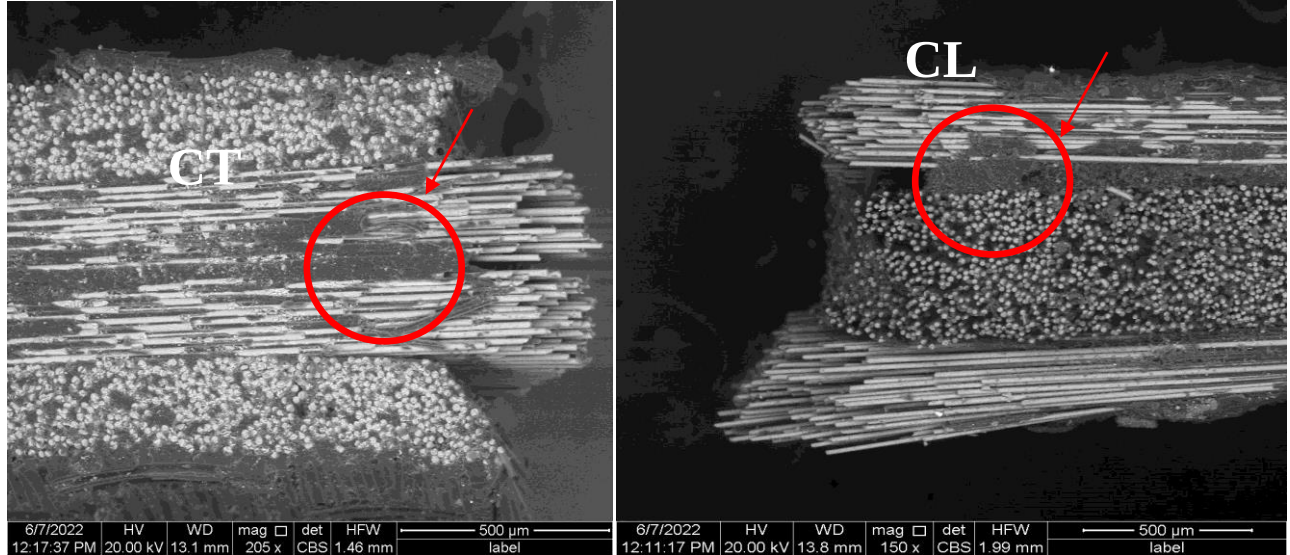


Figure 4.3 : Observation des faciès de rupture de matrice.

IV.1.2. Décohésion

La décohésion se manifeste par une séparation des fibres de leur matrice. Le vide entre les fibres et la matrice laissé par la décohésion va contribuer à la fragilisation du matériau et contribuer au délaminage. La décohésion est observable sur la coupe longitudinale à gauche et transversale à droite des photos.

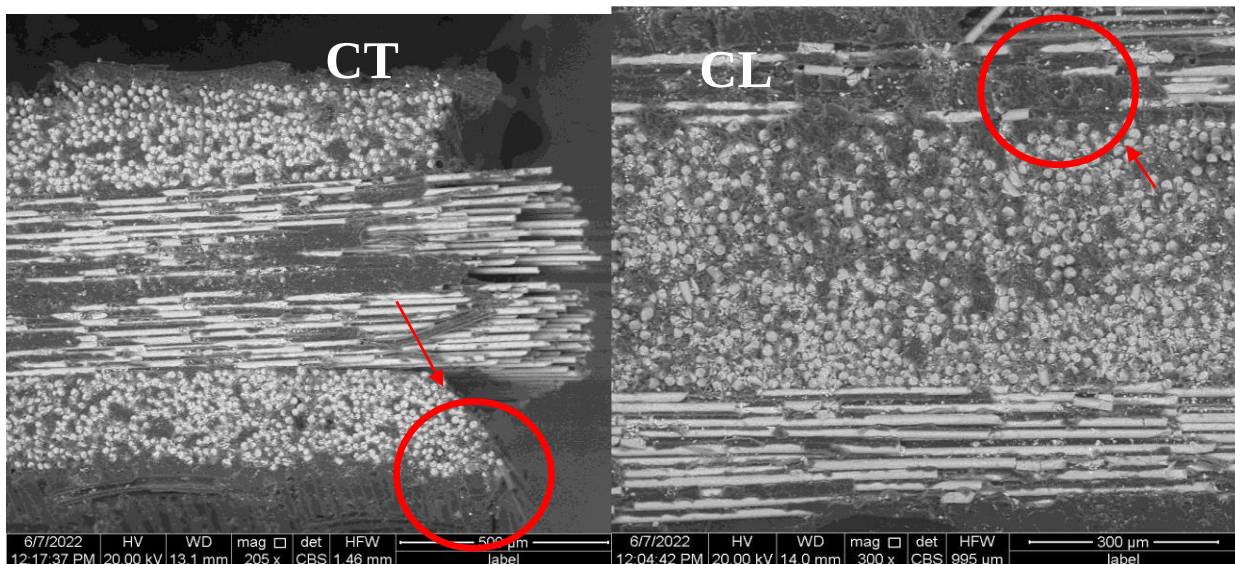


Figure 4.4 : Observation des faciès de décohésion des fibres.

IV.1.3. Délaminage

Un délaminage est observé sur les coupes tangentielle et transversale, par une séparation des différents plis sous l'effet de l'effort de traction. Ce délaminage peut se propager le long des différents plis et affaiblir le matériau en contribuant à sa dégradation et réduire sa durée de vie.

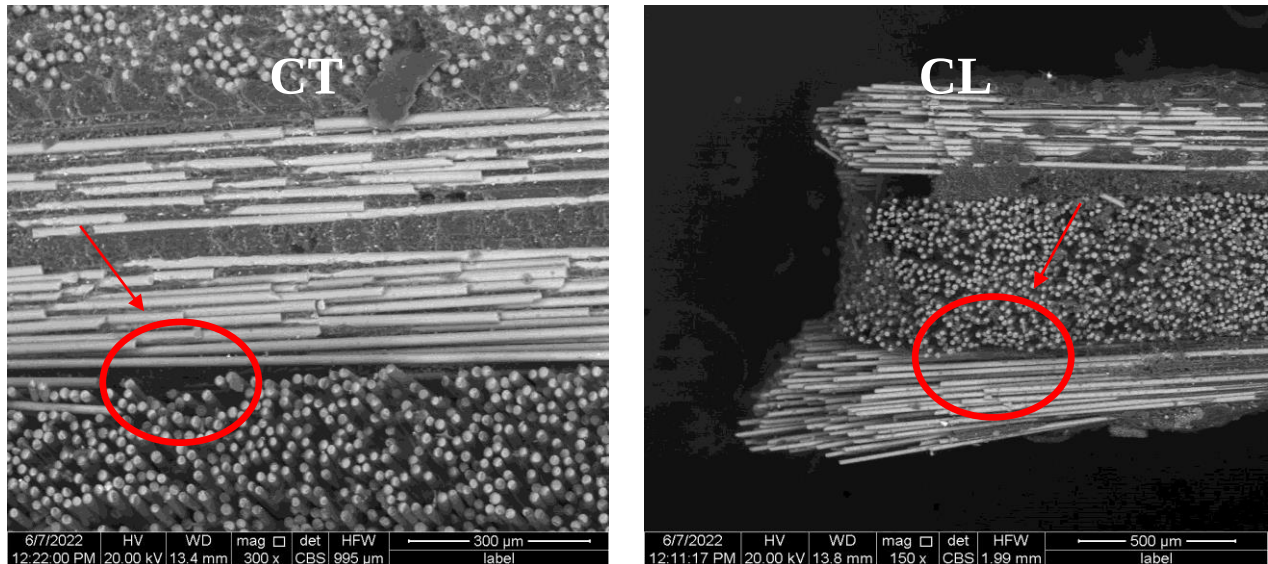


Figure 4.5 : Observation des faciès de délaminage entre des fibres.

IV.1.4. Rupture de fibre

La rupture des fibres et l'étape ultime de fin de vie du matériau composite, elle se fait généralement après la décohésion et le délaminage. Le matériau composite formé de résine et de fibres forme un matériau compact avec une bonne liaison fibres matrice, qui découle d'un bon moulage. La rupture des fibres est observable sur les deux photos, à gauche une coupe longitudinale et à droite une coupe transversale. Cette rupture se fait suite à l'effort de traction.

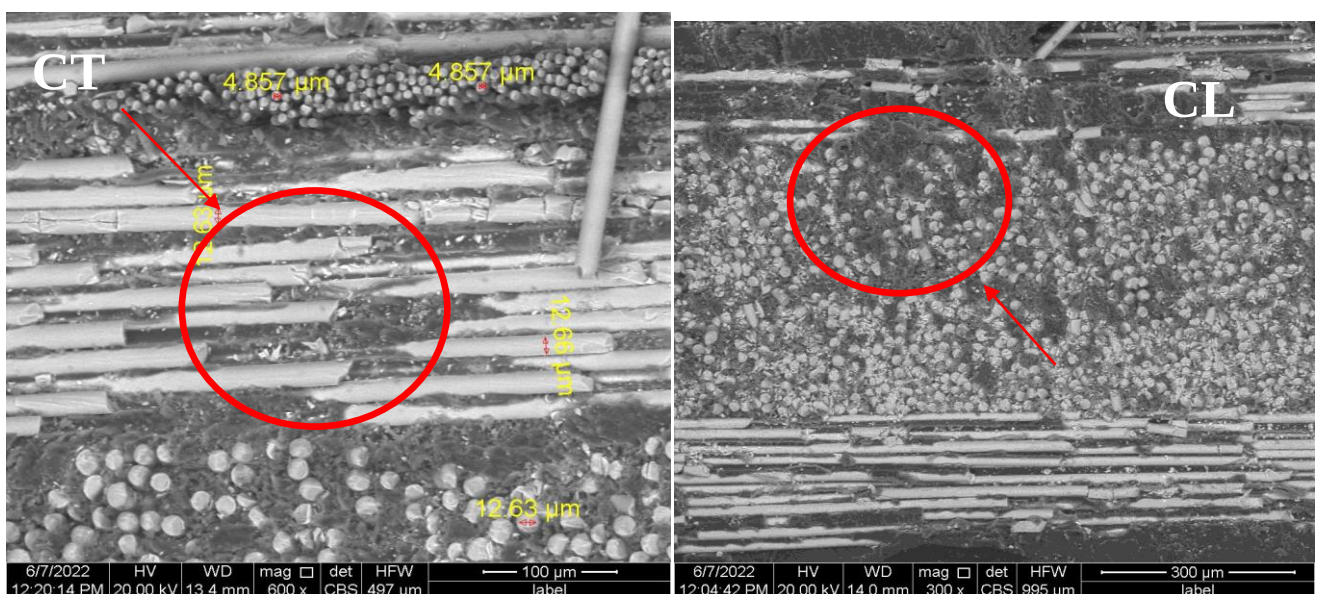


Figure 4.6 : Observation des faciès de rupture de fibre.

Cinquième Chapitre

HYGIENE ET SECURITE AU TRAVAIL

Chapitre V

HYGIENE ET SECURITE AU TRAVAIL

V. Hygiène et sécurité du travail

V.1. Hygiène

L'hygiène corporelle est l'un des moyens simple de prévention contre les maladies professionnelles. Un reflexe : se laver régulièrement les mains (avant la pause, en fin de poste...) permet d'éviter un certain nombre de dermatoses. Ne pas porter ses mains à la bouche, se doucher avant de quitter l'entreprise sont autant de bonnes pratiques. Dans tous les cas, ne pas fumer, ne pas manger, ne pas boire au poste de travail sont des règles simples à appliquer. Les installations sanitaires doivent se trouver proches des postes de travail et en nombre suffisant. N'oublions pas les vêtements de travail, qui seront rangés dans des doubles vestiaires indépendants, nettoyés régulièrement. Ils ne seront jamais transportés au domicile du salarié.



Figure 5.1 : Hygiène avant et après le travail.

V.2. Sécurité

La sécurité repose sur :

- la prévention des risques ;
- la formation du personnel ;

- les moyens d'intervention.

V.2.1. Machine dangereuse (machine de traction)

La machine est livrée avec un certificat CE et un contrôle par un organisme agréé sera effectué avant la mise en service.

V.2.2. Produits chimiques

Comme la résine époxy dans ce cas le personnel sera équipé des équipements de protection individuelle adaptés.

V.2.3. Le risque d'incendie

Les conséquences d'un incendie sur votre sur la santé des personnes. Il est donc indispensable de prévenir le risque incendie et de mettre en place des mesures permettant de limiter les conséquences d'un départ de feu. Le risque incendie existe si l'on est en présence simultanée :

- D'un combustible (ex : un stock de cartons)
- D'un comburant (l'oxygène de l'air le plus souvent)
- D'une source d'ignition ou énergie d'action (ex : une défaillance sur le matériel électrique)

V.2.4. Le risque d'exposition aux vapeurs toxiques, aux poussières de résine et de fibre de verre

Le risque de l'exposition aux toxiques, aux poussières de résine conduit à intoxication par les vapeurs de solvant (effets narcotiques, troubles digestifs), irritation des voies respiratoires et, à plus long terme, cancer des voies respiratoires.

V.2.5. Effets et impacts des COV

Les troubles causés par les COV sur la santé peuvent aller de simples irritations à des troubles beaucoup plus sévères comme des problèmes cardiaques ou l'apparition de cancers. A ce titre ils constituent donc un problème sanitaire à prendre en compte

A. Effets directs

Les COV présentent un caractère irritant pour les yeux, la peau. Les solvants à base de composés halogénés ou aromatiques comme le chloroforme ou le styrène entraînent des irritations cutanées et plus particulièrement des tissus adipeux. Une exposition à certains composés aromatiques peut également entraîner des irritations des yeux, Par ailleurs, à des concentrations plus élevées, d'autres

COV sont aussi à l'origine de troubles cardiaques comme le toluène, le chloroforme ou le trichlorométhane.

B. Effets indirects

Les COV sont des précurseurs de l'ozone troposphérique, reconnu pour ses effets irritants et toxiques. A ce titre, une étude menée par l'Institut Français de Veille Sanitaire (InVS) (Institut de Veille Sanitaire, 1999) évalue une augmentation de la mortalité quotidienne de 2 à 3% pour une augmentation de 50 µg/m³ de la teneur moyenne en ozone pendant huit heures [7]. La présence de COV dans l'atmosphère a donc des effets néfastes aussi bien sur l'environnement (avec pour principal impact l'effet de serre) que sur la santé humaine. Des réglementations ont donc été mises en place afin de limiter les émissions des différentes sources de pollution anthropique

V.2.6. Les instructions relatives à la manipulation sécurisée de ces systèmes et de comprendre les propriétés chimiques.

Des instructions spécifiques existent tant pour le composant époxy que pour le durcisseur, ce qui permet à l'utilisateur de prendre conscience des éventuels problèmes de santé qu'une exposition inappropriée peut représenter. La classification et l'étiquetage de ces matériaux indiquent à l'utilisateur que les composants des systèmes non polymérisés contiennent des substances aux effets potentiellement irritants ou sensibilisants, tout particulièrement en cas de contact direct avec la peau ou les muqueuses. De plus, divers composants portent le symbole « Risque environnemental ».

V.2.7. Les situations de contact possibles avec la résine époxy

Parmi les situations potentiellement dangereuses du quotidien liées à l'utilisation de composants de résines époxy non polymérisées, citons le transport et le stockage de conteneurs, le dosage et le mélange de composants, l'étalement, le grattage, le roulage, la pulvérisation et l'injection du système époxyde, le nettoyage des outils et l'élimination des conteneurs vides et des déchets. Des situations fortuites de contact avec les composants de résines époxy se produisent généralement lorsque l'utilisateur n'est pas correctement équipé, n'est pas vigilant ou qu'il utilise des outils inadaptés. Les situations suivantes sont à éviter :

- Contact cutané ou oculaire par pulvérisation ou déversement
- Port de vêtements, chaussures et gants sales/trempés
- Manches d'outils contaminés
- Réaction chimique accidentelle en raison d'un mauvais dosage ou de l'utilisation de composants inadaptés

- Inhalation de fumées Une fois polymérisées, les résines époxy forment des plastiques inertes. Le contact cutané direct avec des résines époxy correctement polymérisées ne comporte aucun risque pour la santé.

V.3. Consignes de sécurité

Une consigne de sécurité est un ensemble d'information qui complète la prévention des signaux de sécurité. Une consigne de sécurité permet d'apporter des renseignements sur des risques spécifiques possibles (risque électrique, risque d'incendie...) sur la conduite à tenir en cas d'accident (prévenir les services de secours, organiser une évacuation...)

V.3.1. Consignes de sécurité pour le risque d'incendie

Pour prévenir le risque incendie, il convient de faire disparaître l'un de ces trois composants. Le plus souvent, c'est la source d'ignition que l'on va traiter : recherche des défaillances sur le matériel électrique et entretien régulier de ce dernier, prévention des actes de malveillance par la mise en place d'un gardiennage, information des employés (panneaux « Interdiction de Fumer »)...

V.3.2. Consignes de sécurité pour le risque d'exposition aux vapeurs toxiques, aux poussières de résine et fibre de verre

Utilisation des équipements de protection individuelle (EPI - gants, lunettes, masque respiratoire...), formation des employés (risque chimique), analyse des recommandations des fiches de données sécurité (FDS), substitutions des produits dangereux par des produits moins dangereux, ventilation des locaux.

- En cas d'inhalation des vapeurs ou des poussières, amener la personne dans un endroit aéré.
- Rincer abondamment les yeux avec de l'eau et consulter un médecin.
- Rincer la peau avec beaucoup d'eau.

V.4. Equipements de sécurité

Les protections individuelles mises à disposition des salariés sont les suivantes :

- **vêtements de travail ;**

Protéger de santé contre les projections de liquides qui peuvent être contaminés.



- **lunettes, visière ;**

Porter un équipement de protection pour les yeux (lunettes de protection, écran facial ou lunettes de sûreté).



- **chaussures de sécurité, bottes ;**



- **gants de manutention et de protection chimique ;**

Porter des vêtements et des gants de protection: Matériaux et tissus résistants aux produits chimiques.



- **masque à cartouche filtrante, cagoule ventilée ;**



- combinaisons de protection chimique, tablier ;



- protection auditive ;
- casque pour la maintenance ;



- équipements spécifiques en fonction des travaux
- Protection respiratoire

Porter un appareil respiratoire approprié si une exposition à des niveaux supérieurs à la valeur limite d'exposition sur le lieu de travail est probable.



V.3. Vérification des équipements et matériels

Certaines catégories d'équipement font l'objet de contrôles périodiques par un organisme agréé. Il s'agit notamment des :

- installations électriques ;
- éclairage de sécurité ;
- équipement de protection incendie ;

Ces vérifications sont portées sur différents registres et carnets obligatoires à la disposition de l'Inspection des Installations Classées et de l'Inspection du Travail ainsi que du CHSCT. Le suivi de la planification des vérifications est enregistré sur le document DES 014, joint en annexe XVI. Les installations respectent la mise en conformité des équipements de travail selon les nouveaux textes en vigueur.

- **Equipements de sécurité d'un système d'essai (dans ce cas machine de traction)**

L'équipement de sécurité d'un système d'essai dépend de l'application correspondante, du site d'installation, du type d'essai, des outillages d'essais utilisés et éprouvettes testées.

Afin d'éviter tout dommage matériel et corporel, assurez-vous que les éprouvettes et appuis utilisés ne sont sujets ni à chute ni à projection en dehors de l'espace d'essais pendant leur mise sous charge ou en cas de défaillance du système d'essai.

Les indications formulées à cet égard pendant la vente ou applications définies par contrat se limitent à l'utilisation conforme à la destination. Le pour la réalisation d'essais convenus.

V.5. Respect des consignes de sécurité

- **Attention** : Bannière polluante



- **Attention** : matériau combustible



- **Attention** : un contact prolongé ou répété peut provoquer des irritations cutanées.



- **consignes de sécurité pour la résine époxy**

En cas de contact avec les yeux : rincez immédiatement et abondamment l'œil contaminé avec de l'eau propre (douche oculaire, 10-15 min) et consultez un médecin.

En cas de contact avec la peau : ôtez immédiatement les vêtements contaminés, lavez les zones touchées avec précaution à l'eau et utilisez au besoin un nettoyant pour la peau adapté ; couvrez les éventuelles lésions avec un matériau stérile (kit de premiers secours) et consultez un médecin si la contamination est critique.

En cas d'inhalation : déplacez immédiatement la personne dans une zone bien aérée et consultez un médecin. En cas d'ingestion : buvez de grandes quantités d'eau, ne provoquez pas de vomissements et consultez un médecin.

➤ **Manipulation des systèmes époxydes en toute sécurité**

Transport et stockage : les directives à suivre en matière de transport des composants des systèmes époxydes sont délivrées par le fournisseur. Les composants doivent être stockés dans des conteneurs hermétiques, dans un endroit sec et frais désigné comme zone de stockage des matériaux. Les conteneurs ne peuvent en aucun cas être stockés dans des espaces inadaptés, tels que des toilettes ou des zones temporaires sur le site de construction.

Dosage : les composants préalablement dosés sont fournis sous la forme de kits prêts à l'emploi dans lesquels la bonne proportion résine/ durcisseur est préalablement établie. Lorsque l'utilisation de tels systèmes s'avère impossible, il est recommandé d'avoir recours à des systèmes de mélange et de dosage techniques, p. ex. des pompes à tambour avec débitmètres, de grands conteneurs avec robinets et débitmètres ou des systèmes de basculement. Des dispositifs de dosage distincts doivent impérativement être utilisés pour chaque composant de la résine époxy non polymérisée afin d'éviter que la polymérisation se déclenche de manière accidentelle même si, pour faciliter la manipulation, les producteurs définissent un rapport de mélange par volume, le dosage par poids peut occasionnellement s'avérer nécessaire. De nouveau, les composants doivent être pesés séparément avant leur mélange.

Mélange : l'objectif principal consiste à éviter toute éclaboussure ou tout déversement dans la zone environnante. Des équipements spécialement conçus à cet effet peuvent permettre de réduire de manière significative les éventuelles expositions aux éclaboussures ou aux déversements involontaires lors du mélange. Les équipements suivants doivent être utilisés pour réduire les risques :

- Des mélangeurs avec un variateur de vitesse
- Des outils de mélange adaptés (conformément aux informations données par les fabricants)
- Un couvercle de protection doté d'un orifice pour le passage du mélangeur
- Des stations de mélange (pour les quantités importantes)
- Un mélangeur à action forcée
- Un mélangeur statique, surtout lors d'injections dans les fissures

Nettoyage des outils : pour assurer la sécurité de tous les collaborateurs, les outils, et particulièrement les manches, doivent être nettoyés après utilisation. Pour ce faire, il convient de racler les matériaux résiduels et/ou d'utiliser des produits de nettoyage recommandés par le producteur. Les produits de nettoyage pour les outils ne doivent jamais être utilisés sur la peau.

Elimination des déchets : les résines époxy non polymérisées ne doivent pas être jetées. Cependant, si leur élimination est nécessaire, elle doit se faire conformément aux réglementations locales. Les résines époxy polymérisées peuvent généralement être éliminées comme des déchets de construction classiques, bien que les spécialistes doivent toujours veiller à respecter les réglementations locales. Les conteneurs à usage unique doivent être vidangés et jetés correctement. Ils peuvent en effet encore contenir des résidus.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le monde de l'élaboration des matériaux composite est un monde innovant, en plein expansion, les découvertes sont toujours possibles et les combinaisons entre les propriétés des matériaux sont toujours envisageables. Nous avons mené une étude expérimentale pour trouver les effets de traction sur le matériau composite fibre de verre unidirectionnelle et comparer leur résistance avec la fibre de verre sergé.

A travers le troisième chapitre, nous avons remarqué que les courbes allongement-contrainte sont linéaires élastiques avec des pentes différentes dénotant une variation légère des modules d'élasticité à la traction des éprouvettes testées. Une dispersion des résultats a été observée pour les valeurs des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en traction. Elle est liée principalement au mode de mise en œuvre des stratifiés, au taux de fibre et à leur disposition dans la structure des matériaux. Et on conclue que la fibre de verre unidirectionnelle plus résiste que la fibre de verre sergé, par ailleurs la fibre de verre sergé et perlon est largement utilisé dans la fabrication puisque elle est très facile à la fabrication que la fibre de verre unidirectionnelle

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://solutionscomposites.fr/les-composites/les-materiaux-composites/>
- [2] BERTHELOT JM. (2012). Mécanique et analyse des structure 5^e édition, Lavoisier Paris IBBN.
- NADIA B. Cours matériaux composites/dess mécanique avancée et stratégie industrielle.
- [3] DJEBLOUN Y., HECINI M., DJOUDI T., GUERIRA B. (2018). Experimental determination of elastic modulus of elasticity and poisson's coefficient of date palm tree fiber, journal of natural fibers.
- [4] Taqiyeddine MOUMENE. Les composites
- [5] M. Charretton, M. Falcy, J. Triolet, Peintures en phase aqueuse (ou peintures à l'eau) : Composition, risques toxicologiques, mesures de prévention, Edition INRS ED 955, 2006.
- [6] R. Lebreton, A. Guilleux, Peintres en solvants : Composition, risques toxicologiques, mesures de prévention), Edition INRS ED 971, 2009
- [7] K, Aoudia, F, Arkak, Elaboration et caractérisation d'un mastic à base d'une résine polyester : Application à la réparation automobile, Mémoire de D.E.U.A , Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2008.
- [8] LAURENT GORNET (2008) généralité sur les matériaux composites, researchgate
- [9] MARTIN LÉVESQUE (2000) "L'ESSAI DE TRACTION DE MATÉRIAUX COMPOSITES UNIDIRECTIONNELS À FIBRES CONTINUES"