

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme du MASTER académique

En Génie Mécanique

Option : génie des matériaux

Thème

Elaboration et caractérisation d'un matériau composite chargé en poudre d'élastomère

Proposé par :

AZEM Said

Réalisé par :

-IGUENI Tinhinane

-BENAMARA Lydia

Dirigé par :

MOHELLEBI Fadila

Promotion 2018/2019

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu le Bon Dieu de nous avoir donné le courage d'aller au bout de notre objectif.

Nous remercions profondément notre promotrice Madame MOHELLEBI F, avons d'avoir accepté de diriger notre travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui nous ont permis de travailler tranquillement.

En n'adresse plus vifs remerciements et reconnaissances à Mr MOHELLEBI M pour sa disponibilité et aide précieuse.

Nous remercions les membres du jury qui font l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions les membres des laboratoires de: l'université UMMTO

Laboratoire Matériaux, Procédés et Environnement (Boumerdes) l'EI(AZAZGA), pour leur aide précieuse.

Nous remercions les membres de la société SAKOMAS, en particulier son PDG.

Nous remercions nos camarades de promotion pour leur soutien. notre sincères remerciements vont à tous nos enseignants.

Nous remercions également tous ceux et celles qui de, près ou de loin, nous avons porté aide et encouragement.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chères parents ainsi que mes chères sœurs Lynda et Kamilia et mon petit frère Mohamed et mes grand mères et grand père, tout mes tantes, et leurs familles ainsi que leurs enfants chaque un par son nom.

A ma deuxième famille la section génie des matériaux promotion 2019, mes frères (Hilal, Arezki, Mohamed, Malik, Ahmed, Massi, Hameza), et mes sœurs Nadia, Nawel, Zahra, Lydia, Hajira, Lynda, Hassina, Fadila)

A MONSIEUR TAHAR BOUAFIA qui m'a toujours soutenu, je lui exprime ma profonde gratitude, et je le dédie à sa famille.

A mon cher ami SYFAX AIT SA qui ma donner l'aide et beaucoup de confiance en moi-même.

A monsieur chetouani fodil et sa famille.

A ma binôme BENAMARA LYDIA et toute sa famille.

TINHINANE

Dédicaces

**Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage et volonté
pour réaliser ce modeste travail**

**A celle qui ma donnée la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifié pour
mon bonheur et ma réussite à ma mère**

**A mon père, école de mon enfance ; qui a été mon ombre durant toutes les
années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie m'encourager à me
donner l'aide et à me protéger Que dieu les garde et les protèges**

A Mes frères et sœurs et leurs familles

A la mémoire de ma tante (fatma)

A ma binôme

A mes amis et amies

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que j'aime

A vous

Lydia

Liste des figures

Figure I.1 : Matériau composite

Figure I.2 Classement des matériaux composites selon la morphologie du renfort

Figure I.3 : Les différents types des matrices

Figure I.4 : Les structures géométriques des composites

(Fibres longues, fibres courtes et particules)

Figure I.5 : Principaux types de tissages.

Figure I.6 : principales orientations des fibres

Figure I.7 : principe de moulage au contact.

Figure I.8 : principe de moulage par projection simultanée.

Figure I.9 : Moulage sous vide.

Figure I.10: principe de moulage par injection de résine

Figure I.11 : principe de moulage a la presse a froid

Figure I.12 : principe de moulage par compression.

Figure I.13 : Enroulement filamentaire.

Figure I.14 : composite stratifié

Figure I.15 : Constitution d'un sandwich.

Figure I.16 : Construction des navires en matériaux composites

Figure I.17 : Différents demi-produits issus des pneus usagés

Figure II.1 Traction longitudinale

Figure II.2 : Traction transversale

Figure II.3 : Traction hors axes

Figure II.4 : Courbe conventionnelle d'un essai de traction

Figure II.5 : Machine de flexi

Figure II.6 : Essai de flexion 3point

Figure II.7 : courbe de contrainte déformation pour un matériau ductile

Figure III.1: Préparation de la résine polyester

Figure III.2 Le renfort en fibre de verre

Figure III.3 La poudre de caoutchou utilisée comme charge du matériau composite

Figure III.4 : la balance

Figure III.5 : mélangeur électrique

Figure III.6 élaboration des moules

Figure III.7 la cire utilisée pour le démoulage des échantillons

Figure III.8 : Les tamis utilisés pour séparer

Figure III.9 Micro-onde

Figure III.10 Etuve utilisée pour le traitement des échantillons

Figure III.11 a) Machine de traction de marque Zwick/Roell

Eprouvettes de traction

Figure III.12 Essai de flexion trois points

Figure III.13 principe de l'essai Knoop

Figure III.14 Essai de micro dureté a) Micro d'uroètre, b) empreinte knoop

Figure III.15. Dispositif d'essai de résilience

Figure IV.1. Superposition des courbes de traction de la résine seule et de la résine chargée en poudre de caoutchouc

Figure IV 2: Matériau composite non chargé

Figure IV 3 : Courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV 4: Superposition des courbes de traction des composites chargés en poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV 5 : Courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée. a) 1% de poudre traitée, b) : 5% de poudre traitée

Figure IV6 : Superposition des courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée. a) 1% de poudre traitée, b) : 5% de poudre traitée

Figure IV7 Histogramme variation du module d'élasticité en fonction de la charge

Figure IV8 Histogramme variation de la contrainte maximale en fonction de la charge

Figure IV9 Histogramme variation de l'allongement en fonction de la charge

Figure IV.10 courbe force-flèche du matériau résine polyester

Figure IV11. Courbes force-flèche du matériau résine polyester chargé en poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV12. Superposition des courbes force-flèche du matériau résine polyester chargé en poudre de caoutchouc

Figure IV13 Histogramme de la variation de la flèche en fonction du taux de charge non traitée avec tous les pourcentages

Figure IV 14 Histogramme de la variation de la force maximale en fonction du taux de charge

Figure IV15. Courbes force-flèche du matériau composite résine polyester fibre de verre

Figure IV16. Courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV 17 superpositions des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV18 .histogramme de la variation de la force maximum en fonction du pourcentage de charge non traitée

Figure IV19 .histogramme de la variation de la flèche en fonction du pourcentage de charge non traitée

Figure IV20. Courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée

Figure IV21. Superposition des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée 1% de charge et 5% de charge

Figure IV 22 Superposition des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée et non traitée 1% et 5% de charge

Figure IV23 Variation de la résilience du Matériau composite en fonction du taux de la charge de caoutchouc traitée

Figure IV24 Variation de la résilience du Matériau composite en fonction du taux de la charge de caoutchouc non traitée

Figure IV25 Variation de la résilience de la résine en fonction du taux de la charge de caoutchouc non traitée

Figure IV 26 spectres de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée

Figure IV 27Le spectre de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée

Liste des tableaux

Tableau I.1 Avantages et inconvénients de la matrice thermoplastique

Tableau I.2 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables

Tableau I.3 : Constitution moyenne en masse des pneus Tableau

Tableau III.1: Fiche technique de la résine

Tableau III.2 : Fiche technique du mouton pendule

Tableau IV.1 : Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527

Tableau IV. 2 : Caractéristique mécanique en traction des matériaux composites

Tableau IV. 3 : Caractéristique mécanique en traction des matériaux composites

Tableau IV.4 : Dimensions en mm des éprouvettes de flexion. Selon la norme ISO 178

Tableau IV.5 : flèche maximale et force maximale dans le cas de la poudre non traitée

Tableau IV. 6 : caractéristique du matériau composite en flexion

Tableau IV.7 : résultats de l'essai de résilience

Tableau IV.8 : résultats de l'essai de micro dureté

Tableau IV.9 : résumé des résultats de l'essai de micro dureté

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites	
I.1. Définition d'un matériau composite	03
I.2. Classification des matériaux composites	04
I.2.1 Classement suivant la nature des constituants	04
I.2.2 Classement suivant la morphologie	04
I.3 Constituants des matériaux composites	05
I.3.1 Matrice	05
I.3.2. Les renforts	08
I.3.2.1 Principales catégories des renforts	08
I.3.2.2 Architecture de renforcement	10
I.3.3 Les charges et les additifs	11
I.3.3.1 Les charges	11
I.3.3.2 Les additifs	12
I.4 Les Procédées de fabrication	12
I.4.1 Les technologies dites en moule ouvert	12
I.4.1.1 Moulage au contact	12
I.4.1.2 Moulage par projection simultané	13
I.4.2 Les technologies dites en moule fermé	14
I.4.2.1 Moulage sous vide	14
I.4.2.2 Moulage par injection basse pression de résine (RTM)	15
I.4.2.3 Moulage à froid	16
I.4.2.4 Moulage par injection de compound BMC	16
I.4.2.5 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC	16
I.4.2.6 Moulage par enroulement filamentaire	17
I.5 Architecture du composite	17
I.5.1 Les monocouches	17
I.5.2 Les stratifiées	18
I.5.3 Les sandwiches	18
I.6 Caractéristiques des matériaux composites	19
I.7 Domaines d'application	19
I.8 Les matériaux composites dans la construction navale	20
I.8.1 Activités de la construction navale	20
I.8.2 Les matériaux de construction d'un navire	21

I.8.3 La construction des navires en matériaux composites.....	21
I.9 Généralités sur le caoutchouc.....	22
I.9.1 Rappel historique sur les caoutchoucs	22
I.9.2 Les pneumatiques et leurs déchets.....	22
I.9.3 Composition des pneumatiques	22
I.9.4 Possibilités de valorisation	23
I.9.5 La valorisation mécanique.....	24
I.9.6 La dé vulcanisation	24
I.9.7 Traitement de la poudrette.....	25

Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composites

II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites	26
II.2 Mode d'essais mécaniques	27
II.2.1 Essai de traction.....	27
II.2.1.1 : Traction longitudinale	28
II.2.1.2: Traction transversale	29
II.2.1.3 : Traction hors axe	29
II.2.2 Essai de flexion	30
II.2.2.1. Essai de flexion trois points	31

CHAPITRE III : Techniques Expérimentales

III.1. Matériaux utilisés	34
III.1.1 Matériaux utilisés pour l'élaboration des échantillons	34
III.1.1.1 Résine	34
III.1.1.2 Durcisseur.....	34
III.1.1.3 Les renforts.....	35
III.1.1.4 Les charges.....	35
III.1.2 Le matériels utilisés pour l'élaboration des échantillons	36
III.1.2.1 La Balance.....	36
III.1.2.2 Mélangeur	36
III.1.2.3 Le moule	36
III.1.2.4 La cire.....	37
III.1.2.5 Les tamis	37
III.1.2.6 Le micro-onde	37
III.1.2.7 Etuve pour le traitement thermique	38

III.2 Les étapes suivies pour l'élaboration des éprouvettes.....	39
III.3. Techniques de caractérisation.....	39
III.3.1 Caractérisation mécanique.....	39
III.3.1.1 Essai de traction	39
III.3.1.2 Essai de flexion	40
III.3.1.3 Essai de micro dureté.....	40
III.3.1.3 Essai de résilience.....	42

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV. 1 Résultats de la caractérisation mécanique	44
IV. 1.1 Résultats des essais de traction	44
IV.1.1.1 Résultats des essais de traction de la résine	45
IV. 1.1.2 Résultats des essais de traction du matériau composite	45
IV.1.1.3 Résultats des essais de traction matériau composites chargées en poudre de caoutchouc traitée.....	47
IV.1.2 Résultats des essais de flexion	50
IV.1.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine seule.....	50
IV.1.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en poudre de caoutchouc non traitée	51
IV.1.2.3 Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre)	54
IV.1.2.4 Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre et chargée en poudre de caoutchouc)	55
IV.1.3 Résultats de l'essai de résilience	59
IV.1.4 Résultats de l'essai de micro dureté	61
IV.2. Résultats de la caractérisation DRX	63
Conclusion générale	69

Introduction générale

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

Un matériau composite résulte de l'association de deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour tenter d'accroître leurs performances. Les deux constituants du composite sont la matrice et le renfort, qui en se combinant donnent un matériau hétérogène souvent anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés diffèrent suivant les directions. Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite.

Les matériaux composites sont une classe de matériaux de plus en plus prisée dans les domaines sport et aéronautique où les propriétés mécaniques requises sont la résistance à la chaleur ou à l'eau.

Le matériau composite de notre étude est constitué d'une résine thermdurcissable renforcé avec un roving en fibre de verre et chargé par des particules d'élastomères afin d'améliorer l'élasticité de notre matériau et diminuer les effets de vibration et par souci d'économie, augmenter la masse volumique du matériau.

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Chaque année, des centaines de millions de pneus hors d'usage sont générés et cumulés dans de nombreux pays du monde.

Parmi les domaines de valorisation des pneus usagés, le broyage représente la voie la plus prometteuse permettant de les réduire en copeaux en vue de l'obtention de poudrettes ou de granulés.

Le but de notre projet est l'élaboration d'un matériau composite renforcé et chargé. Nous procéderons ensuite à la caractérisation mécanique et physique, dans le but de cerner ses différentes propriétés.

Dans notre étude on s'est intéressé à l'influence de la charge de la poudre des pneus sur le comportement mécanique du matériau composite.

Notre travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique, il comporte une présentation des matériaux composites. Il expose des généralités et des méthodes utilisées pour l'élaboration des matériaux qui font l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre concerne le comportement mécanique des matériaux composites. Nous donnons quelques détails de comportement en traction. Flexion. Résilience.

Dans le troisième chapitre : on présente les techniques et procédures expérimentales utilisées pour l'élaboration et la caractérisation de nos échantillons.

Nous exposons et discutons nos résultats dans le dernier chapitre, nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Généralités sur les Matériaux composites

I. Généralités sur les matériaux composites

Introduction :

Il existe différentes familles de matériaux: les métaux, les polymères, les céramiques... Les matériaux composites peuvent être une combinaison de ces trois familles, ils ne sont pas une nouveauté, ils ont été utilisés par l'homme depuis très longtemps, citons par exemple le bois, le béton.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents constituants des matériaux composites, la deuxième partie est consacrée à la présentation de la charge élastomère, la poudre de caoutchouc, qu'on utilisera comme charge dans notre étude.

I.1 Définition : [1]

Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux constituants qui occupent des phases différentes. Ces constituants sont disposés selon une organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément.

Il est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Les matériaux composites disposent d'avantages importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels :

- > Légèreté
- > Résistance mécanique et chimique
- > Maintenance réduite
- > Liberté de forme et une bonne isolation électrique

Constituants des matériaux composites :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

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

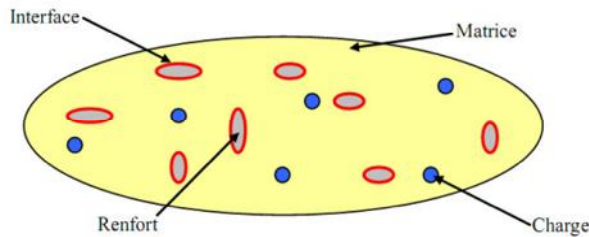


Figure I.1 : Matériau composite.

I.2 Classification des matériaux composites :[2]

La classification des composites peut être effectuée selon la nature des constituants et suivant la forme du renfort.

I.2.1 Classement suivant la nature des constituants

Cette classification s'intéresse à la nature de la matrice du matériau composite :

- **Composites à matrice organique** : (résine, charges) avec :
 - Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
 - Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
 - Fibres métalliques : bore, aluminium, etc. ;
- **Composites à matrice métallique** : (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
 - Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
 - Des fibres métalliques : bore ;
 - Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium(BSiC).
- **Composites à matrice minérale : (céramique), avec** :
 - Des fibres métalliques : bore ;
 - Des particules métalliques : cermets ;
 - Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

I.2.2 Classement suivant la forme du renfort (morphologie)

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (**Fig.I.2**):

- **Composites à renforts de particules** : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
- **Composites à renforts de paillettes** : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin

d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- **Composites à renforts de fibres** : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts: en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- **Composites stratifiés** : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles :
Les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales).

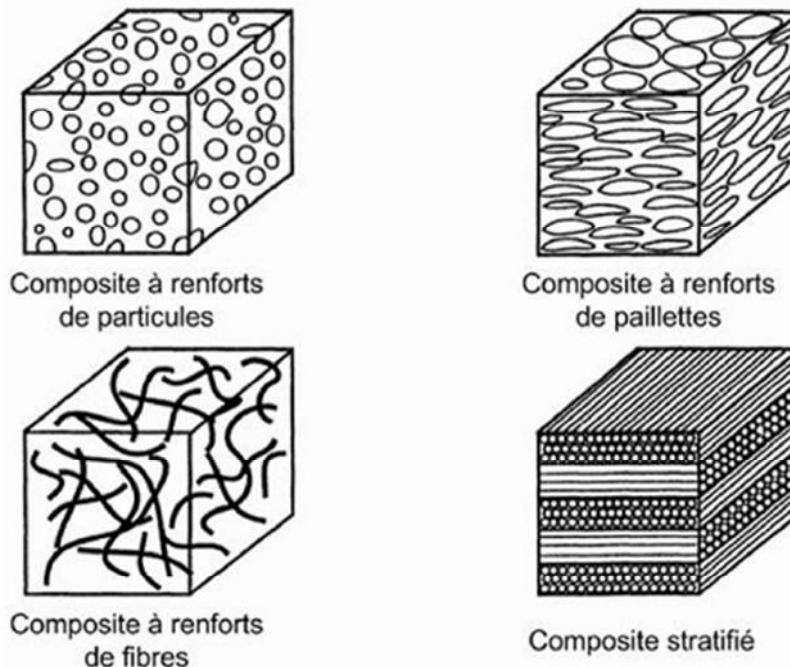


Figure I.2 : Classement des matériaux composites selon la morphologie du renfort

I.3 Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué essentiellement d'une et d'un renfort

I.3.1 Matrice : [2]

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont :

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques.
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs.

- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales).

La **Figure.I.3** présente les différents types de matrices.

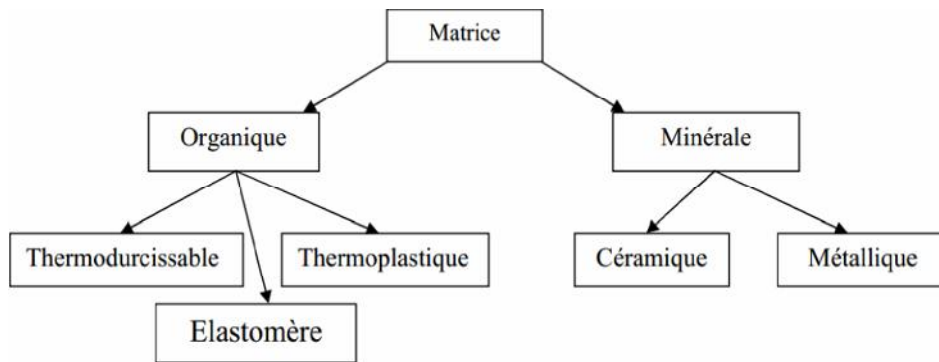


Figure I.3 : Les différents types des matrices

Les matrices les plus employées sont les matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

a) Matrices thermoplastiques :

Les matrices ou les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux.

Tab I.1 : Avantages et inconvénients de la matrice thermoplastique

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre - Possibilités de retransformation - Meilleure ténacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Une faible tenue en température - Peu de résistance aux solvants

b) Matrices thermodurcissables :

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation » ou « cycle de réticulation ».

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- **Résine polyester** : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.
- **Résine époxyde** : les résines époxydes se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger :
 - ✓ Une **résine principale** portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible.
 - ✓ Un **diluant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organiques, en général) ; c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué.
- Un **flexibilisant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible.
- Un **durcisseur** portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).
- **Résine phénolique** : ayant de moins bon propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenu au feu.
- **Résine polyamide** : d'un emploi relativement difficile et cher, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C).

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées.

On donne une comparaison entre les différentes résines dans le tableau I.2 ci-dessous.

Tab I.2 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
<i>Caractéristiques</i>	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
<i>Mécanique</i>				
<i>Tenue aux chocs</i>	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
<i>Tenue en fatigue</i>	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
<i>Pouvoir adhésif</i>	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon

<i>Température Maxi d'utilisation</i>	140°C	130°C	190°C	260°C
<i>Tenue au feu</i>	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
<i>Retrait</i>	Important	Faible	Très faible	Très faible
<i>Durée de polymérisation</i>	Courte	Courte	Longue	Moyenne

I.3.2 Les Renforts : [1]

Le renfort est le constituant qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques: la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont de propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible cout.

I.3.2.1 Principales catégories des renforts

Il existe un grand nombre des renforts sous forme de fibres que l'on peut diviser en quatre grandes catégories :

- **Les fibres naturelles:** il s'agit essentiellement de fibres végétales (lin, chanvre, sisal, jute, etc.) ou animales (poiles et la soie de sécrétion) ;
- **Les fibres artificielles:** elles sont obtenues après dissolution de matières naturelles et filage de la solution par un procédé d'extrusion. Les fibres les plus utilisées sont : **les fibres de viscose** haute ténacité.
- **Les fibres synthétiques :** ces fibres sont obtenues par filage d'un polymère synthétique et mise en œuvre à partir d'un procédé d'extrusion/filage par voie fondu ou solvant. Les principales variétés sont : polyamides, polyesters polyoléfinés, chlorofibres, fibres de PVA et les thermoplastiques hautes performances.
- **Les fibres de spécialité :** cette catégorie regroupe les fibres les plus utilisées dans l'industrie :
 - 1) **Fibres organiques à haute performance**
 - (a) **Mécanique :** para-aramides (Kevlar, Twaron), para-polyéthylène haute ténacité ;
 - (b) **Thermique :** méta-aramide, polyamide-imide copolyimide
 - (c) **Mécanique et thermique**
 - 2) **Fibres inorganiques**
 - Fibres de verre.- fibres de basalte (issues des roches volcaniques).- fibres céramiques haute température. fibres de carbone.- fibres métalliques.

3) Présentation commerciales des renforts fibreux

a) Fibres discontinues

Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudres), améliorent le comportement mécanique du matériau composé de la matrice seule, mais celle-ci reste l'élément de base et on obtient un polymère renforcé.

b) Fibres continues

Celles-ci jouent un rôle principal dans le comportement mécanique du composite, la fonction de la matrice étant, en particulier, d'empêcher les déplacements relatifs des fibres continues.

C'est ce type de composites qui est utilisé dans les applications structurelles fortement sollicitées.

Sur la figure I.4 on représente

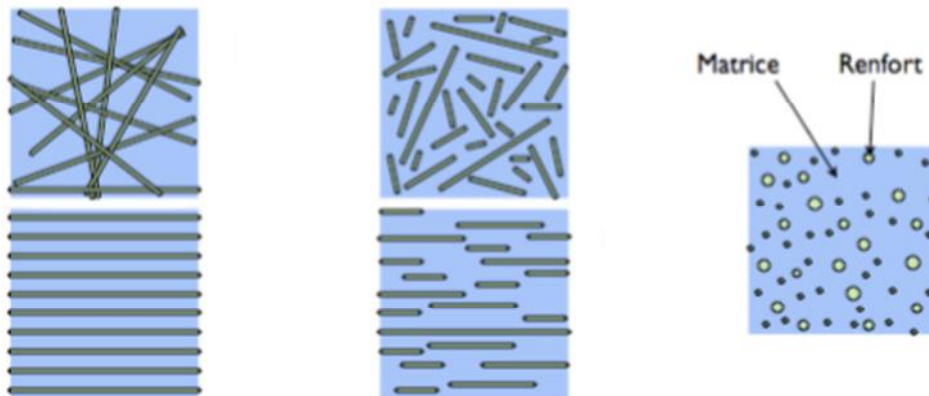


Figure I.4 : Les structures géométriques des composites

(Fibres longues, fibres courtes et particules)

Les renforts continus se trouvent sous plusieurs formes commerciales :

➤ **Nappes unidirectionnelles**

Elles sont constituées de fibres parallèles entre elles orientées dans une seule direction. La cohésion transversale est assurée :

- Pour les prés imprégnés, par la résine.
- Pour les nappes sèches : Soit par un ruban adhésif déposé suivant un pas déterminé, soit par un léger tissage, on obtient un tissu unidirectionnel dans lequel la masse de fibres dans le sens chaîne présente plus de 70% de la masse totale.

➤ **Tissus**

Les fibres (mono filaments) sont en général rassemblées en mèche (ou fil), éventuellement réunies par torsion. Le renfort tissé est constitué par l'entrecroisement de fils de chaîne

(suivant la direction d'enroulement sur son support) et des fils de trame (déposés perpendiculairement). Un tissu est équilibré si le poids de chaîne est égal au poids de trame.

Les armures les plus courantes utilisées sont les suivantes :

➤ **Taffetas** : dans lequel les fibres de chaîne et trame s'entrecroisent alternativement, en obtient un tissu peut déformable ayant une planéité excellente(**Fig.I.5a**).

●**Le sergé** : est intermédiaire de taffetas et de satin. Un fil de chaîne passe sous plusieurs fils de trame successif puis en dessus d'un fil de trame, en suivant un schéma régulier. Ce type d'armure produit un motif diagonal, ces tissus sont à la fois denses et souples(**Fig.I.5b**).

●**Le satin** : le fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame, cette forme est la plus déformable : elle est utilisée pour réaliser des forme complexe. Les satins utilisés pour les composites sont les satins de 5 et 8(**Fig.I.5c**).

La **figure.I.3** présente les principaux motifs d'armures :

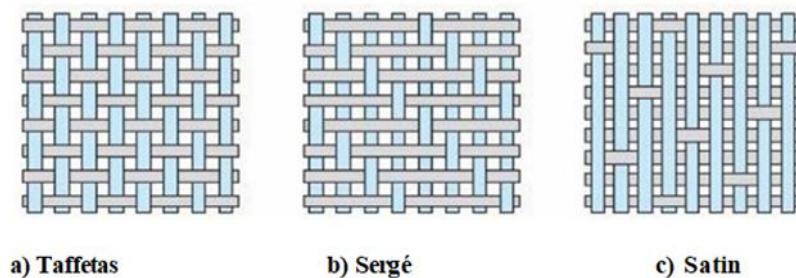


Figure I.5 : Principaux types de tissages.

➤ **Feutres ou mats** :

Nous appelons feutre ou mat un tapis de fibres, coupées ou non, aléatoirement orientées dans un plan. Les produits tels quels ou sous forme préimprégnés.

Dans le cas de produits tel quel ; les fibres doivent être liées entre elles : soit chimiquement par le dépôt à faible taux de colles, soit mécaniquement par aiguilletage pour conserver leur comportement en feuilles lors de leur mise en œuvre.

I.3.2.2 Architecture de renforcement :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements (**Fig.I.6**).

a) Unidirectionnelle

Les fibres sont orientées dans une même direction ; elles sont parallèles et peuvent se présenter sous deux formes :

- Sans liaison particulière (roving).
- Reliées par un fil (nappes).

b) Multidirectionnelle aléatoire

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

Elles peuvent se présenter sous les formes :

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

c) Orientée

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

On réalise également, pour des applications particulières (aérospatiale, défense), des armatures de renforcements bi-ou tridimensionnelles. On réalise aussi des plaques ou coques dont la raideur et la résistance varient avec la direction de la sollicitation.

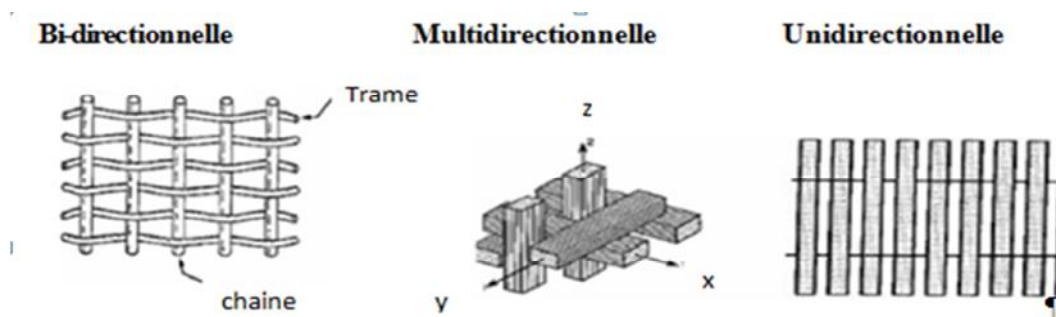


Figure I.6 : principales orientations des fibres

I.3.3 Les charges et les additifs : [4]

I.3.3.1 Les charge :

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation.

Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences:

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

I.3.3.2 Les additifs :

Un **additif** désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Adjuvants ;
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets.

I. 4 Les Procédées de fabrication : [5]

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

De nombreuses méthodes de fabrication on été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit. On peut citer :

I.4.1. Les technologies dites en moule ouvert :

I.4.1.1 Moulage au contact:

Le principe est de procéder manuellement à la réalisation des pièces à partir des résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression.

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

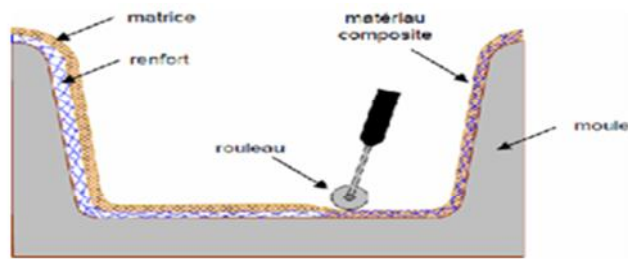


Figure I.7 : principe de moulage au contact.

On utilise cette technologie de moulage dans le cas de fabrication des petites séries des pièces: de 1 à 1000 pièces/an, Pièces de très grandes dimensions et pour des Revêtements sur supports divers.

Ce type de moulage représente des avantages tel que :

1. Très larges possibilités de forme.
2. Pas de limite dimensionnelle.
3. Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion).
4. Propriétés mécaniques moyennes à bonnes.
5. Investissements spécifiques très faibles.
6. Moule simples, peu onéreux, rapide à réaliser en interne.

Mais aussi il se limite à :

1. Une seule face lisse.
2. Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.).
3. Qualité tributaire de la main d'œuvre.
4. Faible cadence de production par moule.
5. Espace de travail important.
6. Conditions de travail médiocres.

I.4.1.2 Moulage par projection simultanée :

Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe - projection du renfort (roving).
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et éboulés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection.

Parmi les avantages associés à ce type de moulage on retrouve :

1. Très larges possibilités de forme et dimensions
2. Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection
3. Investissements très modérés
4. Moule simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.

En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des Propriétés mécaniques moyennes.

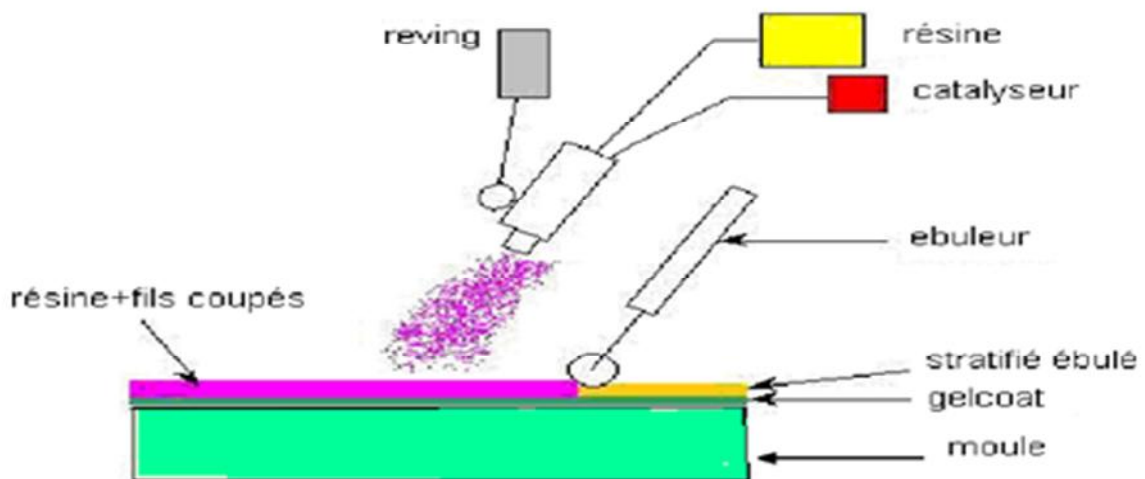


Figure I.8 : principe de moulage par projection simultanée.

I.4.2 Les technologies dites en moule fermé :

I.4.2.1 Moulage sous vide :

Le moulage sous vide s'effectue en utilisant un moule ouvert sur lequel on dispose les couches de renfort imprégné.

Une fois que le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule et la résine catalysée est versée sur ce dernier, une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement (pose d'un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce). On fait le vide sous la feuille de plastique des bulles d'air, fluage de l'excédent de résine qui est absorbé par un tissu de pompage. L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation en étuve ou en autoclave.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

On utilise ce type de moulage dans le cas d'une production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses.

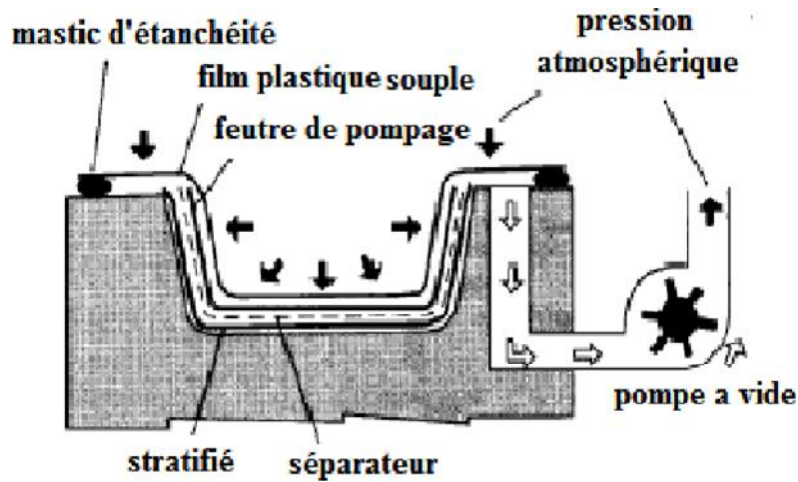


Figure I. 9 : Moulage sous vide.

I.4.2.2 Moulage par injection basse pression de résine (RTM) :

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides.

Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est mis en place dans le moule, une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte.

La pression de moulage est faible. Le procédé convient pour des cadences jusqu'à 30 pièces par jour.

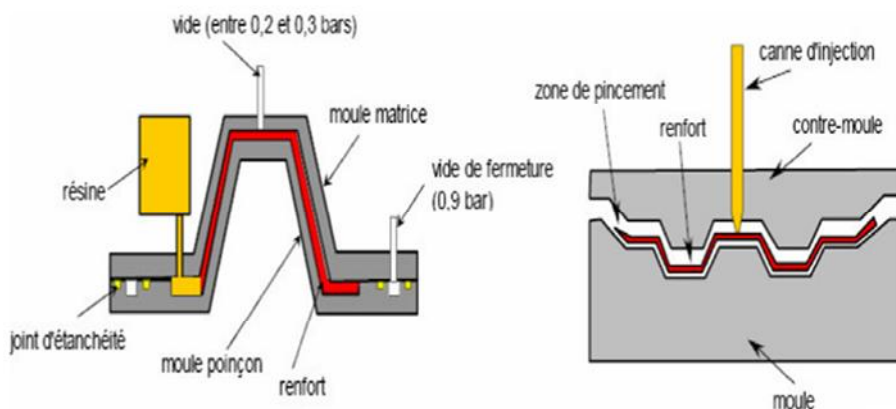


Figure I.10: principe de moulage par injection de résine.

I.4.2.3 Moulage à froid :

C'est un moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre moule rigides, initialement sans apport thermique extérieur.

Le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule, la résine dotée d'un système catalytique très réactif, est tout de suite versée en vrac.

La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule, car la réaction exothermique. Ce qui permet un démoulage rapide.

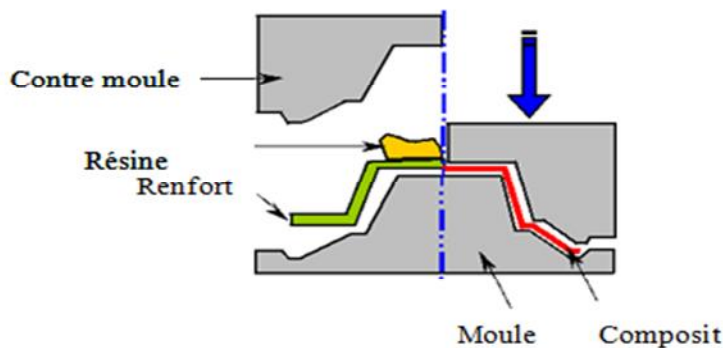


Figure I.11 : principe de moulage a la presse a froid

I.4.2.4 Moulage par injection de compound BMC :

Le compound (**B**ulk **M**olding **C**ompound), préparé dans un malaxeur, est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcée par des fils de verre coupés. Le moulage se fait à chaud (130 - 150 °C) par injection (principalement) entre moule et contre moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide. On utilise ce type de moulage pour une production en grandes séries, et pour des pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses.

I.4.2.5 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC :

Le mat pré imprégné (**S**heet **M**olding **C**ompound) est une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat pré imprégné est moulé à chaud (140 à 160 °C) par compression entre un moule et un contre moule en acier usiné.

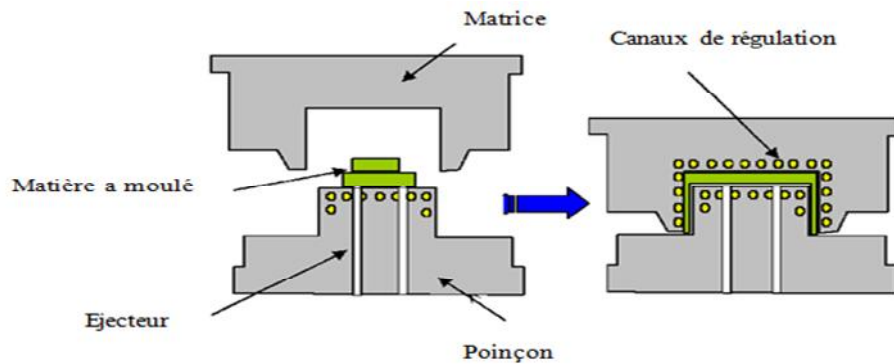


Figure I.12 : principe de moulage par compression.

I.4.2.6. Moulage par enroulement filamentaire :

Suivant le schéma ci-après, il peut être intégré dans une chaîne de fabrication en continu, et ainsi autoriser l'obtention de tubes de grande longueur. Application aux enveloppes de fusées, de torpilles, de conteneurs etc.

Pour des pièces de révolution à méridienne quelconque, l'enroulement est réalisé sur un mandrin de forme démontable, puis polymérisé en étuve ou en autoclave. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de pièces devant résister aux pressions internes, (réservoirs, corps de propulseur etc.)

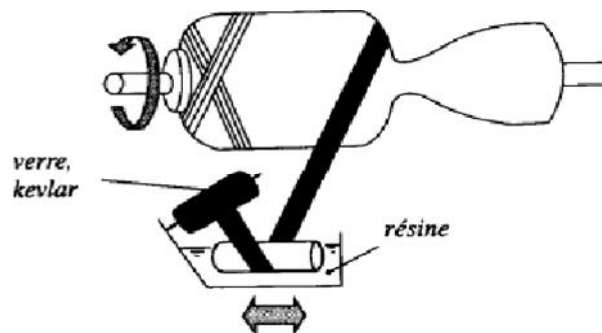


Figure I.13 : Enroulement filamentaire.

I.5 Architecture du composite: [6]

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

I.5.1 Les monocouches :

Le composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibre + matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible (≈ 0.125

mm). On distingue, le pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire).

La superposition de la monocouche dans l'ordre du plan de drapage va constituer les stratifié (Figure I. 14).

I.5.2 Les stratifiées:

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation (Figure I.12). Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite.

La figure I.11 montre un exemple de plan de drapage d'un stratifié.

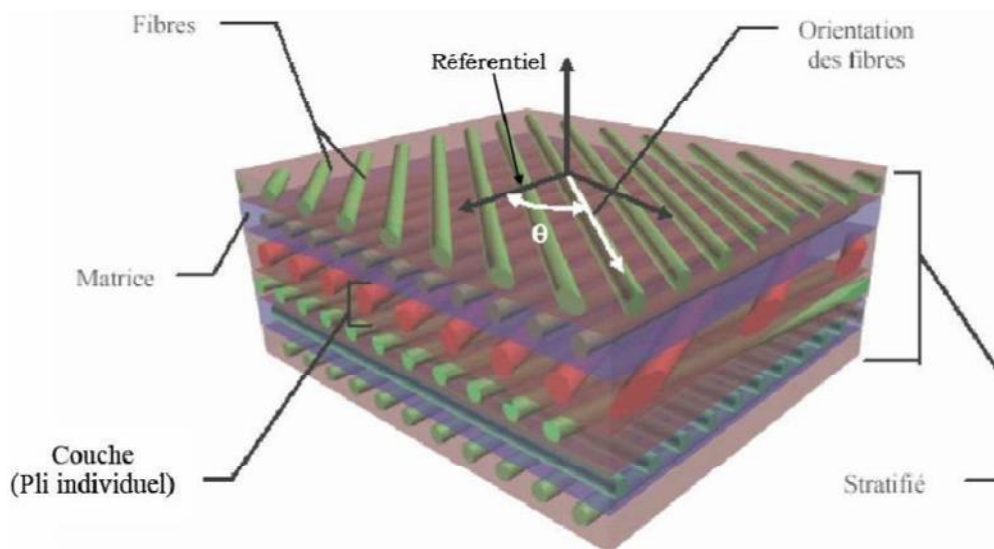


Figure I.14: Composite stratifié.

L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure.

I.5.3 Les sandwichs :

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur (âme) de forte épaisseur et de faible résistance (Figure I.15). L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une bonne résistance à la flexion et est un excellent isolant thermique.

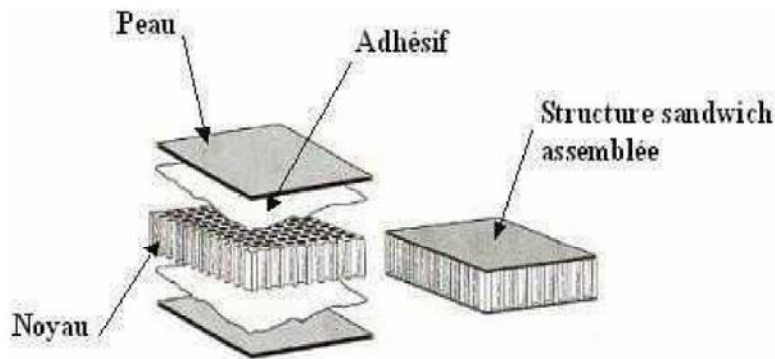


Figure I.15 : Constitution d'un sandwich.

I.6 Caractéristiques des matériaux composites : [1]

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont:

- Faible masse,
- Bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- Absence de corrosion,
- Absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- Vieillessement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- Inertie à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, Pétroles,...),
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- Très forte anisotropie.

I.7 Domaines d'application : [3]

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est

nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer! D'où leurs domaines d'application :

- Electricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf,...)
- Construction navale....

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

I.8 Les matériaux composites dans la construction navale : [7]

I.8.1 Activités de la construction navale

La construction navale est devenue progressivement une véritable industrie. L'activité de construction de la construction navale est, en majeure partie, orientée vers la satisfaction des besoins de la flotte de commerce et de la pêche. Elle s'exerce également pour le compte des marines militaires. Elle est complétée par l'activité de réparation navale, parfois menée par les mêmes chantiers.

En dépit de fluctuations conjoncturelles souvent importantes, ce marché se caractérise sur le long terme par une tendance expansionniste due en particulier à l'augmentation continue de la population, à l'élévation de son niveau de vie ou encore au développement du phénomène de mondialisation.

Parallèlement, les produits de cette industrie se diversifient, par exemple dans l'offshore pour l'exploitation des hydrocarbures ou des énergies marines renouvelables (éoliennes offshore), et ils intègrent de plus en plus de nouvelles technologies. Le travail des chantiers s'en trouve évidemment modifié, les méthodes de conception et les procédés de fabrication des navires faisant de leur côté appelle aux technologies les plus élaborées.

Le métier de la construction navale consiste donc essentiellement à concevoir le navire, puis à intégrer des éléments techniques très divers en vue de réaliser le système complexe que constitue tout navire moderne.

I.8.2 Les matériaux de construction d'un navire

La construction d'un navire est un processus complexe d'une haute technicité. Elle demande la collaboration étroite de nombreux personnels qualifiés et d'une main-d'œuvre contractuelle qui travaille en général sous la direction d'un entrepreneur principal. On construit des bateaux à des fins commerciales ou militaires. C'est une activité à caractère international, où quelques grands chantiers navals se battent pour conquérir leur part d'un marché relativement restreint. La coque est l'enveloppe extérieure du navire, elle est constituée du bordé, est étanche pour la partie immergée (œuvres vives) et a, généralement, des formes étudiées pour que le bateau puisse se déplacer assez facilement dans l'eau. Jusqu'à une époque relativement récente, les coques étaient exclusivement réalisées en bois. Grâce à l'évolution des sciences et des techniques, les coques sont maintenant construites en matériaux très variés, chacun étant plus ou moins adapté à tel ou tel type de construction.

I.8.3 La construction des navires en matériaux composites

Les matériaux composites modernes permettent la construction en série de bateaux, et donc l'abaissement des coûts de production. Ce type de construction actuelle est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibre de verre et de résine. Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques, les sandwichs. Pour les bateaux de course, on remplace la fibre de verre par de la fibre de carbone, plus résistante.

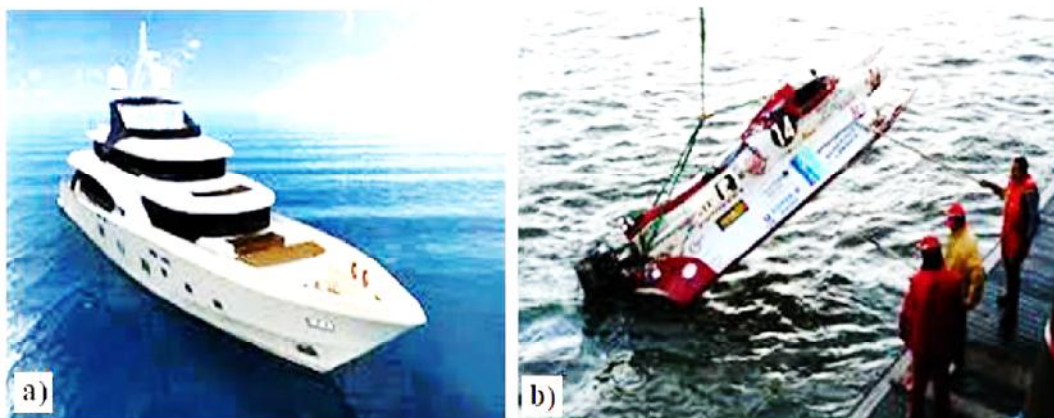


Figure I.16 : Construction des navires en matériaux composites

a): Navire de plaisance b): Navire de course en composite

Le choix du matériau de construction est important, il doit répondre à différents critères tels que le coût d'acquisition, le coût d'entretien, la facilité d'entretien, la sécurité, le confort, l'esthétique, la revente... Mais surtout ce choix doit correspondre au programme de navigation envisagé. Ajoutons toutefois qu'à moins de raisons particulières comme le goût pour la tradition ou le plaisir d'entretenir un grément de collection, il est raisonnable de s'orienter vers un matériau moderne, les composites polyesters ayant remplacé l'acier, qui lui-même a remplacé le bois. Une mention particulière à l'aluminium qui constitue la solution idéale pour les grandes croisières hauturières.

I.9 Généralités sur le caoutchouc : [8] [9]

I.9.1 Rappel historique sur les caoutchoucs

La première découverte du caoutchouc naturel a eu lieu au 16^{ème} siècle. Le mot caoutchouc est né de l'union de deux mots indiens : "cao" et "tchu", qui ensemble signifient "bois qui pleure" car le caoutchouc est un produit naturel qui se présente sous la forme d'un liquide d'apparence laiteuse, appelé latex. Le latex naturel est obtenu en incisant l'écorce d'un arbre appelé Hévéas *Brasilinsis* arbre originaire du Brésil.

Les caoutchoucs et élastomères sont les seuls matériaux industriels qui retournent pratiquement à leurs dimensions initiales après avoir subi des déformations importantes. À l'état brut, n'importe quel caoutchouc présente des propriétés mécaniques faibles. Pour être utilisés, les caoutchoucs sont soumis aux processus de formulation et de vulcanisation

I.9.2 Les pneumatiques et leurs déchets

Il est nécessaire d'établir une définition propre à un pneu usagé qui le différencie d'un pneu hors usage. En effet un pneu usagé peut avoir une deuxième voire une troisième vie après rechapage. Quant au pneu hors usage, il est inapte à reprendre la route et doit être éliminé. Toutefois, dans la littérature, les pneus usagés désignent les pneus usagés réutilisables et les pneus hors usage sont les pneus usagés non réutilisables.

I.9.3 Composition des pneumatiques

C'est un mélange à base de caoutchouc naturel ou synthétique dont les proportions varient selon le type de pneu et un certain nombre de matières auxiliaires tel que le noir de carbone et le soufre. Dans le but d'améliorer les qualités de résistance et de sécurité un certain nombre de composants sont ajoutés à la formulation : accélérateurs, antioxydants, anti ozone, charges, agents de vulcanisation, pigments, plastifiants, agents de renforcements et résines. La

constitution d'un pneu varie peu entre les pneus de véhicules légers et poids lourds. Le Tableau I.3 présente les différentes matières contenues dans le pneu.

Tableau I.3: Constitution moyenne en masse des pneus

Matériaux	Pneu tourisme	Pneu poids lourd
Elastomère	47%	43%
Noir de carbone	21.5%	21%
Acier	16.5%	27%
Textile	5.5%	-
Oxyde de Zinc	1%	2%
Soufre	1%	1%
Autres	7.5%	6%

On commence le processus en mélangeant les caoutchoucs de base (naturel et synthétique) avec les huiles, le noir de carbone, les pigments, les antioxydants, les accélérateurs et d'autres additifs, chacun donnant des propriétés différentes au matériau. Ces ingrédients sont mélangés dans un mélangeur interne. La friction provoque une élévation de la température qui doit être contrôlée. On obtient alors un mélange chaud noir et gommeux. Ensuite, on fait passer le mélange aux laminoirs où il sera découpé en bandes qui deviendront des flancs, des bandes de roulement ou d'autres parties de pneus. Pour qu'un pneu conserve tout au long de sa vie toutes ses propriétés, il doit après assemblage de tous les éléments nécessaires (tringles, fils en acier ou en textile ...), subir une vulcanisation pour le transformer d'un état plastique à un état élastique irréversible.

I.9.4 Possibilités de valorisation

Les pneus usagés sont utilisés sous différentes formes dans les applications industrielles telles que les infrastructures routières, le remplissage d'aire de jeux, le domaine du génie civil et de nombreux autres produits. Le broyage et le granulage sont les méthodes les plus utilisées pour le recyclage de ces pneus. Plusieurs études se penchent sur la faisabilité de l'utilisation de caoutchouc recyclé de pneus usagés dans la fabrication des amortissants et absorbant phonique.

Les pneus usagés sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits.

Il existe trois grandes voies de valorisation des déchets pneumatiques, ce sont :

- La valorisation énergétique (incinération),
- La valorisation chimique (pyrolyse, dévulcanisation)
- La transformation mécanique (production de poudrettes ou granulés).

I.9.5 La valorisation mécanique

Dans la valorisation mécanique, le pneu usagé est employé sous différentes formes. Dans une première étape, les pneumatiques livrés entiers sont déchiquetés par cisailage. Ces déchiquetas sont ensuite acheminés vers des broyeurs équipés de grilles de diamètres différents permettant d'obtenir des granulats et poudrettes de tailles différentes. Ainsi, les pneus usagés par courent les étapes suivantes :

- **Pneus entiers** ;
- **Déchiquetas** : pneus découpés en morceaux irréguliers de 50 à 300 mm ;
- **Granulats** : pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 10 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique ;
- **Poudrettes** : particules de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique.

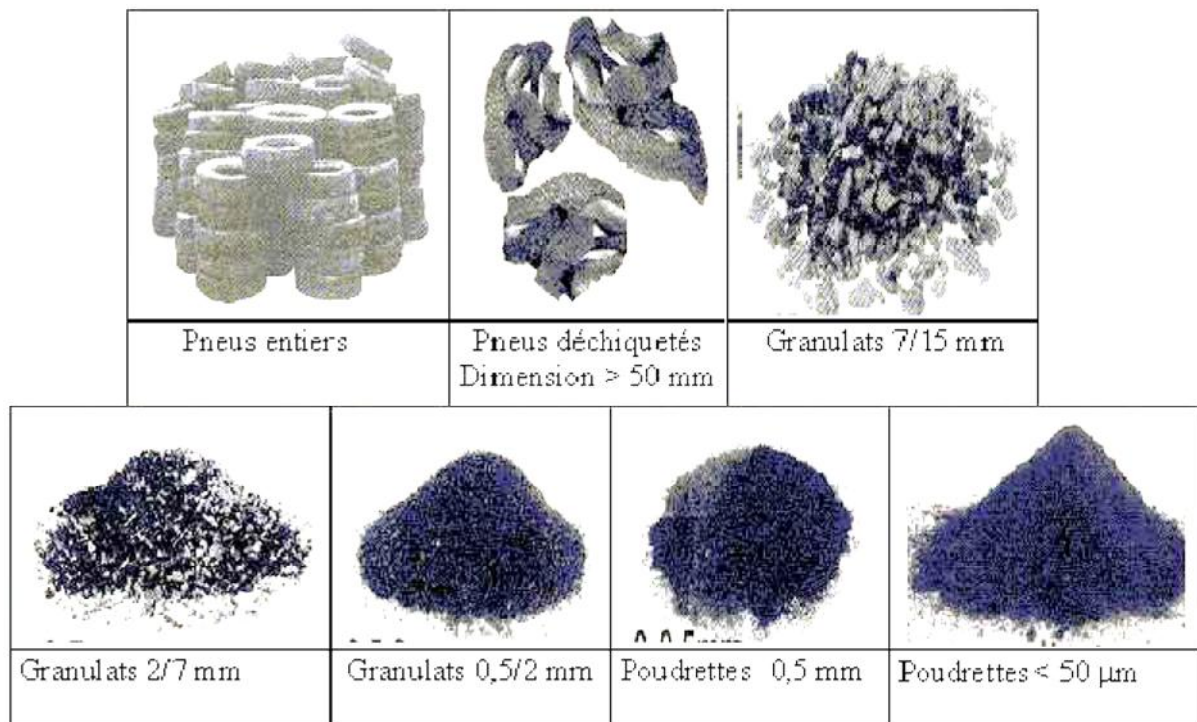


Figure I.17 : Différents demi-produits issus des pneus usagés

I.9.6 La dévulcanisation

Le procédé de dévulcanisation est une autre voie de valorisation matière. Cette technique consiste à détruire partiellement le réseau tridimensionnel créé par l'opération de vulcanisation en cassant les liaisons carbone-soufre ou soufre-soufre. Cette technologie se fait soit par rupture des réticulations, soit par rupture de la chaîne principale ou bien par les deux types de ruptures en même temps.

I.9.7 Traitement de la poudrette

Le traitement de la poudrette a comme but ultime d'activer la surface des particules, de sorte qu'elles deviennent plus accessibles et plus compatibles pour les transformations ultérieures comme l'incorporation dans une matrice thermoplastique et thermodurcissable ou comme matière première dans un composé de caoutchouc. Utilisent un acide acrylique pour le traitement de poudrettes issues de pneus usagé utilise des bicarbonates de sodium NaHCO_3 pour élaborer un élastomère thermoplastique (éthylène vinyle acétate (EVA) poudrette de pneu recyclé). Les paramètres entrant en jeu sont la durée du traitement est la température. L'addition de cette poudrette traitée en surface dans un asphalte modifie les propriétés rhéologiques de ce dernier

Une fois le pneu usagé réduit en poudrettes, il est souvent mélangé avec un caoutchouc vierge. Le mélange est comprimé à des températures élevées pour obtenir un nouveau produit moulé.

Conclusion

Ce premier chapitre est essentiellement consacré à la description de l'organisation interne des matériaux composites fibres continues-matrice polymère. Nous avons montré que ces matériaux sont structurés à plusieurs échelles. En homogénéisant la structure interne, d'abord au niveau micrométrique, puis au niveau microscopique, il est possible d'obtenir une modélisation satisfaisante du comportement mécanique macroscopique. Du point de vue expérimental, il est nécessaire de trouver des techniques d'investigation qui permettent de caractériser les mécanismes de déformation et d'endommagement de ces matériaux aux différentes échelles. Dans le chapitre suivant, nous présentons les principales techniques de mesure utilisées pour étudier le comportement mécanique des composites.

CHAPITRE II

Comportement mécanique des matériaux composites

Introduction

Les composites, mélange de matériaux aux propriétés souvent très différentes permettent de réaliser de remarquables compromis entre les propriétés de matériaux rigides mais fragiles et de matériaux ductiles mais trop souples. Les composites sont composés de l'ensemble de matrices et renforts, l'ajout du renfort augmente les propriétés mécanique de la matrice renforcée, nous décrivons les expressions qui régissent le comportement mécanique des composites.

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont complexes sont directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites : [10]

1. La loi des mélanges pour les composites :

Les déformations des matériaux homogènes et isotopiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la loi des mélanges appliquée aux composites stratifiés :

- PM Propriétés de la matrice
- PR Propriétés du renfort
- PC Propriétés du composite
- VC Fraction volumique(%) du composite
- La propriété du composite est :

$$P_C = V_R P_R + (1 - V_R) P_M \quad (\text{II.1})$$

2. La densité du composite :

À partir de la loi énoncé ci-dessus on peut calculer la densité moyenne du composite. Si : ρ_m est la densité de la matrice et ρ_R est la densité du renfort, alors la densité du composite ρ_C est :

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M \quad (\text{II.2})$$

3. Le module de Young du composite E_c , R_{e_c} et R_{m_c} :

Lorsqu'on mélange deux matériaux au comportement élastique linéaire et de modules de Young différents, le produit est encore élastique et linéaire.

Le calcul de module de Young est possible à partir de la loi des mélanges si la force est parallèle aux fibres. Dans ce cas sous l'effet d'une force F , la matrice, les fibres et le composite subissent une déformation unitaire identique, ce qui se traduit par :

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_R \quad (\text{II } 3)$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

- le module de Young :

$$E_c = V_R E_R + (1 - V_R) E_M \quad (\text{II } 4)$$

De la même manière on peut déterminer :

-La limite d'élasticité du composite

$$R_{e_c} = V_R R_{e_R} + (1 - V_R) R_{e_M} \quad (\text{II } 5)$$

-La résistance maximale à la traction du composite :

$$R_{m_c} = V_R R_{m_R} + (1 - V_R) R_{m_M} \quad (\text{II } 6)$$

Pour une force perpendiculaire au sens des fibres, les contraintes dans la matrice, dans les renforts et dans le composite sont identiques. Cela se traduit par :

$$\sigma_R = \sigma_M \quad (\text{II } 7)$$

II.2 Mode d'essais mécanique :

Les techniques expérimentales et procédures appliquées lors de la caractérisation mécanique de nos échantillons sont exposées dans ce qui suit :

II.2.1 Essai de traction : [2]

L'essai de traction consiste à soumettre à un effort de traction croissant jusqu'à sa rupture une éprouvette normalisée, en vue de déterminer les caractéristiques du matériau. Parmi tous les essais mécaniques, il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette normalisée à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à obtention de la rupture.

L'essai de traction permet de d'établir la contrainte maximale de traction défini par la formule suivante :

$$\sigma = F/bh \quad (\text{II } 8)$$

Avec : F : force maximale

b et h: longueur et épaisseur de l'éprouvette

Essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

Le module de Young **E** ou module d'élasticité longitudinale ;

La limite élastique **Re** ou **σe** qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;

La limite à la rupture **Rm** ou **σm**;

L'allongement à la rupture **A**, qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge, avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;

Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

II.2.1.1 Traction longitudinale :

L'effort F est appliqué dans la direction des fibres (composite unidirectionnel), comme le montre la figure (II.1)

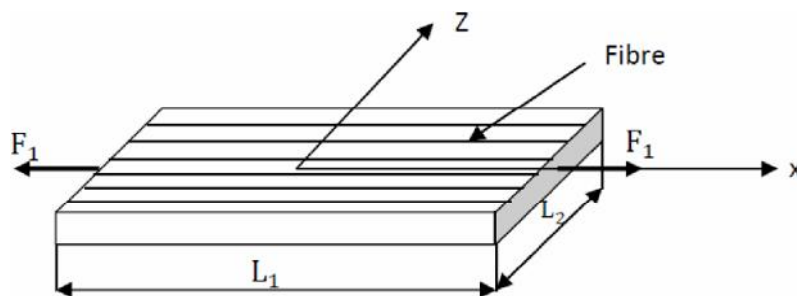


Figure II.1 Traction longitudinale

Les caractéristiques tirées sont :

La contrainte normale :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II } 9)$$

Avec S1 : section droite du matériau

Les déformations longitudinales et transversales : (II10) (II 11) et (II 12)

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_1}{L_1} \quad (\text{II } 10)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L_2}{L_2} \quad (\text{II } 11)$$

Le module de Yong E :

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.12})$$

II.2.1.2 Traction transversale :

L'effort F est appliqué suivant le sens de trame (direction transverse aux fibres)

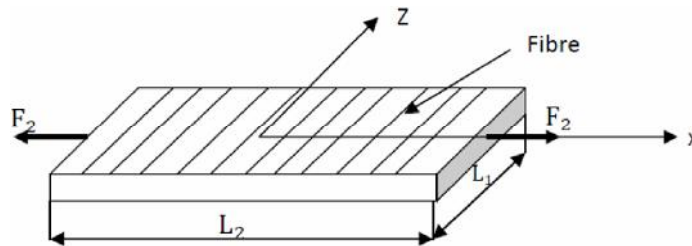


Figure II.2 : traction transversale

La contrainte normale est

$$\sigma_{xx} = \frac{f_2}{S_2} \quad (\text{II } 13)$$

Avec S2 : section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge

Le module de Yong :

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} \quad (\text{II.14})$$

II.2.1.3 Traction hors axe :

L'effort F est appliqué à un angle de 45° par rapport aux fibres (les fibres sont inclinées de 45°), cet essai est utilisé pour mesurer le module de cisaillement

G

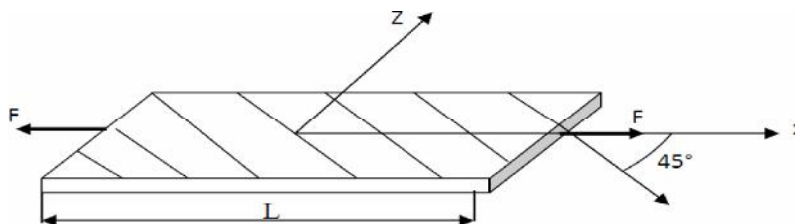


Figure II.3 : Traction hors axes

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{II } 15)$$

Le module de Yong est :

$$E_{45} = E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II } 16)$$

L'essai de traction ne permet pas toujours d'avoir les caractéristiques exactes à cause de la présence des contraintes de contact qui sont dû à la fixation de l'éprouvette.

Lors de l'essai de traction, il faut y'avoir un désalignement entre la direction d'application de la charge et celle des fibres, sinon les valeurs mesurées seront nettement plus faibles que les valeurs réelles du module de 'Young (cas d'un composites unidirectionnel)

Un problème qui n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale, à partir de l'essai de traction on obtient une courbe conventionnelle comme celle représentée sur la figure II.4

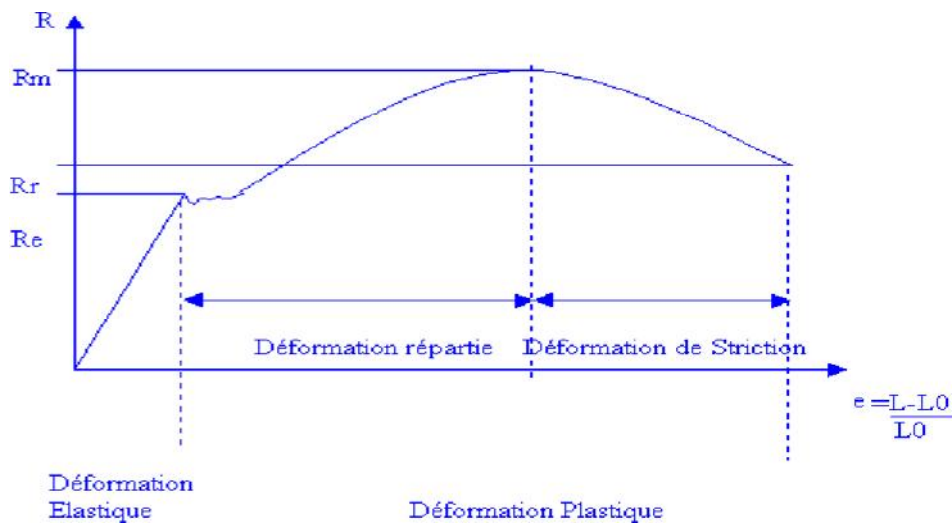


Figure II.4 : Courbe conventionnelle d'un essai de traction

II.2.2 Essai de flexion :[11]

Le type d'essais le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques et le comportement des matériaux composites est en fait l'essai de flexion. Ce choix correspond souvent aux sollicitations auxquelles sont soumises les pièces réelles, mais surtout offre l'avantage de diminuer considérablement les difficultés de réalisation de l'essai par l'utilisation d'éprouvettes simples sans avoir la difficulté du collage des étalons ni le problème rencontré lors du serrage des mors dans le cas des essais de traction (sur contraintes locales conduisant à des ruptures prématurées de l'éprouvette).

De plus, selon que l'opérateur travaillera en flexion 3 points ou 4 points et, suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction-compression ou en cisaillement.

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



Figure II.5 : Machine de flexion

II.2.2.1 Principe d'essai de Flexion 3point :

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté. Il consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et appliquer un effort ponctuel au centre. Le principe de cet essai est simple car il consiste à déformer à une vitesse constante de 2 mm/mn un barreau (éprouvette) rectangulaire met entre deux appuis et d'une panne située à égale distance des appuis (pour notre cas).

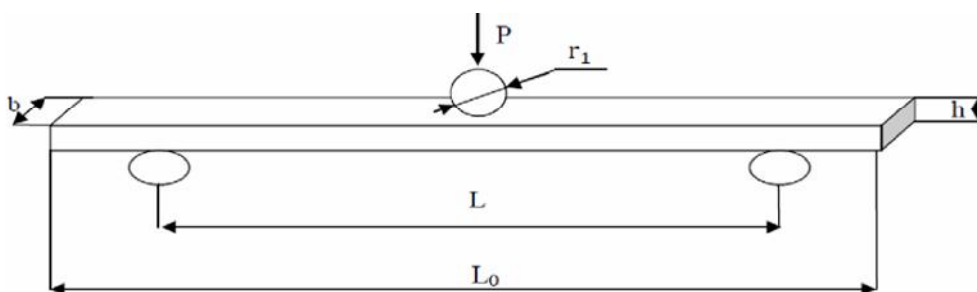


Figure II.6 : Essai de flexion 3point

p : Charge appliquée,

L : longueur entre appuis ;

L_0 : longueur de l'éprouvette ;

h : hauteur de l'éprouvette.

b : largeur de l'éprouvette.

r : rayon de la panne centrale

La contrainte normale est nulle le long de l'axe neutre de l'éprouvette, alors elle va être croissante en traction d'un côté de cette axe et croissante en compression de l'autre côté.

En d'autre terme les éléments de volume de l'éprouvette ne sont pas soumis à la même sollicitation mécanique contrairement à l'essai de traction et de compression.

Il y a aussi une autre contrainte qui atteint le maximum au niveau de la fibre neutre dite contrainte de cisaillement.

On enregistre la courbe contrainte déformation :

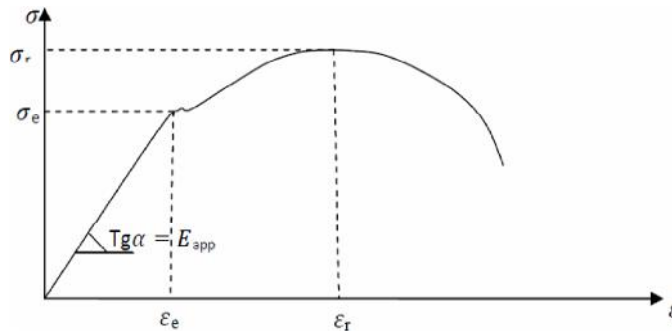


Figure II.7 : courbe de contrainte déformation pour un matériau ductile

L'analyse de cette courbe permet l'évaluation des caractéristiques principales du matériau:

A partir de l'essai de flexion on tire les caractéristiques suivantes :

Module apparent :

$$E_{App} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta y} \quad (II\ 17)$$

La contrainte à la rupture :

$$\sigma_r = \frac{3P_{max} L}{2bh^2} \quad (II\ 18)$$

La déformation :

$$\varepsilon_r = \frac{6hf}{l^2} \quad (II.19)$$

La contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{3P}{4bh} \quad (II\ 20)$$

Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé du comportement mécanique d'un matériau composite (résine fibre de verre) lors des essais mécaniques tel que les essais de traction et de flexion, nous avons donné les lois mathématiques dont découlent les caractéristiques mécaniques des matériaux.

CHAPITRE III

Techniques expérimentales

Chapitre III : Techniques expérimentales

Introduction:

Nous allons aborder dans cette partie les constituants et les appareils, instruments utilisés pour l'élaboration du matériau composite (résine, fibre de verre, le moule...), et le mode d'élaboration adopté et les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physique, et mécanique de notre matériau composite.

III.1. Matériaux et matériels utilisés:

Nous allons présenter les matériaux de base de notre étude ainsi que les appareils nécessaires pour l'élaboration de nos échantillons.

III.1.1 Matériaux utilisés pour l'élaboration des échantillons:

Le matériau composite élaboré est à base de résine polyester renforcé en fibre de verre et chargé en poudre élastomère.

III.1.1.1 La résine:

Nous avons utilisé une résine synthétique, polyester de formulation orthophtalitique, destinée pour la construction naval, construction de piscine, elle est aussi utilisée dans l'industrie automobile. Elle permet une stratification solide du matériau composite, travaille dans un milieu tempéré et elle compte parmi les résine les plus économiques du marché.

La fiche technique de la résine polyester est donnée dans le tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1: Fiche technique de la résine:

Propriétés mécaniques de la résine :	
- Résistance en traction	40-60 MPa
- Dureté Barcol	40-45
- Résistance en flexion	80-100 MPa
- Méthode d'application	Application manuelle
- Densité	1,09- 1,1 kg/dm ³
- Temps de durcissement	45-60mins

III.1.1.2 Le durcisseur:

C'est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans être consommé et sans modifier la position finale de l'équilibre thermodynamique de cette réaction.

Le dosage à respecter pour ce catalyseur est de 01,50-02,00 % en masse.

Après ajout de la quantité nécessaire de durcisseur à la résine un mélangeage mécanique est fait à fin de bien répartir cette substance et obtenir une solution homogène, qui durcira avec la même vitesse sur tout le composite.

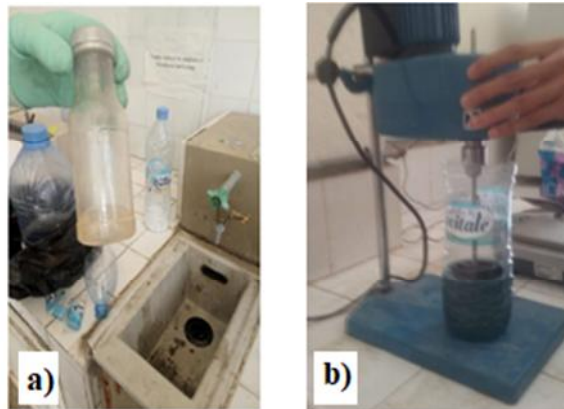


Figure III.1: Préparation de la résine polyester
a) Le durcisseur b) le mélangeage de la résine plus durcisseur

III.1.1.3 Le renfort :

Le renfort utilisé est une superposition de deux sortes de nappes de renfort en fibre de verre ; la première est un mat de 600, la seconde couche est un roving de 600.

La nappe résultante contient deux faces différentes comme c'est indiqué sur la figure III.2.



Figure III.2 : Le renfort en fibre de verre

III.1.1.4 La Charge:

La charge choisie pour notre étude est une poudre élastomérique (caoutchouc) obtenue à partir du broyage des pneus usagés.



Figure III.3: La poudre de caoutchouc utilisée comme charge du matériau composite

III.1.2 Le matériels utilisés pour l'élaboration des échantillons:

Plusieurs appareils et moyens ont été utilisés pour l'élaboration de nos échantillons on cite:

III.1.2.1 La Balance:

Pour nos mélanges, nous avons utilisé une balance avec une précision de 10^{-2} pour la pesée de la résine et du taux du durcisseur nécessaire à chaque mélange ;



Figure III.4: La balance

III.1.2.2 Le mélangeur :

Pour une meilleur répartition du durcisseur ainsi que de la poudre de caoutchouc dans la résine, on mélange le tout à l'aide d'un mélangeur électrique pour une durée de temps de quelques minutes.



Figure III.5: mélangeur électrique

III.1.2.3 Le moule:

Les moules ont été fabriqués au laboratoire des sciences des matériaux du département de génie mécanique. Le moule est constitué d'une plaque de verre $450 \times 450 \times 5$ d'un cadre qui le délimite latéralement.



Figure III.6 : élaboration des moules

III.1.2.4 La cire :

C'est un agent démoulant, utilisé dans notre cas sur plusieurs couches (application de la cire et nettoyage de la surface), il assure une facilité de récupération des échantillons.



Figure III.7: La cire utilisée pour le démoulage des échantillons

III.1.2.5 Les tamis:

Afin de répartir la charge, poudre de caoutchouc en différentes granulométries, nous avons utilisé un tamiseur électrique de type Resch.

La taille de maille des tamis utilisée est de 500 μ m et la durée du tamisage est fixée à 10 minutes avec une amplitude de vibration de 50 Hz.

La masse de poudre de caoutchouc traitée à chaque opération est de 13,5 grammes. L'opération consiste à faire passer la poudre à travers une pile de tamis superposés, par ordre décroissant de la taille des mailles, sur une table vibrante. A la fin du tamisage, la poudre de caoutchouc est récupérée.



Figure III.8: Les tamis utilisés pour séparer la poudre de caoutchouc en différentes granulométrie

III.1.2.6 Le micro-onde :

On a utilisé un micro-onde pour la dévulcanisation de la poudre de caoutchouc, cette technique consiste à casser les liaisons chimiques (carbone-soufre ou soufre-soufre).



Figure III.9 Micro onde utilisé pour la dévulcanisation de la poudre de caoutchouc

III.1.2.7 Etuve pour le traitement thermique :

Une fois nos échantillons élaborés, usinés en éprouvettes de traction et de flexion, un traitement thermique de relaxation sera appliqué afin que toutes les contraintes résiduelles soient éliminées. Le traitement consiste en un séjour de 8 heures dans une étuve à la température de 80°C.



Figure III.10: Etuve utilisée pour le traitement des échantillons

III.2 Les étapes suivies pour l'élaboration des éprouvettes:

Pour la préparation de nos mélanges en matériaux composites, résine polyester renforcés en fibre de verre et chargés en poudre de caoutchouc nous avons suivi les étapes mentionnées ci-dessous :

- Préparation du moule et la couche de fibre verre tissée (ROVING plus mat de 600).
- Application de la cire en plusieurs fois sur le moule de (5a10couche)
- Préparation de la quantité de la résine avec durcisseur pour le matériau composite sans charges.
- Préparation de la quantité de résine avec durcisseur pour le matériau composite chargé on poudre de caoutchouc à différents pourcentage (1%, 5%, 10% et 15%)
- Verser le mélange dans le moule
- Etalement du mélange à l'aide du rouleau et d'un débulleur pour évacuer les bulles d'air.
- Laisser le matériau composite ainsi élaboré et durcir le temps nécessaire.
- Démouler les matériaux élaborés pour découper les éprouvettes normalisées.

III.3. Techniques de caractérisation:

Les différentes techniques utilisées pour la caractérisation de nos échantillons consistent en des essais de traction, flexion, résilience et micro dureté pour la caractérisation mécanique ; des observations au microscope optique et au microscope électronique à balayage pour la caractérisation physique.

III.3.1 Caractérisation mécanique:

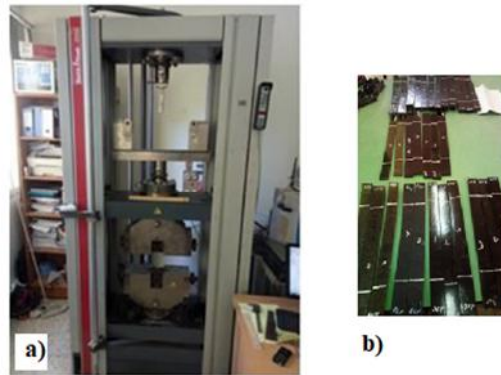
Pour connaître le comportement mécanique de notre matériau composite, pour évaluer ces caractéristiques de résistance et de déformation, on lui fait subir plusieurs tests :

- L'essai de traction pour déterminer son module d'élasticité, sa résistance à la traction sa déformation en fonction de la contrainte de traction appliquée et sa résistance maximale lors d'un chargement en traction.
- L'essai de flexion pour déterminer le module élastique en flexion et la flèche
- L'essai de micro dureté pour connaître la dureté des différents constituants de notre matériau composite.
- L'essai de résilience nous informe sur la capacité que possèdent nos échantillons à résister aux chocs.

III.3.1.1 Essai de traction: [12]

La machine utilisée pour effectuer les essais de traction sur nos éprouvettes est une machine de marque zwick/Roell (laboratoire Boumerdès, **pilotée par** microordinateur).

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées à température ambiante. Nous récupérerons des courbes contraintes /déformations.



**Figure III.11 : a) Machine de traction de marque Zwick/Roell
b) Eprouvettes de traction**

III.3.1.2 Essai de flexion: [12]

L'essai de flexion s'est effectué sur une machine de traction, nous avons utilisé l'essai de flexion trois points. La machine utilisée est une machine de traction.

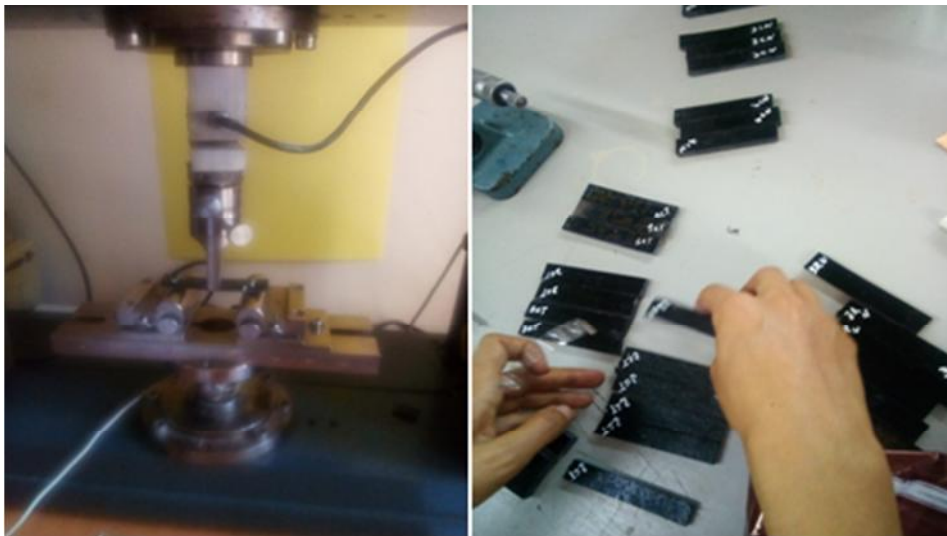


Figure III.12 Essai de flexion trois points

III.3.1.3 Essai de micro dureté: [13]

L'essai de dureté Knoop (HK) est une alternative à l'essai Vickers, il est destiné aux essais de microdureté.

Comme pour l'essai de dureté Vickers, le pénétrateur utilisé en dureté Knoop est un diamant pyramidal. Cependant, au lieu d'être symétrique, la pyramide est allongée. La dureté Knoop (HK) est évaluée par une mesure optique de la longueur de la diagonale la plus longue de l'empreinte.

L'essai de dureté Knoop est utilisé pour la micro dureté (charge inférieure ou égale à 1Kgf) de sorte que la surface de l'échantillon doit être parfaitement polie ou électro polie avant démarrer l'essai. Les empreintes résultantes font quelques microns.

Pour la détermination de la dureté Knoop HK (selon ISO 4545), le pénétrateur pyramidal de forme losange (angle de bord longitudinal 172,5°, angle de bord transversal 130°) est pressé avec une charge d'essai définie (entre 1 gf et 2 kgf) contre un échantillon.

La dureté Knoop HK est le quotient de la force d'essai F (en Newton N) et de la surface de projection (surface) de l'empreinte, calculée à l'aide de la plus longue diagonale d (en mm) de l'empreinte pyramidale de forme losange (voir la figure III.13 ci-dessous).

À l'inverse, dans la méthode Vickers, la valeur moyenne des deux diagonales de l'empreinte pyramidale de forme carrée est utilisée pour calculer la valeur de dureté.

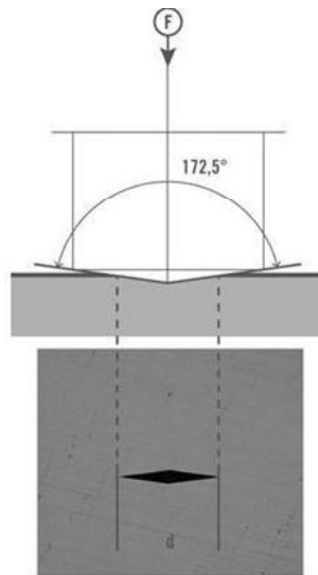


Figure III.13 principe de l'essai Knoop

Les essais de micro dureté Vickers sont effectués sur un appareil équipé d'un microscope permettant de localiser la phase à soumettre à l'indentation. De ce fait, lorsque le choix de la charge et la zone à indenter sont réalisés, le pénétrateur se déplace pour cibler la phase voulue et se retire après 20 secondes d'indentation. Une empreinte de forme pyramidale est tracée sur la surface de l'échantillon. La mesure des deux diagonales à l'aide de deux droites permet de calculer la valeur de la micro dureté à l'aide d'un programme placé sur l'appareil. Le micro duromètre utilisé est représenté sur la figure III.14.

La valeur de la dureté Knoop est donnée par l'expression suivante :

$$HK = \text{constant} \times \frac{\text{test force } F}{\text{surface of the indentation}} = 0,102 \times \frac{F}{A} = 1,451 \times \frac{F}{d^2} \quad (\text{III.1})$$

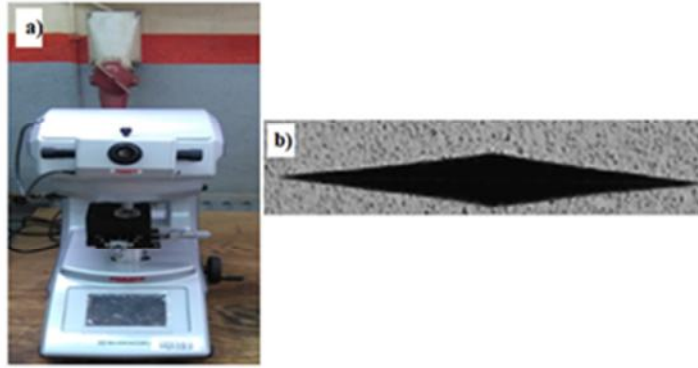


Figure III.14 Essai de microdureté) Micro duromètre, b) empreinte knoop

III.3.1.3 Essai de résilience: [12]

Il arrive souvent que les matériaux, de très bonnes qualités plastiques sous les efforts statiques, deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance au choc des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante.

Les essais au choc Charpy sont des essais simples et économiques qui ont pour but d'évaluer la résistance au choc d'un matériau. L'impact de Charpy est défini comme étant l'énergie cinétique requise pour la rupture de l'échantillon. Les essais au choc Charpy sont réalisés à l'aide d'un mouton pendule de type GUNT.

Cette machine d'essai est appelée le mouton pendule ou de Charpy .elle comporte un marteau oscillant dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. Une partie de l'énergie du marteau est absorbée par l'éprouvette

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience J/cm^2 . Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

Le tableau III.2 ci-après représente quelques caractéristiques du mouton pendule utilisé

Tableau III.2 : Fiche technique du mouton pendule

Données techniques	Grand model	Petit model
Numéro modèle	Zwick 5101	Zwick 5102
Longueur du pendule	390mm	225mm
Capacité de travail	0...50/25/15/7,5 joule	0...4/2/1/0,5 joule
Vitesse d'impact	3,85m/s	2,93m/s



La figure III.15. Dispositif d'essai de résilience.

Le calcul de la résilience se fait selon l'équation ci-dessous.

$$KCU = \frac{M \cdot g(h_0 - h_1)}{S} = \frac{\text{Energie absorbée}}{\text{Section rompue}} = \frac{\text{Joules}}{\text{cm}^2} = \text{J/cm}^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- h_0 : hauteur initiale du pendule,
- h_1 : hauteur finale du pendule,
- g : gravitation terrestre égale à $9,81\text{m/s}^2$ à Paris

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

Chapitre IV Résultats et discussions

Introduction

Nous avons élaboré des matériaux composites à base de résine polyester, en utilisant comme renfort des fibres tissées (rooving) et comme charge, la poudre de caoutchouc.

L'élaboration s'est faite par moulage en contact. Nous en avons élaboré des éprouvettes normalisées de traction, de flexion et de résilience. Des observations au microscope optique ont été menées dans le but de comprendre les phénomènes microscopiques régissant le comportement mécanique.

La poudre de caoutchouc utilisée est récupérée du broyage de pneus usagés, nous l'avons passée au différents tamis, et nous avons choisi la granulométrie de 500 μ m.

Deux lots de poudre ont été utilisés dans notre travail, un premier est de la poudre non traitée, le second lot appelées poudre traitées ; ce traitement consiste en un passage au micro onde à la puissance 650 watt pendant 1minute.

Dans ce chapitre, nous donnerons les résultats de ces différents tests ainsi que les interprétations qui en découleront.

IV. 1 Résultats de la caractérisation mécanique :

Nous avons effectué des essais de traction, flexion, résilience et micro dureté pour la caractérisation mécanique, des observations au microscope optique de nos échantillos.

IV. 1.1 Résultats des essais de traction :

Les essais de traction sont réalisés pour des éprouvettes normalisées, selon la norme ISO 527

On donne dans le tableau IV. les dimensions de nos éprouvettes de traction.

Tableau IV.1 : Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527

Matériau	Dimensions	Valeurs
Type III	longueur minimale	250
	Distance initiale entre mors	136
	Longueur de référence (extensomètre)	50+-1
	Distance entre talons	150+-1
	Largeur de la partie calibrée	25 ou 50+-0,5

IV.1.1.1 Résultats des essais de traction de la résine :

Dans un premier nous avons rajouté la poudre de caoutchouc à la résine aux concentrations de 1%, 5%, 10% et 15%. Les essais de traction (Figure IV. 1) ont montré que l'ajout de la poudre à la résine seule fait améliorer légèrement la contrainte maximale et la déformation à la rupture pour les concentrations de 1% et 5%.

Pour la résine chargée à 10% et 15% de poudre de caoutchouc, non traitée, la force contrainte à la rupture diminue et la déformation reste presque la même.

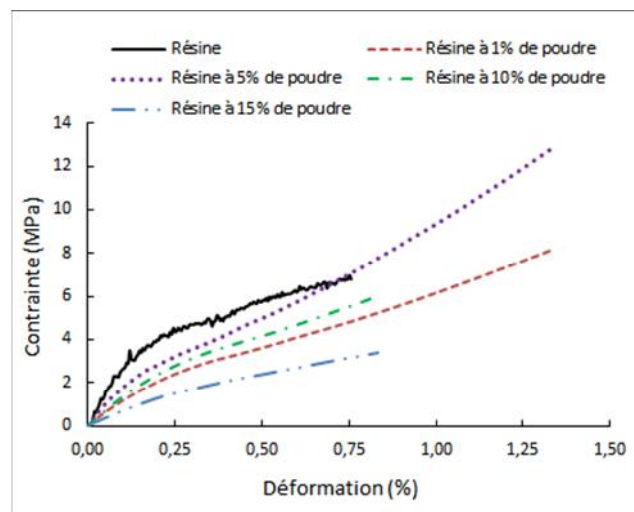


Figure IV.1. Superposition des courbes de traction de la résine seule et de la résine chargée en poudre de caoutchouc

IV. 1.1.2 Résultats des essais de traction du matériau composite

➤ matériau composite non chargé

Les essais de traction sur le matériau composite sans charge donne une résistance à la traction de 68,60 MPa, un module d'élasticité de 4107 MPa, et un allongement à la rupture de 3,96 %

Comme le montre la figure IV.2

- A environ 1% de déformation, la matrice cède et c'est les fibres qui reprennent l'effort jusqu'à la rupture totale à 3,96% de déformation.

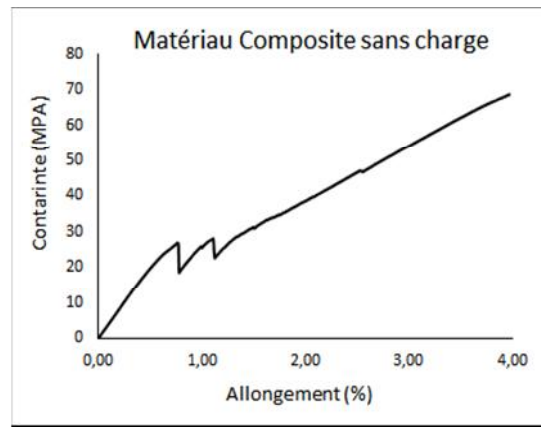


Figure .IV.2: Matériau composite non chargé

➤ **Matériau composites chargés en poudre de caoutchouc non traitée**

Sur la figure IV3, nous donnons les courbes contraintes déformations pour le matériau composite chargé à 1%, 5%, 10 et 15% de poudre de caoutchouc non traitée.

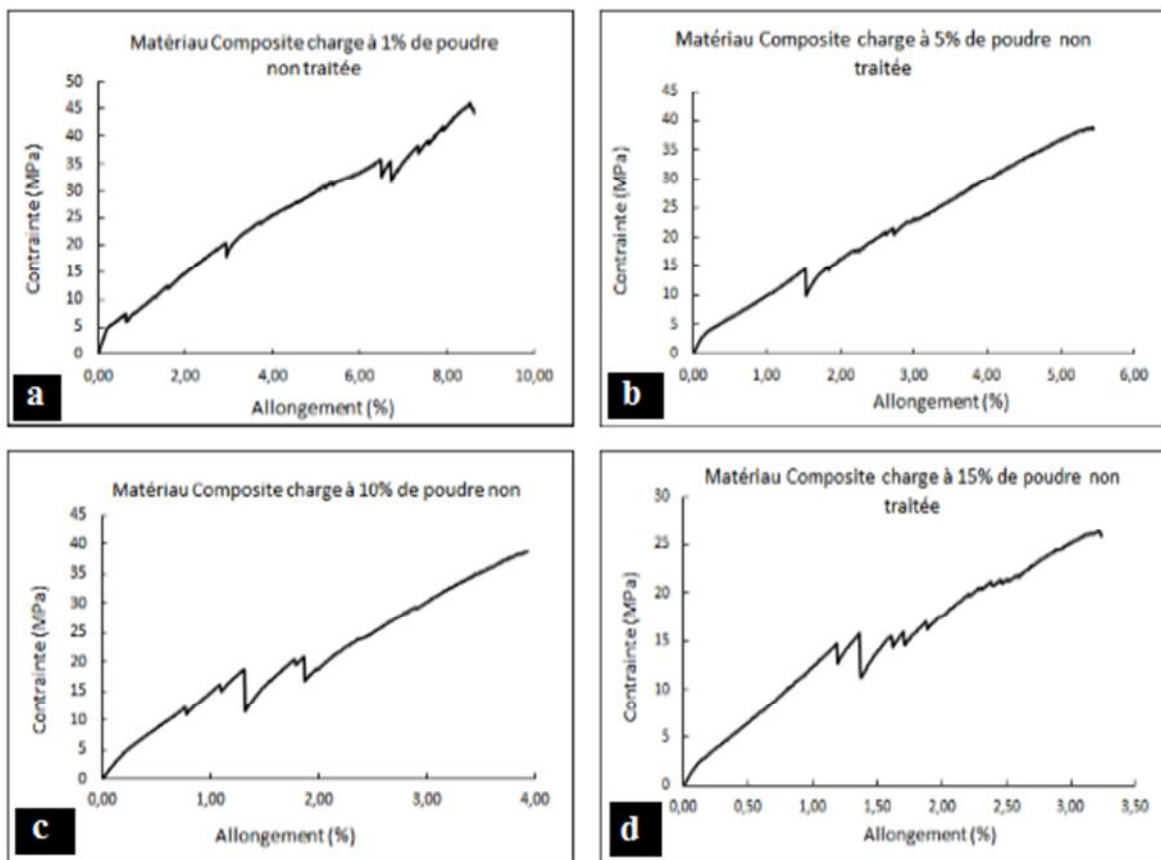


Figure .IV.3: Courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée. a) 1% de poudre, b) : 5% de poudre, c) : 10% de poudre, (d) : 15% de poudre

- Nous remarquons que les matériaux composites chargés en différents pourcentages, ont des propriétés de contraintes et de contraintes moindre par rapport au matériau composite non chargé.
- Nous superposons ci-dessous les courbes de traction pour les différentes concentrations en poudre de caoutchouc non traitée.

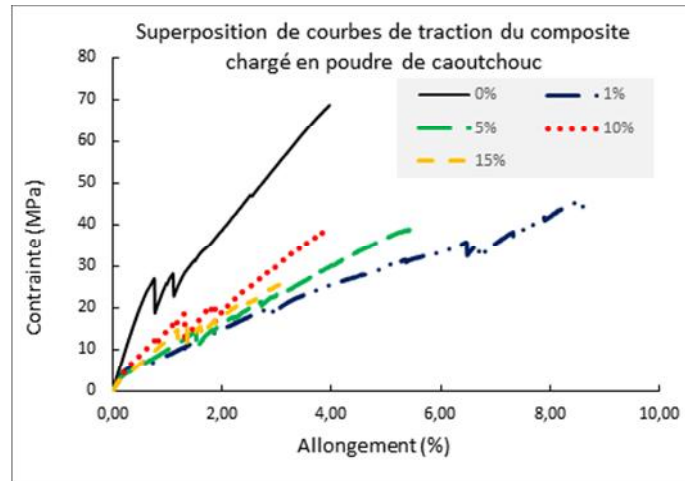


Figure IV 4: Superposition des courbes de traction des composites chargés en poudre de caoutchouc non traitée

Nous constatons que la contrainte maximale diminue pour toutes les concentrations en poudre de caoutchouc non traitées. Les allongements à la rupture augmentent pour les concentrations de 1% et 5% et diminuent pour 10% et 15%.

IV.1.1.3 Résultats des essais de traction matériau composites chargées en poudre de caoutchouc traitée

Nous avons par la suite chargé le composite avec de la poudre de caoutchouc traité aux concentrations de 1% et 5% Figure IV 5

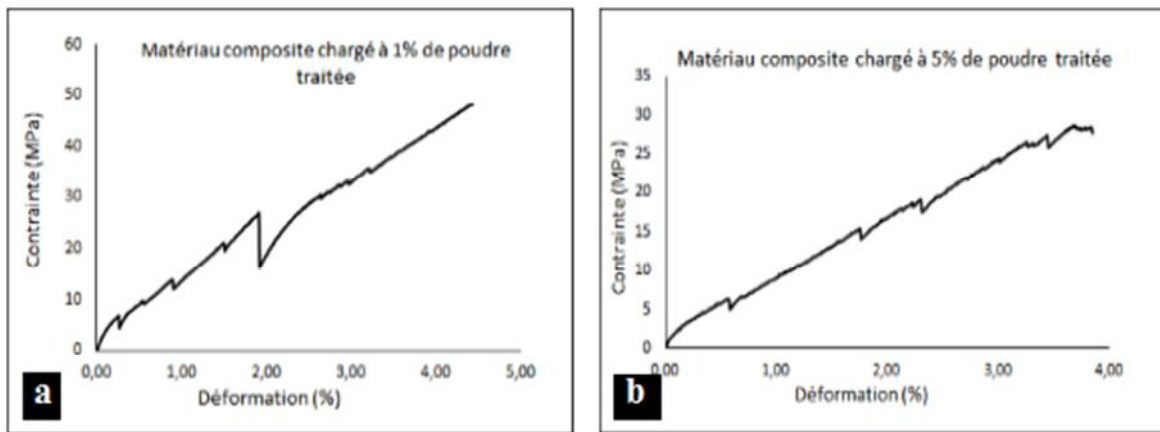


Figure IV 5 : Courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée. a) 1% de poudre traitée, b) : 5% de poudre traitée

Nous superposition les courbe des matériaux composites avec poudre traitée et non traitée

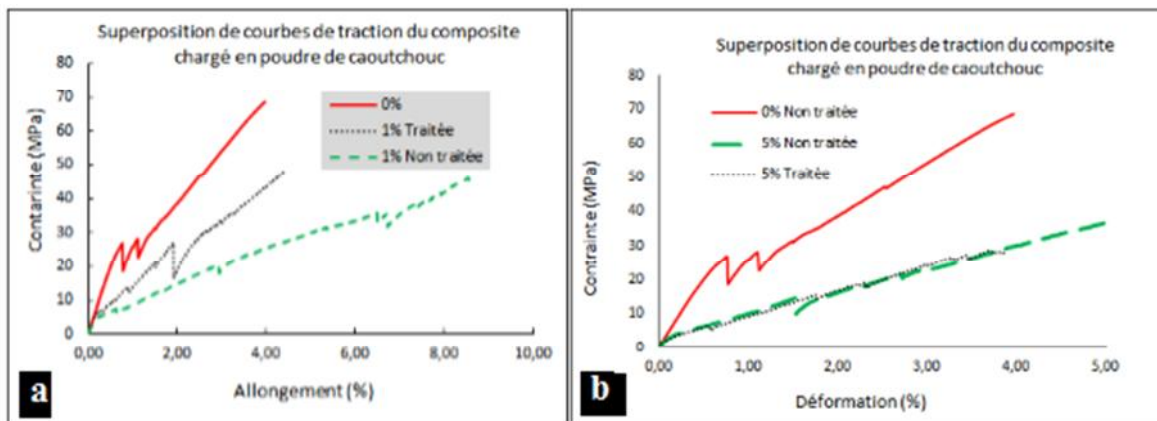


Figure IV6 : Superposition des courbes de traction du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée et non traitée .a) 1% de poudre, b) : 5% de poudre

Nous observons sur les courbes que le traitement des poudres n’apporte pas d’amélioration de la contrainte maximale, mais engendre une augmentation de l’allongement à la rupture.

Tableau IV 2Caractéristique mécanique en traction des matériaux composites

	Module d'élasticité	Contrainte maximale	Allongement à la rupture
0% Non traitée	4107	68,60	3,96%
1% Non traitée	2276	46,00	8,63%
1% Traitée	3538	48,00	4,44%
5% Non traitée	2526	38,60	5,00%
5% Traitée	1451	28,00	3,85%
10% Non traitée	2393	39,00	3,92%
15% Non traitée	2145	26,00	3,23%

A partir des données du tableau on trace les histogrammes ci-dessous.

Variation du module d'élasticité du matériau composite en fonction de la charge poudre de caoutchouc.

- Le matériau composite devient moins résistants en avec l'ajout de la charge élastomérique figure IV 7.

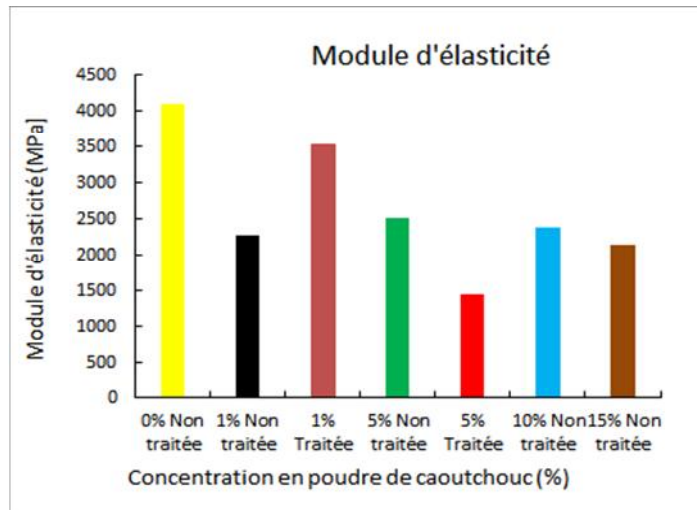


Figure .IV.7 : Histogramme variation du module d'élasticité en fonction de la charge

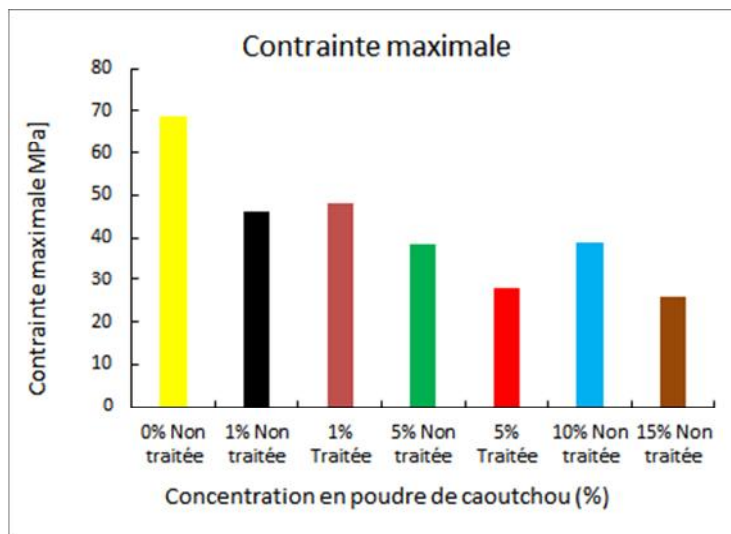


Figure IV.8 : Histogramme variation de la contrainte maximale en fonction de la charge

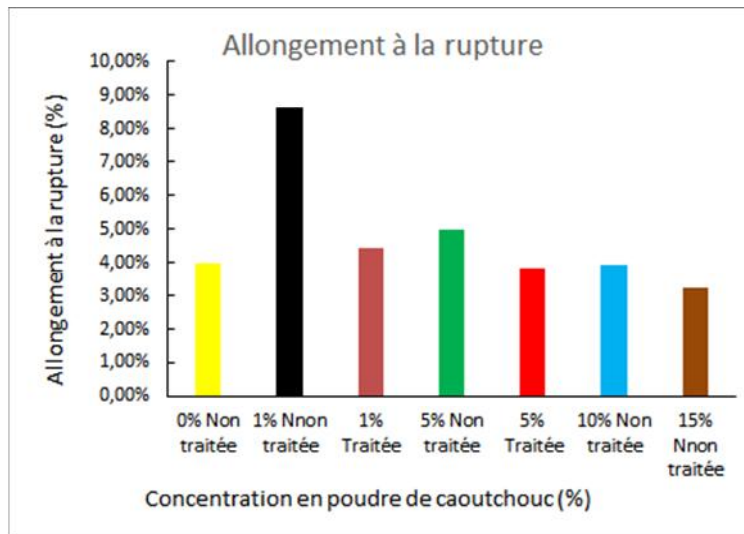


Figure IV.9 : Histogramme variation de l'allongement en fonction de la charge

IV.1.2 Résultats des essais de flexion :

Les essais de flexion ont été menés au laboratoire Génie et science des matériaux à l'université de Boumerdés.

Les éprouvettes de flexion sont élaborées selon la norme ISO 178

Tableau IV.3. : Dimensions en mm des éprouvettes de flexion selon la norme ISO 178

Matériau	Longueur l(mm)	Distance entre appuis L(mm)	LargeurL (mm)	Épaisseur h (mm)
Type III	85	40	15	4

IV.1.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine seule

Le comportement mécanique en flexion de la résine polyester est un comportement purement fragile comme il est indiqué par la figure ci-dessous, la force avant la rupture a atteint 88,3N soit une contrainte de 70,64 MPa (concorde avec le cahier des charges), la déformation à la rupture est de 0,1%, comportement très fragile.

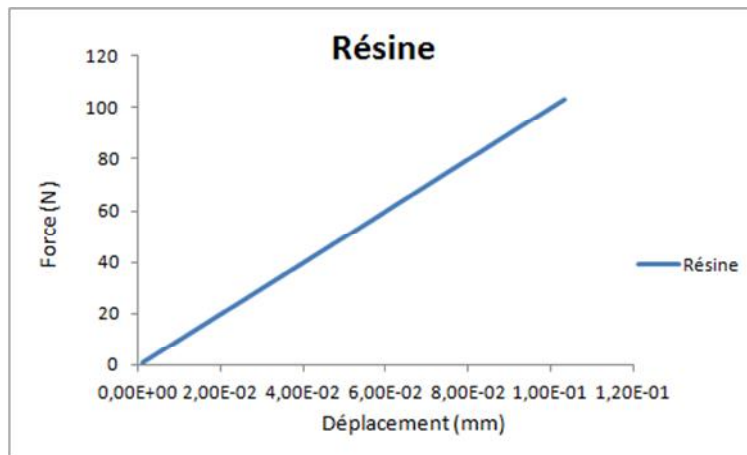


Figure IV.10 : Courbe force-flèche du matériau résine polyester

IV.1.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en poudre de caoutchouc non traitée

Nous présentons les résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine polyester fibre de verre) chargée en poudre de caoutchouc non traitée.

Nous regroupons dans la figure IV 11 ci-dessous, les courbes force flèche obtenues à partir des essais de flexion pour les mélanges résine plus poudre de caoutchouc non traitée avec les pourcentages 1%, 5%, 10% et 15%, .

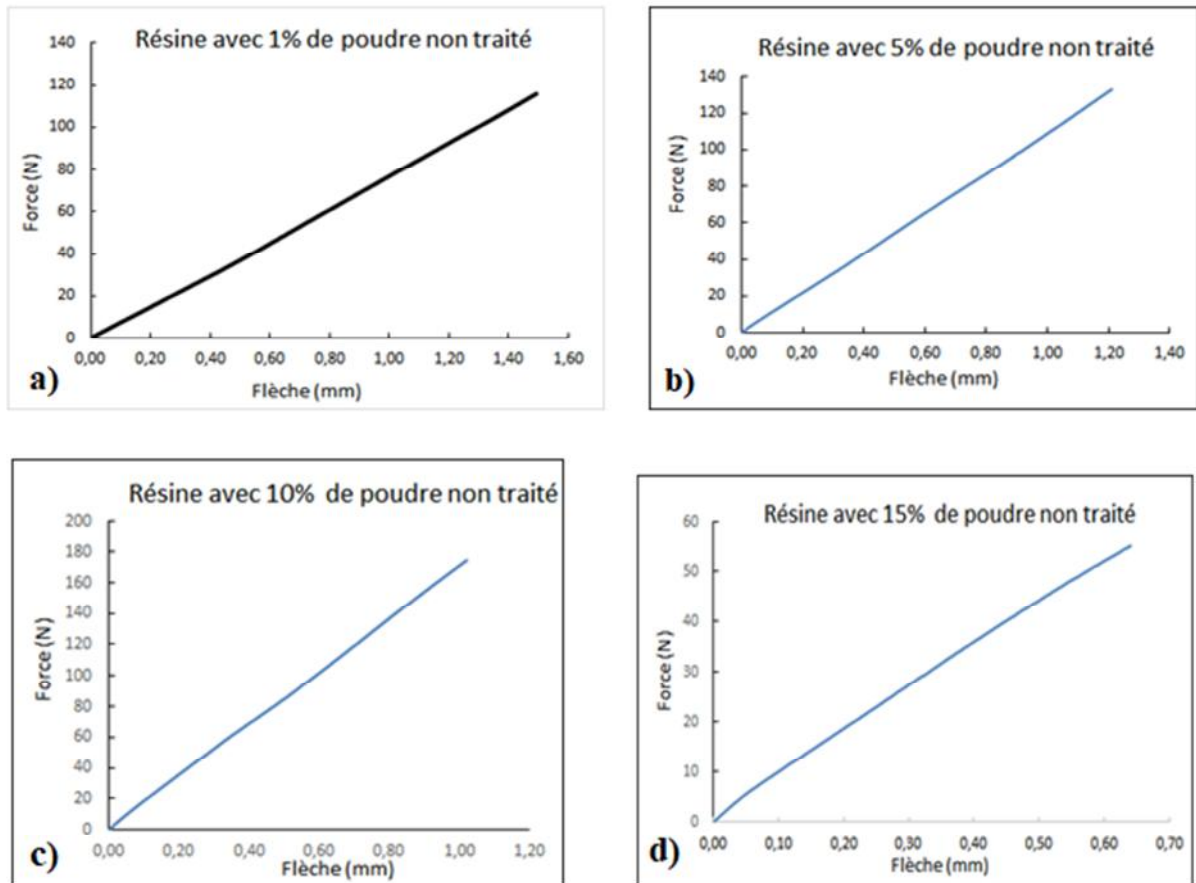


Figure .IV.11 : Courbes force-flèche du matériau résine polyester chargé en poudre de caoutchouc non traitée

a) 1% de poudre, b) 5% de poudre, c)10% de poudre et d) 15% de poudre

L'ajout de la poudre de caoutchouc, non traité, à la résine ne change pas son comportement mécanique en flexion, le comportement de tous les mélanges (résine +poudre de caoutchouc non traité) est un comportement fragile avec une rupture brusque, c'est le même comportement que pour la résine seule.

La superposition des courbes de flexion pour les différents pourcentages, est donnée sur la figure IV12.

- L'ajout de 1% de charge augmente la déformation de la résine de 0,1% à 1,49%(donc améliore relativement la ductilité).
- L'ajout de 10% de charge augmente la force, donc la résistance en flexion, elle passe de 88,3N à 174,00N.
- L'ajout de 15% de charge altère la résistance en flexion de la résine.

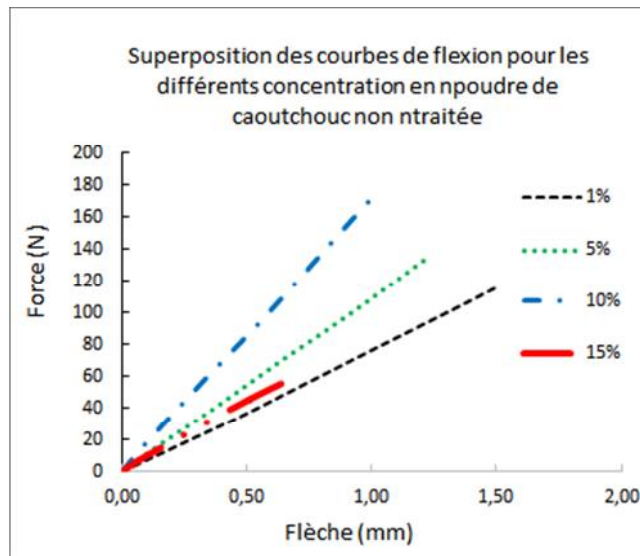


Figure .IV.12 : Superposition des courbes force-flèche du matériau résine polyester chargé en poudre de caoutchouc non traitée avec tous les pourcentages

A partir des courbes forces fleches pour chaque mélange, on note sur le tableau IV les valeurs de la fleche maximale et de la force maximale.

Tableau .IV.4 : Flèche maximale et force maximale dans le cas de la poudre non traitée

Pourcentage de poudre	1%	5%	10%	15%
Force max	116,00	132,00	174,00	54,70
Flèche	1,49	1,2	1,02	0,60

A partir des résultats du tableau IV 4 on trace les histogrammes ci-dessous ;

- Histogramme de la figure IV13 représentant la variation de la flèche du mélange (résine + charge) en fonction du taux de charge. La flèche est inversement proportionnelle avec le taux de charge.

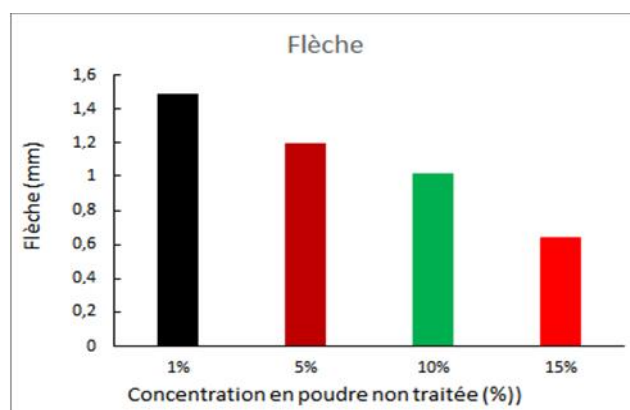


Figure .IV.13 : Histogramme de la variation de la flèche en fonction du taux de charge

- la figure IV 14 représentant la variation de la force lors de l'essai de flexion du mélange (résine + charge) en fonction du taux de charge. La force est proportionnelle aux taux de charges jusqu'à 10%, l'ajout de 15% de charge à la résine donne le mélange le moins résistant en flexion.

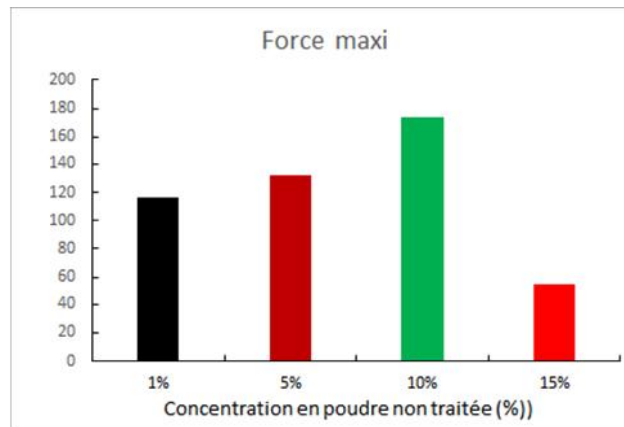


Figure .IV.14 : Histogramme de la variation de la force maximale en fonction du taux de charge

IV.1.2.3 Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre) :

La courbe force flèche du matériau composite, élaboré à partir de la résine polyester et renforcé en fibre de verre, est donnée dans la figure IV 15 ci-dessous. La courbe présente deux phases ; la première phase correspond à une droite commençant de l'origine jusqu'à la force de 745N, où le comportement est élastique et réversible, à partir de cette valeur, c'est la deuxième phase, la résine se casse et les fibres supportent l'effort, la force chute jusqu'à 400N, où les fibres vont rompre à leurs tours.

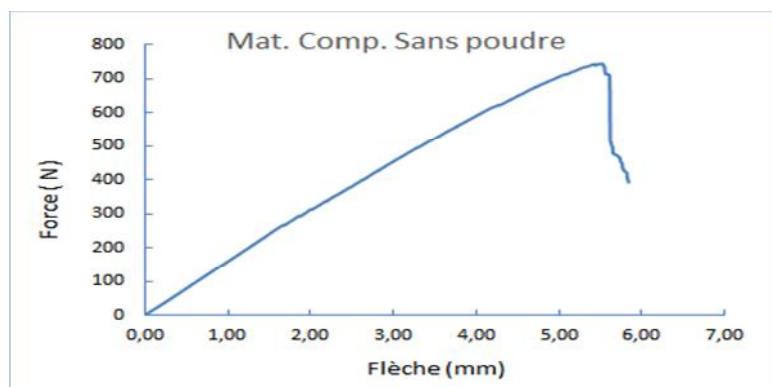


Figure .IV.15 . Courbes force-flèche du matériau composite résine polyester fibre de verre

IV.1.2.4 Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre et chargée en poudre de caoutchouc) :

L'influence de la poudre du caoutchouc sur le comportement mécanique en flexion a été étudié pour les matériau composite chargé en poudre, en prenant en considération les deux états de poudre, traitée et non traitée.

➤ Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre et chargée en poudre de caoutchouc) : poudre non traitée

Nous regroupons sur la figure IV 18 les courbes force flèche pour les différents matériaux composites chargés en différents pourcentages de poudre non traitées.

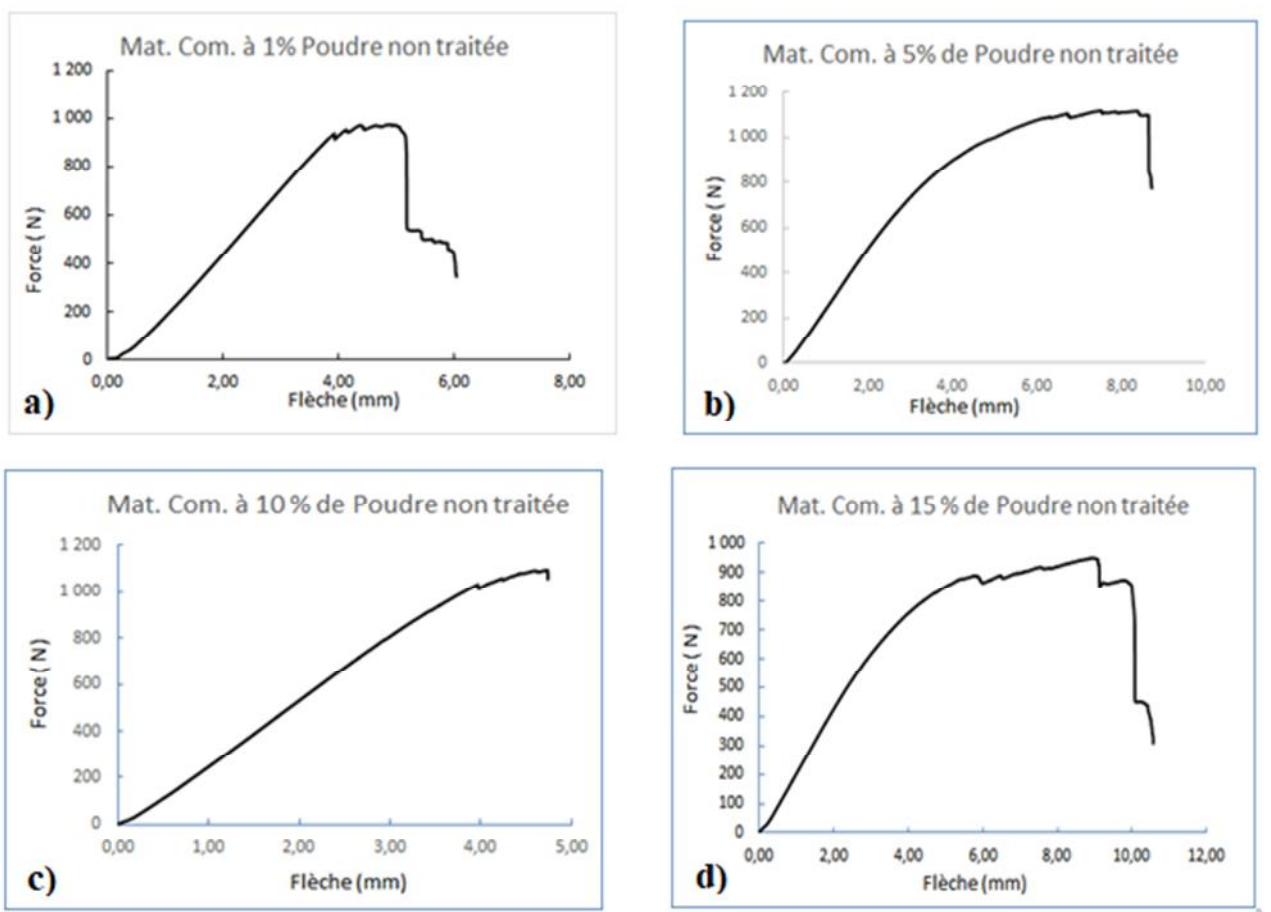


Figure .IV.16 : Courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée

a) 1% de charge, b) 5% de charge, c) 10% de charge et d) 15% de charge

En comparant les valeurs de force et de flèche du matériau composite non chargé, on remarque qu'en flexion l'ajout de la charge avec tous les pourcentages à amélioré ces caractéristiques.

- L'ajout de 1% de charge augmente la force à 969 N (la force est de 745 N pour le matériau composite sans charge), la flèche atteint la valeur de 5mm (pour le matériau composite sans charge la flèche est de 5mm)
- L'ajout de 5% de charge augmente la force jusqu'à 1120 N et la flèche jusqu'à 8,83mm
- L'ajout de 10% de charge augmente la force jusqu'à 1100 N et la flèche diminue jusqu'à 4,73 ;
- L'ajout de 15% de charge augmente la force jusqu'à 945 n et augmente aussi la flèche jusqu'à 9,07mm.

Nous superposons les courbes forces flèches des matériaux composites chargés avec différents pourcentages de poudre de caoutchouc ; 1%,5%,10% et 15% dans la figure ci-dessous.

- Nous constatons que les deux matériaux composites, chargés respectivement à 5% et 15% de poudre de caoutchouc non traitées, offrent un bon compromis force flèche, parmi tous les autres matériaux composites.

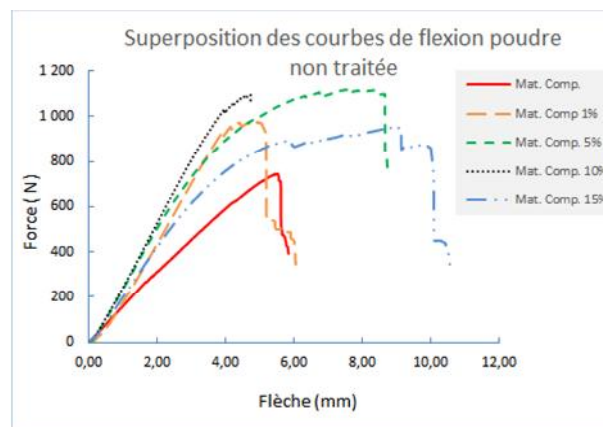


Figure .IV.17: Superposition des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc non traitée

Nous regroupons les valeurs des forces maximales et les flèches dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV 5 caractéristique du matériau composite en flexion

Pourcentage de charge	Flèche	Force maxi
0%	5,53	745
1%	5	969
5%	8,38	1120
10%	4,73	1100
15%	9,07	945

A partir des données du tableau on trace les histogrammes suivants.

- Le maximum de la flèche est atteint pour le matériau composite chargé à 5% de poudre de caoutchouc non traitée.

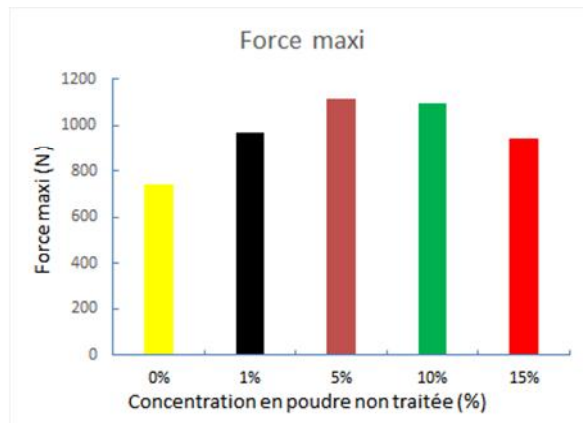


Figure .IV.18 : Histogramme de la variation de la force maximum en fonction du pourcentage de charge non traitée

- Le maximum de la flèche est atteint pour le matériau composite chargé à 15% de poudre de caoutchouc.

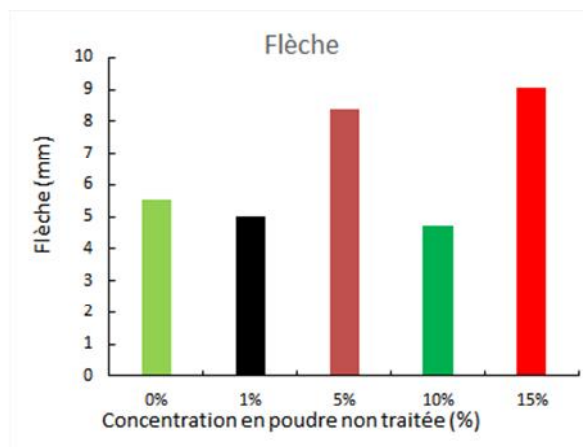


Figure .IV.19 : Histogramme de la variation de la flèche en fonction du pourcentage de charge non traitée

- **Résultats de l'essai de flexion du matériau composite (résine renforcée en fibre de verre et chargée en poudre de caoutchouc) : poudre non traitée**

Des essais de flexion ont été réalisés pour les matériaux composites chargés en poudre de caoutchouc traitées, séjournant au micro onde pendant 1mn à la puissance de 650 watts.

- Le matériau composite chargé à 1% de poudre de caoutchouc traitée, atteint une flèche de 11,2mm, sous une force de 801N.
- Le matériau composite chargé à 5% de poudre de caoutchouc traitée, atteint une flèche de 5,97mm, sous une force de 1020 N.

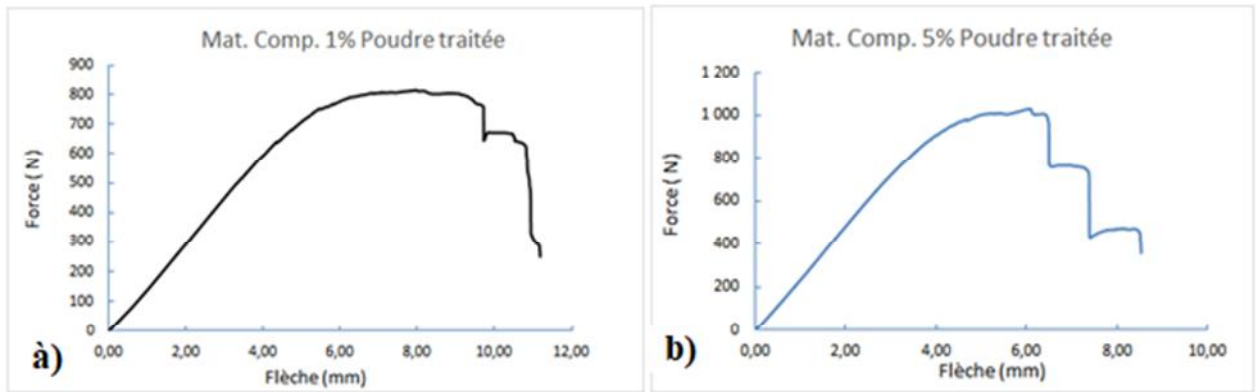


Figure .IV.20 : Courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée a) 1% de charge et b) 5% de charge

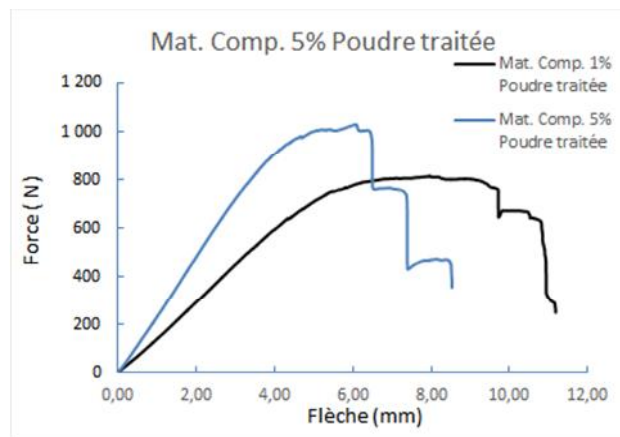


Figure .IV.21 : Superposition des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée 1% de charge et 5% de charge

- L'ajout de 1% de poudre traitée, augmente la force(le double) du matériau composite et maintient sa flèche jusqu'à 11,2mm.
- L'ajout de 5% de poudre traitée, augmente la force jusqu'à 1020 N et maintient la déformation à 5mm.
- **Comparaison du comportement mécanique en flexion entre poudre traitée et poudre non traitée.**

Pour le même pourcentage de charge, traité et non traité, on compare le comportement mécanique en flexion, du matériau composite, comme indiqué sur la figure IV24 ci-dessous.

- Pour 1% de charge, la poudre non traitée donne une meilleure force et la poudre traitée donne une meilleure flèche.
- Pour 5% de charge, le comportement du matériau composite est le même pour les deux cas de poudre, traitée et non traitée, jusqu'à la force de 1020N où le matériau

composite à 5% de poudre traitée casse, alors que pour la charge non traitée, le matériau composite résiste encore jusqu'à 1120N.

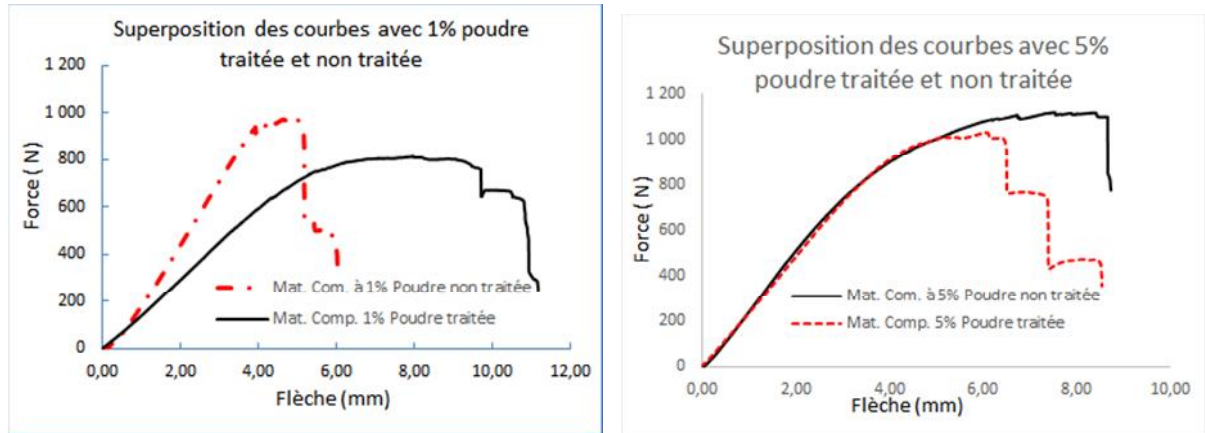


Figure IV.22 : Superposition des courbes force-flèche du matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée et non traitée 1% et 5% de charge.

IV.1.3 Résultats de l'essai de résilience

Nous regroupons les résultats obtenus de l'essai de résilience dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai de résilience

Composite Non traité	Résilience (J/Cm ²)	Composite Traité	Résilience (J/Cm ²)
Résine seule	0,17	/	/
Résine + fibre	4,52	/	/
1% RN	0,23	/	/
5% RN	0.16	/	/
10% RN	0,13	/	/
15% RN	0.073	/	/
1 CNT	5.70	1 CT	5.301
5 CNT	5.83	5CT	11.87
10 CNT	13.61	10 CT	15.94
15 CNT	2.26	15CT	5.70

A partir des résultats de résilience du tableau précédent, on trace les courbes suivantes :

1) L'influence de la charge traitée sur le matériau composite

L'ajout de la charge, poudre de caoutchouc augmente la résilience du matériau composite (résine plus fibre de verre) jusqu'au taux de 10%, où la résilience atteint son maximum (15,94J/Cm²), l'ajout de 15% de poudre de caoutchouc fait chuter la résilience jusqu'à 5,70 J/Cm²; comme le montre la figure IV25.

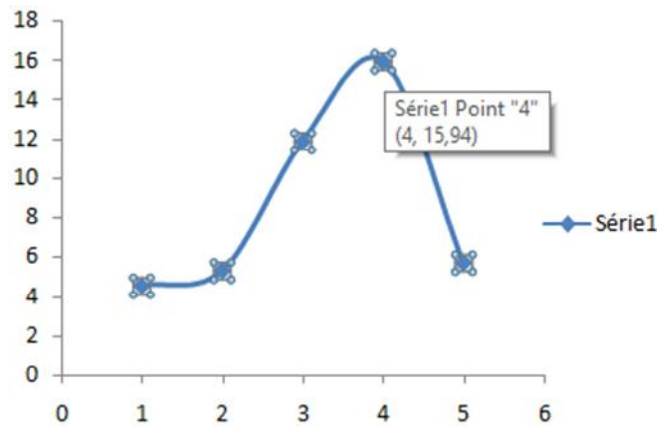


Figure IV.23 : Variation de la résilience du Matériau composite en fonction du taux de la charge de caoutchouc traitée

2) L'influence de la charge non traitée sur le matériau composite

L'ajout de la charge, poudre de caoutchouc non traitée, au matériau composite, fait varier la résilience avec la même tendance que dans le cas de la charge traitée. Le maximum de résilience atteint dans ce cas est plus faible, pour 10% de charge la résilience a une valeur de 13,61 J/Cm².

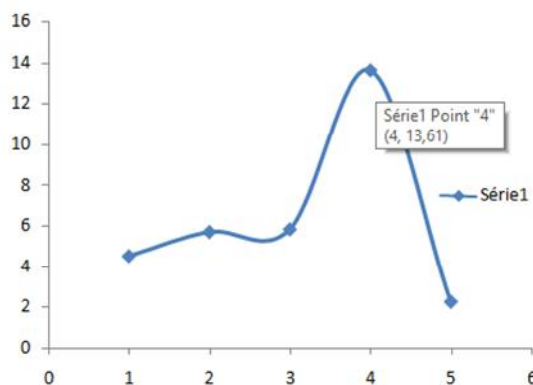


Figure IV.24 : Variation de la résilience du Matériau composite en fonction du taux de la charge de caoutchouc non traitée

3) L'influence de la charge non traitée sur la résine (matrice).

L'étude de la variation de la résilience de la résine (matrice) en fonction du taux de charge ajoutée, montre que :

- L'ajout de 1% de charge augmente la résilience de la résine

- Au-delà de 1% de charge, influence est négative : plus la quantité de charge augmente (5%, 10% et 15%), plus la résilience diminue.

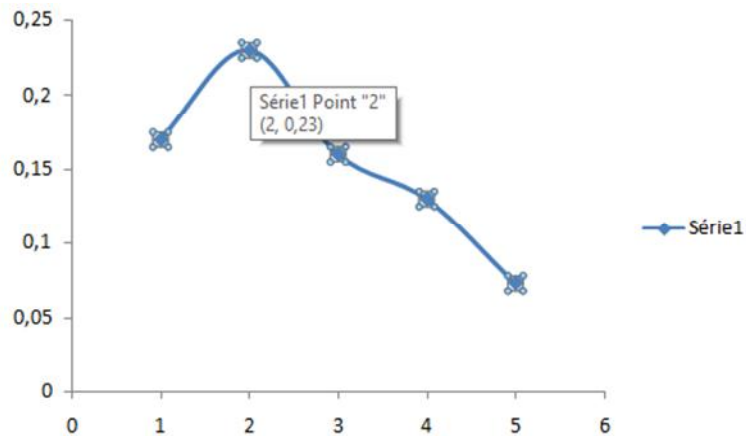


Figure IV.25 : Variation de la résilience de la résine en fonction du taux de la charge de caoutchouc non traitée

IV.1.4 Résultats de l'essai de micro dureté

Les essais de micro dureté ont été effectués à l'entreprise nationale des industries électroménagères ENIEM Oued Aissi, les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Résultats de l'essai de micro dureté

Echantillon	D1	D2	HV0.05
4 4CN-7-	102.82	105.66	8.53
	105.40	113.81	7.71
	121.31	118.86	6.42
	127.90	131.37	5.51
	115.18	115.41	6.97
2 3RN-4-	148.23	155.60	4.01
	151.23	151.23	4.05
	148.28	145.97	4.28
	133.71	135.69	5.10
	135.69	141.22	4.83
3 3CT-6-	174.20	167.28	3.17
	171.15	163.52	3.31
1 1RN-5-	167.05	169.82	3.26
	140.67	137.35	4.79
	147.52	127.93	4.88
	144.61	134.43	4.76
	140.91	126.36	5.19
	149.97	131.78	4.67

A partir du tableau IV.7 on trouve les valeurs de micro dureté des échantillons analysés ; à de ces données on constate :

Echantillon 1(1RN-5 contient de la résine plus 1% de poudre)

- la dureté de la résine est dans l'intervalle [4,67- 5,19]
- la dureté de la poudre de caoutchouc est de 3,26

Echantillon 2 (3RN-4 contient de la résine plus 10% de poudre)

- la dureté de la résine est dans l'intervalle [4,83- 5,10]
- la dureté de la poudre de caoutchouc est dans l'intervalle [4,01-4,28]

Echantillon 3 (3CT contient de la résine de la fibre de verre et 10% de poudre)

La valeur de micro dureté trouvée est dans l'intervalle [3,17-3,31], ca correspond à la valeur de dureté de la poudre de caoutchouc, ici nous n'avons pas ciblé les autres phases résine et fibre de verre.

Echantillon 4 (4CN, contient de la résine de la fibre et 15% de poudre de caoutchouc)

- la dureté de la fibre est dans l'intervalle [5,51- 8,53]°

Ici la phase cible est uniquement la fibre de verre.

En résumé les valeurs de dureté des différents constituants de notre matériau composite dans le tableau ci-dessous ;

Tableau IV.8 : Résumé des résultats de l'essai de micro dureté

Constituant	Résine	Fibre	Poudre de caoutchouc
Dureté	[4,67- 5,19]	[5,51- 8,53]°	[3,17-3,31],

IV.2 : Résultats de la caractérisation physique

Nous avons passé la charge, poudre de caoutchouc, à l'analyse diffraction des rayons X (DRX)

IV.2.1 Résultats de la caractérisation DRX :

- 1) Poudre de caoutchouc non traitée

Le spectre de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée est donné sur la figure IV 26

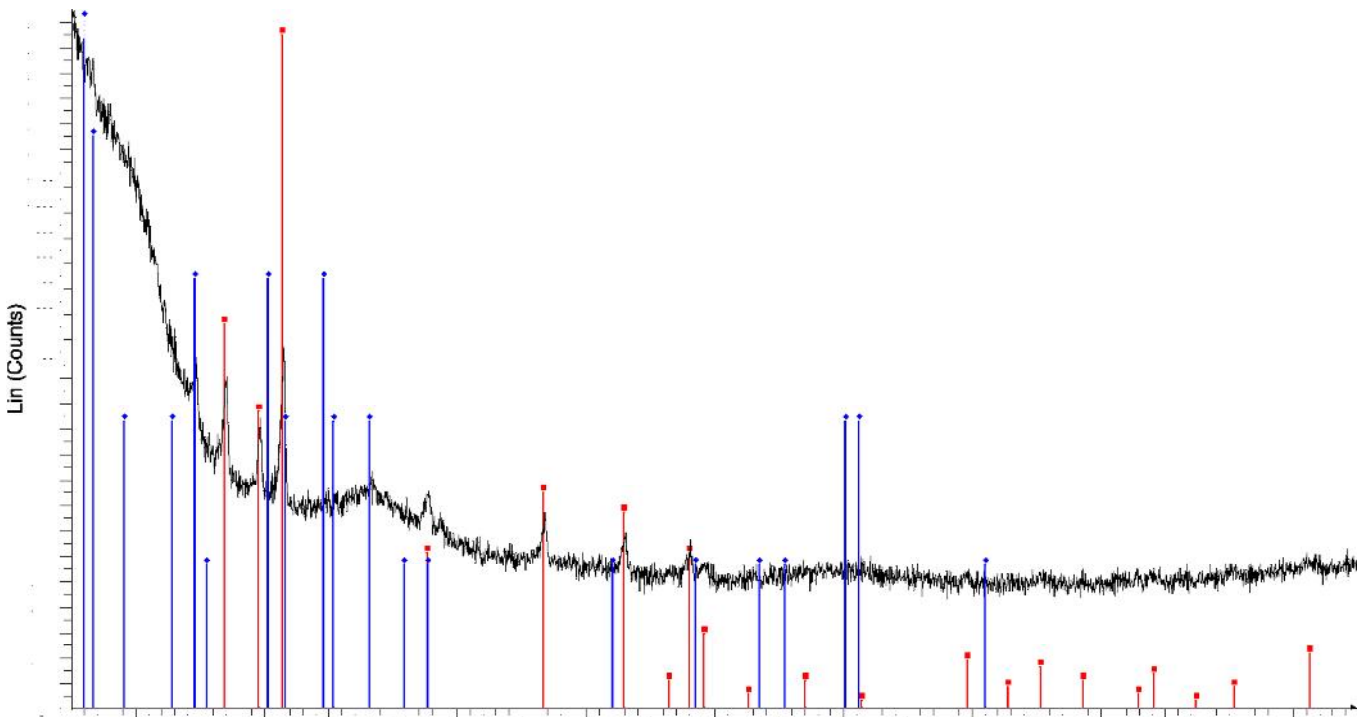


Figure IV 26 : Spectre de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée

Sur le diffractogramme de la poudre non traitée, nous notons l'existence de deux pics caractéristiques, correspondants aux composés, oxyde de zinc ZnO et de carbone C

- Le réseau de l'oxyde de Zinc est Hexagonal dont les paramètres de la maille sont :
- a 3.24982 - b 3.24982 - c 5.20661
- Le réseau du carbone C est Hexagonal dont les paramètres de la maille sont
- a 8.94800 - b 8.94800 - c 14.07800

2) Poudre de caoutchouc traitée

Le spectre de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée est donné sur la figure IV 27

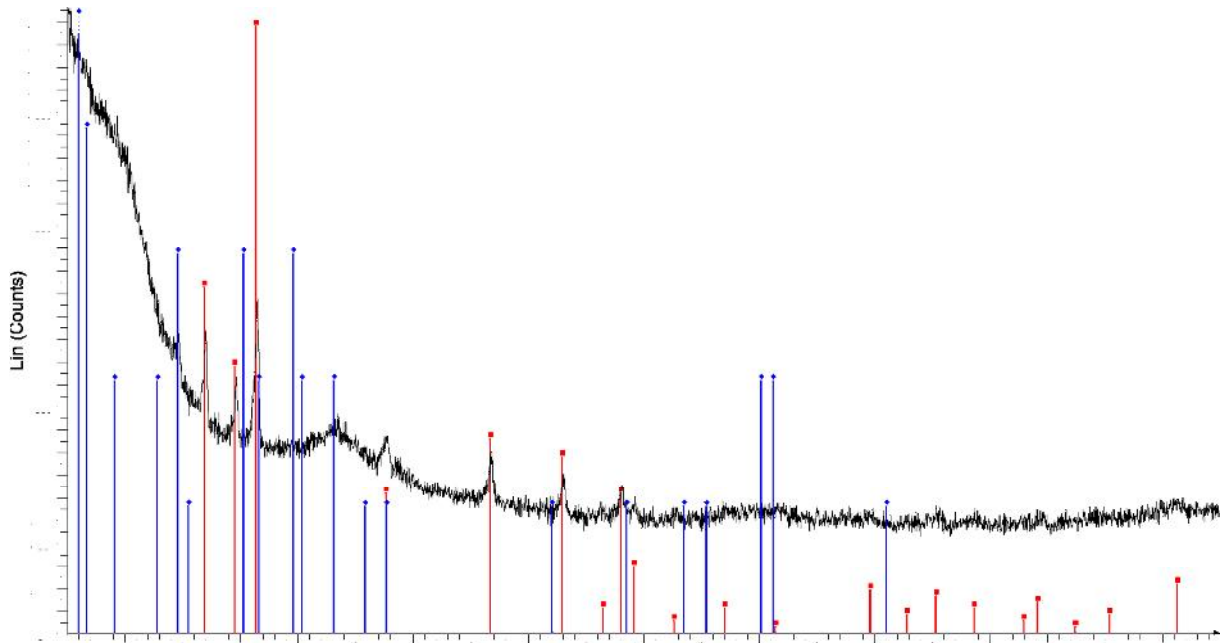


Figure IV 27 : Le spectre de diffraction RX de la poudre de caoutchouc non traitée

Sur le diffractogramme de la poudre traitée, nous notons l'existence de deux pics caractéristiques, correspondant aux composés, oxyde de zinc ZnO et de carbone C.

- Le réseau de l'oxyde de Zinc est Hexagonal dont les paramètres de la maille sont :
- a 3.24982 - b 3.24982 - c 5.20661
- Le réseau du carbone C est Hexagonal dont les paramètres de la maille sont
- a 8.94800 - b 8.94800 - c 14.07800
- Notons que dans les deux spectres de diffraction des RX (poudre traitée et poudre non traitée), nous n'avons pas révélé l'existence du composant soufre, responsable de la vulcanisation du caoutchouc.
- Notons que sur les deux spectres de RX, nous trouvons les mêmes éléments : carbone et oxyde de Zinc, avec les mêmes réseaux et les mêmes paramètres de maille.

Conclusion

La caractérisation mécanique de nos échantillons en matériaux composite est réalisée, en faisant des essais de traction, flexion, résilience et micro dureté, une analyse au RX de la poudre de caoutchouc a été faite pour la poudre traitée et non traitée.

Conclusion générale

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 sur l'influence d'une charge élastomère sur un matériau composite.

Pour mener à bien notre étude nous avons sollicité plusieurs laboratoires d'entreprise nationales et laboratoires d'institutions universitaires.

La matière première utilisée pour l'élaboration de nos échantillons a été gracieusement donnée par une entreprise privée de construction navale (SAKOMAS).

Des éprouvettes normalisées de traction, de flexion et de résilience ont été élaborées.

Des tests de dureté ont été menés.

Les résultats qui découlent de notre investigation sont les suivantes :

Résultats de l'essai de micro dureté :

- Les duretés des phases ciblées de notre matériau composite sont :
[4,67- 5,19] pour la résine, [5,51- 8,53] pour la fibre de verre et
[3,17-3,31] pour la charge d'élastomère.

- **Résultats de l'essai de traction : les éprouvettes élaborées selon la norme ISO 527 :**

Pour la résine

- le mélange résine plus poudre de caoutchouc à 1% et 5% donne le meilleur résultat (le comportement demeure fragile). Pour 5% de poudre non traitée la contrainte maximale est de 13MPa et la déformation est de 1,35%.

Pour le matériau composite

- L'ajout de la poudre de caoutchouc (traitée et non traitée) au matériau composite fait baisser la contrainte maximale.
 - La déformation du matériau composite augmente avec l'ajout de 1% et 5% de poudre de caoutchouc non traitée, pour l'ajout de 1% la déformation est de 8,5%, et pour l'ajout de 5% la déformation est de 5,5% (alors que la déformation du matériau composite non chargé est de 3,96%).
 - une légère augmentation (négligeable) de la déformation est constatée pour le matériau composite chargé en poudre de caoutchouc traitée.
 - le module d'élasticité du matériau composite chargé à 1% de poudre de caoutchouc traitée est le plus fort parmi les autres pourcentages de charge, mais il reste inférieur au module d'élasticité du matériau composite non chargé.
-
- **Résultats de l'essai de flexion : les éprouvettes élaborées selon la norme ISO 178**

Pour la résine

- L'ajout de 10% de poudre de caoutchouc non traitée à la résine augmente la force jusqu'à 170N et la flèche jusqu'à 1mm (la force de la résine seule est de 88,3N, la flèche est de 0,1mm).
- L'ajout de 1% de poudre de caoutchouc, non traitée, augmente la force jusqu'à 120N et la flèche de 1,5mm (plus importante que pour 10%).

Pour le matériau composite

- L'ajout de 5% de charge non traitée, au matériau composite augmente la force jusqu'à 1120N et la flèche jusqu'à 8,38mm, comparant avec le matériau composite non chargé qui a une force de 745N et une flèche de 5,53mm.
- l'ajout de 1% de charge traitée augmente la force du matériau composite jusqu'à 801N et la flèche jusqu'à 11,2mm.

- Résultats de l'essai de résilience

Pour la résine seule

L'ajout de 1% de charge a augmenté la résilience jusqu'à $0,23\text{J}/\text{Cm}^2$ comparant à la résilience de la résine seule qui vaut $0,17\text{ J}/\text{Cm}^2$.

- Les autres pourcentages de charge (5%,10% et 15%) font baisser la résilience.

Pour le matériau composite

- L'ajout de 1% et 5% de charge non traitée font augmenter légèrement la résilience du matériau composite, par contre, avec l'ajout de 10% de charge, la résilience atteint une valeur de $13,61\text{ J}/\text{Cm}^2$.

➤ **Les résultats de l'analyse au rayon X (DRX) :**

Les diffractogrammes de l'analyse, ne donnent aucune différence de maille entre la poudre de caoutchouc traitée et non traitée, au niveau des intensités des pics et des éléments constituant la poudre.

Les différents matériaux composite résine polyester/ fibre de verre, chargés en poudre de caoutchouc traitée et non traitée, ont des caractéristiques mécaniques (en traction, flexion et résilience) différentes, c'est le cahier de charge de l'utilisateur qui décidera du choix du matériau composite à élaborer.

Perspectives :

- Approfondir l'étude sur l'existence de l'influence du traitement de dévulcanisation de la poudre de caoutchouc sur le comportement mécanique de la résine et du matériau composite.
- Répondre l'étude en ajoutant les autres pourcentages entre 1% et 5%, qui sont 2%, 3% et 4%, et les pourcentages entre 5% et 10% qui sont 6%, 7%, 8% et 9%, et les pourcentages entre 10% et 15%, qui sont 11%, 12%, 13%, 14%.

Références bibliographiques

- [1] **Djeboun Youcef**, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [2] **Jean Marie Berthelot**, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4^{ème} Edition, Lavoisier 2005.
- [3] **Daniel Gay**, Matériaux Composites 4^{ème} Edition, Hermès 2009.
- [4] **Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot**, Des Matériaux, 3^{ème} Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [5] **Glossaire** des matériaux composites, Edition CARMA, octobre 2006.
- [6] **BENSAID.S**, « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », thèse de doctorat, l'université de Nantes, 2006.
- [7] **Dr Errouane Lahouaria**, Construction des Navires, septembre 2016.
- [8] **A. DUSOTOIT COUCAUD**, Caractérisations physiologique et moléculaire des transporteurs de sucres et de polyols des cellules laticifères chez *Hevea brasiliensis*, en relation avec la production de latex, Thèse de l'Université Blaise Pascal, 2009.
- [9] **A. CHETTAH**, Comportement vibroacoustique des structures élaborées à partir de poudrettes de pneus recyclés, Thèse de l'École Centrale de Lyon et l'Université de Reims, 2008.
- [10] **Michel Dequatremare Thierry Devers**, Matériaux parcours IUT, Dunod, paris ,2012
- [11] **M. Mezzo Aghiles**, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [12] **Abderrazak Bezazi**, « Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwiches en flexion 3 points », Thèse de doctorat, Construction Mécanique, Université Annaba, 2003.
- [13] **Ibrahim Mohamed Haisam**, Elaboration des matériaux composites modèles uni filamentaire à fibres longues et matrice silice sil-gel et caractérisations micromécaniques de l'interface, Thèse de doctorat Lyon 1997. Marc Moreau, Directeur de recherche CNRS, Université Paul Sabatier de Toulouse.