

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de Master en génie des matériaux

***Influence du nombre de passes et de
l'angle d'enroulement des fibres sur les
propriétés mécaniques d'un composite
époxy-fibre de jute.***

Réalisé par : - Massinissa IDIR

Sous la direction de : - M. Abd El Madjid KASSER

- M. Djamel KARI

Présenté et soutenu publiquement le (01/07/2017)

Composition du Jury :

Président	Mme. Nadia KECHOUD	Docteur	ENP Alger
Rapporteur/ Promoteur	M. Abd El Madjid KASSER	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP Alger

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de Master en génie des matériaux

***Influence du nombre de passes et de
l'angle d'enroulement des fibres sur les
propriétés mécaniques d'un composite
époxy-fibre de jute.***

Réalisé par : - Massinissa IDIR

Sous la direction de : - M. Abd El Madjid KASSER

- M. Djamel KARI

Présenté et soutenu publiquement le (01/07/2017)

Composition du Jury :

Président	Mme. Nadia KECHOUD	Docteur	ENP Alger
Rapporteur/ Promoteur	M. Abd El Madjid KASSER	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP Alger

Remerciements

En premier lieu, mes vifs remerciements et profondes gratitude à DIEU tout puissant qui m'a comblé des bienfaits de l'islam et de la science.

C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont inspiré, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, de leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.

Que mon promoteur, le Docteur Kasser Abdelmadjid de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, trouve ici ma profonde gratitude pour ses précieux conseils, aide, orientation et disponibilité.

Je voudrais exprimer aussi mes remerciements ainsi que ma profonde gratitude à mon co-promoteur, le docteur Kari Djamel el dine qui m'a accordé sa confiance en me permettant de réaliser les parties expérimentales de mes projets de fin d'études et de master dans son atelier à Haizer dans la willaya de Bouira. Il m'a été d'un grand secours et d'une aide inestimable dans la réalisation de ce travail.

Je tiens plus particulièrement à remercier aussi la direction de l'entreprise MAGHREB PIPE de M'sila Algérie pour sa collaboration positive en fournissant l'accès à l'atelier de préparation des échantillons pour les essais mécaniques. Je remercie en particulier monsieur BAALI Brahim, Directeur de l'usine pour son accueil et son accompagnement durant le déroulement de mes essais effectués au sein du laboratoire de l'usine.

Je voudrais remercier également tous mes enseignants pour leurs dévouement durant les années de formation que j'ai passé avec eux à l'ENP et en particulier ceux parmi eux qui ont accepté d'être membre de mon jury de soutenance.

Je tien enfin à remercier toutes les personnes qui m'ont aidés, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Idir Massinissa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents sous le Regard de Dieu en souhaitant intérieurement qu'il me Les garde.

À mes frères et sœurs.

À ma grande famille.

À tous mes enseignants.

À tous mes amis.

Pareillement je ne pas oublier ceux qui ont de près ou de loin contribué à ma formation.

ملخص

العمل المنجز هو دراسة مفاهيمية لتطوير الأنابيب المركبة عن طريق لف الخيوط. مجال استخدام هذه التقنية واسع من بينه السيارات, الملاحة الجوية, الفضاء, الصناعات العسكرية و الأنابيب الخ... تم إعداد أنابيب مركبة بسمكين مختلفين باستخدام ألياف الجوت ومصنوفة راتنجيات الايبوكسي مع زاوية لف مختلفة من الألياف. في اختبار الشد الأنابيب ذات السمك الأصغر لها أعلى معامل يونغ. نستنتج أيضا أن الأنابيب المصنوعة من زاوية 55°-60° هي الأكثر فعالية بالمقارنة مع غيرها.

كلمات مفتاحية: راتنجيات الايبوكسي , ألياف الجوت , الألياف الزجاجية, زاوية اللف, خطوة اللف, معامل يونغ

Abstract

The work carried out in this project is a conceptual study for the elaboration of a composite pipe material by filament winding. This technique is used in various fields of industry such as automobile industry, aeronautics, aerospace, military industry, piping ...etc. The composite pipes are elaborated with 2 different thicknesses using reinforcing jute fibers and epoxy matrix with different winding angles of the fibers. The results showed that in traction, small thickness pipes have the highest Young modulus. We also deduced that the pipes elaborated with winding angles laying between (55°- 60°) have the best properties compared to others.

Keywords: epoxy matrix, jute fiber, fiberglass, winding angle, step winding, Young's modulus.

Résumé

Le travail réalisé est une étude conceptuelle pour l'élaboration des tubes composites par enroulement filamentaire. A noter que cette technique est utilisée dans les différents domaines industriels comme l'industrie automobile, l'aéronautique, l'aérospatiale, l'industrie militaire, les canalisations...etc. Les tubes composites sont élaborés en 2 différentes épaisseurs à l'aide de renfort en fibre de Jute et de matrice en résine époxy avec différents angle d'enroulement des fibres. Les résultats ont montré qu'en traction, les tubes de petite épaisseur ont le module de Young le plus élevé. On déduit aussi que les tubes élaborés avec un angle compris dans l'intervalle (55°- 60°) sont les plus performants par rapport aux autres.

Mots clés : résine époxy, fibre de Jute, angle d'enroulement, le pas d'enroulement, module de Young.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général.....09

Chapitre I : Etude bibliographique sur les composites

I. Etude bibliographique sur les composites.....11

I.1. Introduction11

I.2.Définition des matériaux composites11

I.3.Classification des matériaux composites12

I.3.Constituants des matériaux composites14

I.3.1.Renfort.....14

I.3.1.1.Les fibres et tissus15

I.3.1.1.2. Fibres de Formes linéiques16

I.3.1.1.3. Fibres de formes surfaciques.....16

I.3.1.1.4. Structures tissées unidirectionnel17

I.3.1.1.5. Les différents types des fibres selon la nature des composantes.....17

I.3.2.Matrices23

I.3.2.1. Résines thermodurcissables.....23

I.3.2.2. Résines thermoplastiques24

I.3.2.3. Matrices métalliques25

I.3.2.4. Autres types de résines.....25

Chapitre II : Elaboration et caractérisation

II. Elaboration et caractérisation des tubes.....26

II.1.Introduction26

II.2.Elaboration des tubes26

II.3.Caractérisation des tubes.....30

II.3. Essai de traction :32

II.4.Conclusion.....40

Conclusion générale.....41

Références bibliographique.....42

Liste des figures

Figures chapitre I

Figure I.1 : Matériau composite.....	11
Figure I.2 : Structure d'un matériau composite stratifié	11
Figure I.3 : Classification des matériaux composites.....	12
Figure I.4 : Classification des renforts.....	15
Figure I.5: Tissu multiaxial	16
Figure I.6: Fibre de verre	18
Figure I.7: Fibre de carbone.....	20
Figure I.8: Fibre d'aramide.....	21
Figure I.9 : Structure d'une fibre naturelle.....	22
Figure I.10 : Types de matrice.....	23

Figures chapitre II

Figure II.1 : Angle d'enroulement entre la fibre et l'axe du mandrin.....	26
Figure II.2 : Comportement de résine G 35 en traction.	27
Figure II.3 : Bobine de fibre dans leur place à la machine.....	28
Figure II.4 : Fibres passant dans le bain de résine	28
Figure II.5 : Réglage des fréquences de translation et de rotation	29
Figure II.6 : La machine en état de marche	29
Figure II.7 : Tubes composites jute/époxy réalisés	30
Figure II.8: comparaison du module de Young des 4 catégories des tubes à 3 couches à différents degrés	31
Figure II.9: Comparaison des contraintes maximal des 4 catégories des tubes à différents degrés	31
Figure II.10: Comparaison des déformations maximal des 4 catégories des tubes à différents degrés.	32
Figure II.11: Préparation des éprouvettes.....	32
Figure II.12: Machine de traction Zwick/Roell.....	33
Figure II.13: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°).....	34
Figure II.14: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°).....	34
Figure II.15: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (60°).....	35
Figure II.16: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (65°).....	35
Figure II.17: Comparaison du module de Young des 4 catégories des tubes à 8 couches à différents degrés	36
Figure II.18: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°).....	37

Liste des figures

Figure II.19: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°).....	37
Figure II.20: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (60°).....	38
Figure II.21: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (65°).....	38
Figure II.22: Comparaison du module de Young des 4 catégories des tubes à 10 couches à différents degrés	39
Figure II.23: Histogramme de comparaison du module de Young des 3 catégories de tube 3 couches, 8 couches et 10 couches.	40

Liste des tableaux

Tableaux chapitre I

Tableau I.1 : Composition des verres type E, D, R.....	18
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de la fibre de verre	19
Tableau I.3 : Caractéristiques mécanique des fibres de verre.	19
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de la fibre de carbone.....	20
Tableau I.5 : Caractéristiques des résines thermodurcissables	24
Tableau I.6 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	24

Tableaux chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristiques de la résine.....	26
Tableau II.2 : Caractéristiques de la résine.....	27
Tableau II.3 : Caractéristiques des fibres.	27
Tableau II.4 : Paramètres des essais de traction des tubes à 3 couches.	30
Tableau II.5 : Paramètres des essais de traction des tubes à 8 couches.	36
Tableau II.6 : Paramètres des essais de traction des tubes à 10 couches.	39

Introduction générale

De nos jours, les matériaux composites ont connu une évolution très remarquable. Ils ne cessent d'évoluer et gagner en importance, d'ailleurs, ils s'imposent dans beaucoup de domaines, par exemple, l'industrie automobile, l'aéronautique, l'industrie militaire, etc. ...

Vu les exigences toujours croissantes du consommateur, le domaine des matériaux composites se trouve immédiatement concerné, d'où la nécessité de développer des nouveaux produits qui répondent à ces exigences.

L'objectif d'un matériau composite est de combiner deux ou plusieurs matériaux tout en créant une synergie entre ces différents matériaux afin qu'il en résulte un composite plus performant que chacune des composantes prises individuellement.

Le choix du procédé de transformation est guidé à la fois par la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable), la forme de la pièce à réaliser, les performances visées, et les impératifs de production en termes de quantité et de qualité.

La réalisation de pièces en composites destinées aux marchés de grande diffusion (automobile, aéronautique, électricité, bâtiment, canalisation...) nécessite la mise en oeuvre de procédés de transformation fortement automatisés, à productivité élevée.

D'où une réflexion sur le procédé d'enroulement filamentaire pouvant répondre aux besoins du consommateur en termes de matériaux composites. Ce procédé apporte même une solution, en effet, il permet de réaliser des pièces en composite à partir de fibres enroulées sur un cylindre. Malheureusement, un grand retard est à signaler dans l'application de ce procédé dans notre pays.

Pour projeter l'importance de cette réflexion étant donné qu'aucune université algérienne ne dispose de cet équipement pour la pédagogie ou la recherche scientifique, nous sommes fixés comme objectif dans le cadre de ce Projet de Fin d'Etudes l'élaboration et la caractérisation des tubes composites par le procédé d'enroulement filamentaire.

Le travail réalisé est une étude conceptuelle pour l'élaboration des tubes composites par enroulement filamentaire. Les tubes composites sont élaborés en 2 différentes épaisseurs (8 et 10 couches) à l'aide de renfort en fibre de Jute et de matrice en résine époxy avec différents angles d'enroulement des fibres.

Introduction générale

Dans le présent travail, l'étude présentée est subdivisée en deux chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les matériaux composites, ces éléments constitutants, ensuite leur domaines d'utilisations.

Le deuxième chapitre est dédié à l'élaboration et caractérisation des tubes en composite jute/époxy avec deux épaisseurs différentes tout en variant l'angle d'enroulement filamentaire.

I. Etude bibliographique sur les composites

I.1. Introduction

Il existe différentes familles des matériaux : les métaux, les plastiques, les composites, les matériaux intelligents, etc.... Le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations des matériaux [1]. Parmi ces matériaux, les composites.

I.2. Définition des matériaux composites

D'un point de vue structurelle, un composite est un matériau composé d'au moins deux phases dissemblables et différentes à l'échelle macroscopique une phase discontinue de renfort plus rigide et plus résistante que la phase continue de la matrice (figure I.1). Le renfort sous forme de fibres, assure les caractéristiques mécaniques élevées du matériau et résiste aux charges, la matrice sous forme de résine qui répartit cette charge, garantit la géométrie du composite et assure la transmission des contraintes.

Le but de cette association est d'obtenir un matériau dont les propriétés spécifiques et les performances mécaniques du composite sont meilleures que la matrice sans renforcement. Donc la mise en forme du matériau composite, dépend du choix des composants et de leurs proportions respectives, ainsi que par le choix des dimensions, la disposition des renforts et sa forme. Ces choix permettent d'obtenir un matériau présentant les caractéristiques spécifiques recherchées.

Dans l'ingénierie des sciences des matériaux les matériaux composites constituent une très large et importante partie des matériaux utilisés dans des différentes industries.

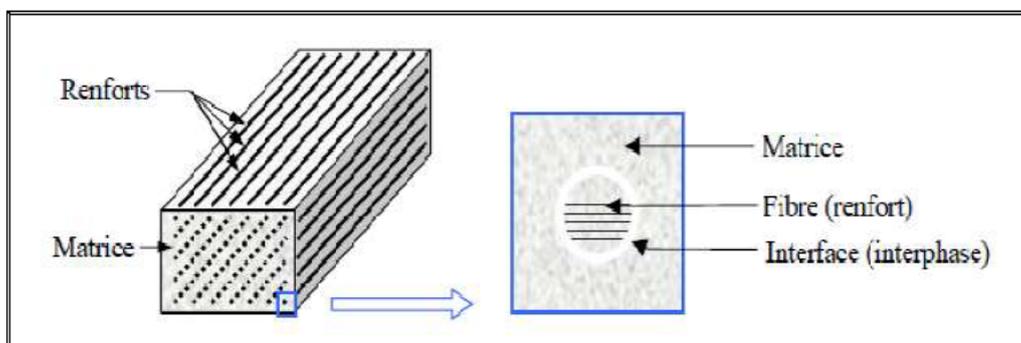


Figure I.1 : Matériau composite. [2]

Généralement les fibres sont orientées selon la direction de résistance à privilégier, puis noyées dans la matrice afin de constituer un pli unidirectionnel. La majorité des structures composites utilisées dans l'industrie sont obtenues par empilement de plusieurs plis qui constituent un multicouche nommé composite stratifié. L'assemblage de ces plis,

orientés selon différentes directions par rapport à la direction principale de chargement, permet ainsi de construire un stratifié optimisé en termes de rigidité et de masse par rapport à une sollicitation donnée. La structure multiechelle finale (≈ 1 m) est ainsi composée de fibres et de résine à l'échelle microscopique ($\approx 10\mu\text{m}$), constituant à une échelle supérieure des plis ($\approx 100\mu\text{m}$), formant à leur tour par empilement une plaque stratifiée (≈ 1 mm), (figure I.2) [3].

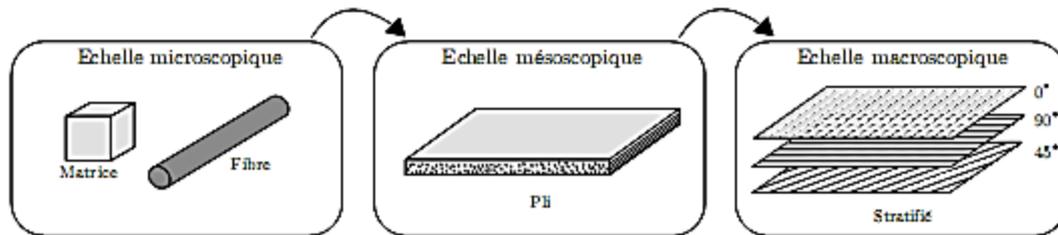


Figure I.2 : Structure d'un matériau composite stratifié [3].

I.3. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés selon diverses façons. La manière la plus simple consiste à les classer par la forme des composants (les formes des renforts) ou suivant leurs natures (la nature de la matrice).

- **Classement Selon la forme des renforts** : selon la forme des renforts les composites sont divisés en quatre catégories suivantes (figure I.3) [4]:

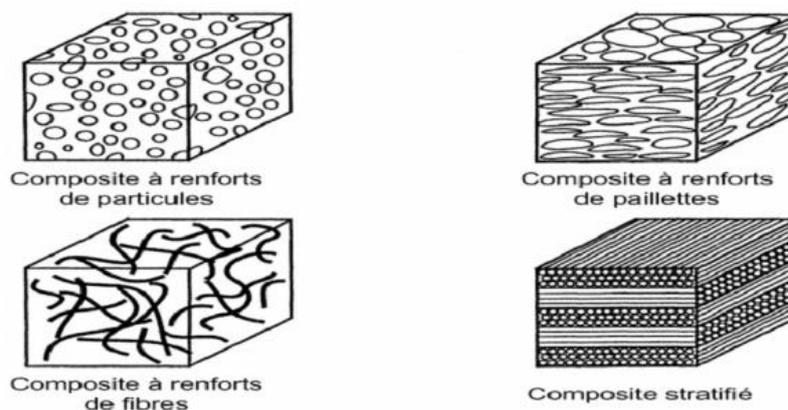


Figure I.3 : Classification des matériaux composites [4].

- **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'une 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 comme des 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.

- **Classement suivant la nature des constituants** Les matériaux composites peuvent également être classés par la nature de la matrice.

- Composites à matrice polymérique : Les polymères sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture. Les avantages principaux sont le procédé de fabrication relativement mature et le poids faible. Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de poids est essentielle.

- Composites à matrice métallique : Dans ces composites, des matériaux métalliques comme l'aluminium et le titane sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. De par la nature même du composite, les composites à matrice métallique ont des propriétés mécaniques meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices monolithiques. Leurs applications dans les moteurs d'automobile sont bien établies.

- Composites à matrice céramique : Des matrices céramiques telles que le verre et le carbure de silicium (SiC) peuvent être associées aux renforts comme des métaux, le carbone, et des céramiques. Leur développement a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que la ténacité et la résistance au choc thermique des céramiques monolithiques.

Ces composites sont utilisés dans des environnements sévères, par exemple les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz.

En plus de ces classifications on distingue deux types de composites: les composites à grandes diffusions et les composites à hautes performances.

- **Grande diffusion**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

- **Hautes performances**

Les composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50% [4].

I.3. Constituants des matériaux composites

Dans la suite de cette présentation on appellera de façon courante "matériaux composites" des arrangements des renforts qui sont noyés dans une matrice. Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.

Les propriétés mécaniques des composites fibreux sont directement liées aux caractéristiques mécaniques de leurs constituants : le renfort, la matrice, ainsi que l'interphase.

La rigidité et la résistance d'un composite sont assurées principalement par les renforts (fibres) qui possèdent des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que la matrice. Cette dernière, quant à elle, réunit les fibres et assure la forme géométrique de la structure. L'interphase est la zone créée par l'adhérence et la réaction entre les fibres et la matrice. Elle possède des caractéristiques chimiques et mécaniques différentes de celles des fibres et de la matrice [4].

Nous présenterons successivement quelques-uns des constituants les plus couramment utilisés pour les matériaux composites.

I.3.1. Renfort

Un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus) [5].

La figure I.4, indique la classification des types de renforts couramment rencontrés.

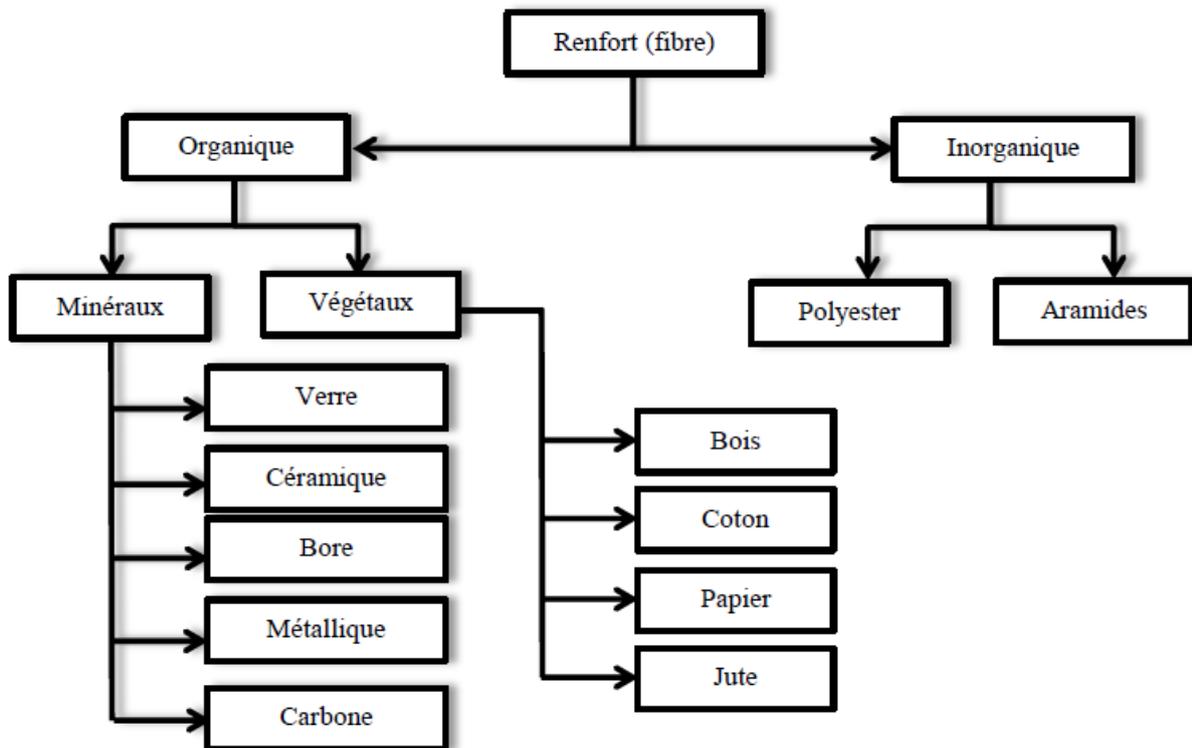


Figure I.4 : Classification des renforts [5].

I.3.1.1. Les fibres et tissus

I.3.1.1.1. Généralités

Les matériaux composites tiennent l'essentiel de leurs caractéristiques mécaniques des matériaux de renfort : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.

Le choix approprié du renfort permet aussi d'améliorer certaines propriétés physiques d'un composite : comportement thermique, tenue à la température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Pour élaborer des composites performants, les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les résines, facilité de mise en œuvre, faible coût, etc. La nature des renforts (organique, minérale, synthétique..) et leurs formes sont fonctions de l'application. Toutefois les plus utilisés sont sous formes de fibres et se présentent sous différentes formes commerciales :

- sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- sous forme de tissu surfacique (tissus simples, mats, etc.).
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

Les renforts les plus performants développés à ce jour sont des fibres courtes particulières appelées Trichites ou Whiskies, formées à base de monocristaux.

I.3.1.1.2. Fibres de Formes linéiques

Les fibres sont élaborées en filaments unitaires de 5 à 15 μm de diamètre, appelés mono-filaments. Ces filaments sont ensuite réunis en fils ou en mèches pour faciliter leur utilisation. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique dont l'unité est le tex qui représente la masse en gramme d'un fil de 1 Km de longueur, soit :

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km} \text{ ou } 1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m}$$

L'utilisation directe des formes linéiques pour la mise en œuvre de composites est limitée à quelques procédés particuliers tels que l'enroulement filamentaire.

I.3.1.1.3. Fibres de formes surfaciques

Les fils sont transformés par les techniques de l'industrie papetière et de tissage pour réaliser des formes surfaciques : mats, tissus ou rubans, qui facilitent la manipulation et la mise en œuvre des renforts.

A. Les mats

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus dispersés dans un plan et assemblés par un liant soluble ou non dans la résine, l'absence d'orientations préférentielles des fibres conduit à un comportement isotrope du mat dans son plan. Les mats de fils coupés, plus déformables, permettent d'obtenir des formes embouties. Les mats de fils continus sont utilisés pour réaliser des formes complexes par moulage.

B. Les tissus et rubans

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. L'ensemble est maintenu par l'entrecroisement des fils suivant deux directions (figure 1.5).

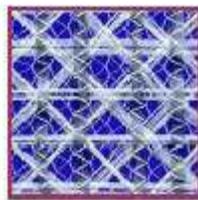


Figure I.5: Tissu multiaxial [6].

- Une direction chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu ;

- Une direction trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés, donc par la masse linéique du fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et des fils de trame.

Les armures classiques utilisées sont : toile (ou taffetas), satin, sergé, armure haut module, armure unidirectionnelle. Ces deux dernières donnent les meilleures performances (l'absence d'entrecroisement supprime les effets d'ondulation et de cisaillement des fils). Les mats et tissus sont caractérisés par leur masse surfacique en gr/m².

I.3.1.1.4. Structures tissées unidirectionnel

A. Tresses et préformes

Des tissus tabulaires (tresses ou préformes) peuvent être obtenus par tissage cylindrique ou conique : les fils s'entrecroisent en hélice, dont la variation de pas permet d'ajuster la tresse à la forme qu'elle doit couvrir. On peut ainsi réaliser une pièce de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc, ce qui permet d'obtenir divers tissus en forme de « chaussettes » coniques, ogivales ou hémisphériques. Ces tissus sont utilisés dans les constructions aéronautiques (cône de rentrée, tuyères, etc.).

B. Tissus multidirectionnels

Des tissages volumiques sont également utilisés. Ils se caractérisent par le nombre de directions de tissage 3D et 4D. La structure la plus simple est celle du tissage 3D où les fils sont disposés suivant trois directions orthogonales.

I.3.1.1.5. Les différents types des fibres selon la nature des composantes

A. Fibres de verre

Elles sont fabriquées par étirage rapide de baguettes de verre de quelques dixièmes de millimètre de diamètre, sortant d'une filière chauffée par effet Joule. L'étirage peut être produit suivant les deux méthodes suivantes :

a. procédé mécanique, dénommé *Sillionne*, dans lequel l'étirage est réalisé par la traction due à l'enroulement du fil sur une broche tournant à grande vitesse ; on obtient des fils continus ;

b. le procédé pneumatique, dénommé *Verranne*, dans lequel l'étirage est produit par entraînement des fibres sous l'action d'un jet d'air sous pression ; on obtient des fibres de faible longueur.

Seul le premier procédé permet d'obtenir des matériaux présentant des caractéristiques mécaniques élevées. Il existe, dans chaque procédé, suivant les compositions chimiques, plusieurs types de verre dont les propriétés caractéristiques sont les suivantes :

- **Verre E** : usage général, bonnes propriétés électriques ;
- **Verre D** : hautes propriétés diélectriques
- **Verre C** : bonne résistance chimique ;

- **Verres R ou S** : haute résistance mécanique Figure I.6

La fibre de verre R ou S a une résistance mécanique élevée et une rigidité moyenne. Sa densité relativement élevée par rapport aux autres fibres.

La Figure I.6 représente la fibre de verre.



Figure I.6: Fibre de verre [10].

Le tableau I.1 représente Composition des verres type E, D, R.

Tableau I.1 : Composition des verres type E, D, R [7].

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO ₂	53–54	73 - 74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14–15,5	20 - 24	25
Chaux	CaO	} 20-24	} 0,5 - 0,6	9
Magnésie	MgO			6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6,5–9	22-23	
Fluor	F	0-0, 7		
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃		0,1- 0,2	
Oxyde de titane	TiO ₂			
Oxyde de sodium	Na ₂ O		1,3	
Oxyde de potassium	K ₂ O		1,5	

Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1 %), sont réservés à des applications spécifiques [7].

Le tableau I.2 représente les avantages et des inconvénients des fibres de verre.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de la fibre de verre [8].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance thermique et électrique. • Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité. • Bonne compatibilité avec les matrices organiques. • Faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique. • Tenue au choc médiocre.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau I.3

Tableau I.3 : Caractéristiques mécanique des fibres de verre.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

B. Fibres de carbone

Elles peuvent être réalisées par carbonisation de fibres poly acrylonitriles (PAN) ou de Bray [9]. Le précurseur est oxydé à une température de l'ordre de 300°C puis ensuite chauffé en atmosphère neutre. Les propriétés mécaniques dépendent de la température finale de fabrication. Le module d'Young augmente régulièrement avec la température tandis que la résistance en traction atteint un pic pour une température de l'ordre de 1500°C, puis décroît si l'on continue à augmenter la température de fabrication. On obtient ainsi des fibres haute résistance, haut module, et même très haut module. Il existe sur le marché des fibres de première génération (apparues dans les années 1970) et des fibres de deuxième génération (apparues autour de 1984) qui présentent des résistances très supérieures à celles des fibres de première génération. De par leur méthode de fabrication, les fibres de carbone sont très anisotropes. Les propriétés mécaniques transversales sont beaucoup plus faibles que les propriétés longitudinales. Les fibres de carbone sont des fibres conductrices, de masse

volumique faible, ayant de très bonnes propriétés mécaniques et un coefficient de dilatation négatif.

La figure I.7 représente la fibre de carbone.



Figure I.7: Fibre de carbone [10].

Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone sont représentés sur le tableau I.4

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de la fibre de carbone [8].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Grande résistance à la traction et grande rigidité longitudinale. • Très bonne tenue en température sans chute de propriétés (jusqu'à 1 500 °C en atmosphère non oxydante). • Inertie à la corrosion et aux agents chimiques. • Coefficient de dilatation longitudinal très faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilité au choc; • Fragilité à la courbure ou au pliage; • Coût élevé.

C.Fibres aramide

Généralement la version commerciale disponible est le KEVLAR, et le Nomex. Ces fibres appartiennent à la famille des fibres polyamide aromatiques.

Elles possèdent une résistance élevée et une rigidité considérablement supérieure à celle des fibres de verre. La tolérance aux dommages est très bonne également Leurs

désavantages incluent une résistance en compression inférieure à celle des fibres de carbone et une adhésion relativement faible aux matrices [4].

La Figure I.8: représente la Fibre d'aramide.



Figure I.8: Fibre d'aramide [10].

- **Fibre à base de bore** : fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures. Elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène [10].
- **Fibre à base de silice ou de quartz** : elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [10].
- **Fibres de polyéthylène de haut module** : elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [10].

D. Autres fibres

Il existe d'autres fibres utilisées pour des applications particulières. Ces fibres sont généralement à faibles module et contrainte à la rupture, excepté les fibres métalliques, et dont l'utilisation est réservée à la recherche de :

- produits à bas prix de revient ;
- produits à haute isolation thermique ;
- produits de bonne conductivité thermique ou électrique.

Parmi ces fibres nous avons :

- ***fibres d'origine végétale***

- bois, utilisé sous forme de fibres orientées, feutres, papiers imprégnés, etc.
- sisal, le jute, le lin, de moins en moins utilisés au profit des fibres de verre.

Cette structure est présentée par la figure I.6.

➤ *fibres d'origine minérale*

- amiante (interdite dans certaines utilisations) ;
- silice.

➤ *fibres synthétiques*

- fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.) ;
- fibres polyamides

➤ *fibres métalliques*

- acier ;
- cuivre ;
- aluminium.

Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques afin d'obtenir des composites:

- de bonne conductivité thermique et électrique,
- de caractéristiques thermomécaniques élevées.

La Figure I.9 représente la Structure d'une fibre naturelle.

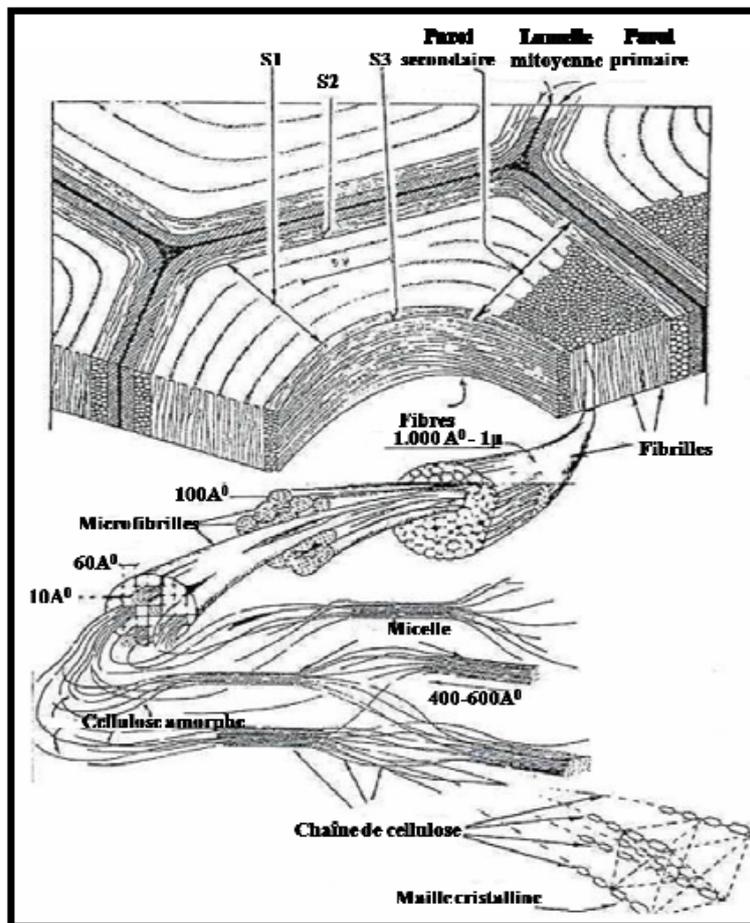


Figure I.9 : Structure d'une fibre naturelle [11].

I.3.2. Matrices

Pour lier les fibres ensemble, on utilise généralement des matrices qui se classent en trois grandes catégories : les résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques et les matrices métalliques.

Dans la Figure I.10 on représente les types de matrice.

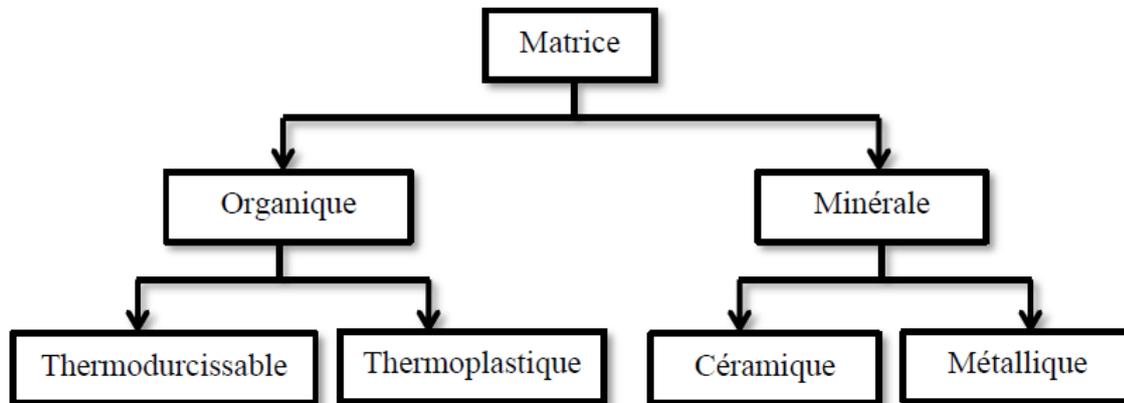


Figure I.10 : Types de matrice [5].

I.3.2.1. Résines thermodurcissables

Une résine thermodurcissable est une formulation de différents produits appartenant essentiellement à la chimie organique, qui possède la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide.

A. Résine polyester

Elle présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais a un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.

B. Résine époxyde

C'est la plus utilisée dans l'industrie aéronautique. Elle présente un bon accrochage sur les fibres, un faible retrait au moulage (de l'ordre de 0,5 %) et de bonnes propriétés mécaniques. Elle garde d'excellentes caractéristiques jusqu'à une température de 170 °C.

C. Résine phénolique

Ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de la tenue au feu (toxicité).

D. Résine polyamide

D'un emploi relativement difficile, chère, elle a l'avantage de garder de bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de - 100 à + 260° C).

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [5].

Résines	T_f^* (°C)	ρ (Kg/m ³)	E_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

T_f^* : température de fléchissement.

I.3.2.2. Résines thermoplastiques

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

- mise en œuvre rapide par thermo soudage.
- possibilité de retransformations : il est possible de créer des semi-produits (tôle par exemple) qui seront transformables à chaud.

Elles ont, de plus, une meilleure ténacité que les résines thermodurcissables.

Elles devraient donc permettre d'améliorer la tenue au choc des composites.

Les résines thermoplastiques avaient au départ deux graves défauts : une faible tenue en température et peu de résistance aux solvants.

Des produits ont été étudiés pour pallier ces défauts :

- les polyéther-sulfones (PES).
- les polyéther-imides (PEI).
- les polyéther-éther cétones (PEEK).
- les polysulfures de phényle (PPS).

L'imprégnation de fibres à l'aide de ces produits est assez complexe et leur rigidité à température ambiante rend assez difficile le drapage des pièces.

Il faut remarquer que l'industrialisation n'en est qu'à son début et l'on peut penser que ces résines auront un développement important.

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.6.

Tableau I.6 : Caractéristiques des résines thermoplastiques [5].

Résines	T_f^* (°C)	ρ (Kg/m ³)	E_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	60 à 100	1140		50 à 85		1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

T_f^* : température de fléchissement.

I.3.2.3. Matrices métalliques

Malgré une densité importante, elles présentent des propriétés intéressantes pour la réalisation de pièces soumises à des frottements. La voie aluminium – fibres de bore ou fibres de carbone est encore au stade du développement pilote. L'utilisation d'alliage de magnésium est également envisagée afin d'optimiser la densité de ces matériaux. Il ne faut pas confondre ces composites faits de fibres longues et ayant un pourcentage important de fibres, avec les matériaux métalliques renforcés par des renforts discontinus (< 30 %). Dans ce dernier cas, on obtient principalement une augmentation du module d'Young.

I.3.2.4. Autres types de résines

En plus des thermoplastiques et des thermodurcissables, il existe deux autres classes de résines à usages spécifiques :

A. Les résines thermostables: On les retrouve aussi bien parmi les résines thermodurcissables que thermoplastiques, elles se distinguent par leurs performances thermiques (stabilité thermique jusqu'à 300 °C). Elles sont développées essentiellement dans les domaines aéronautique et spatial ;

B. Les élastomères : renforcés de fibres, ils sont utilisés dans diverses applications du domaine de l'automobile [12].

II. Elaboration et caractérisation des tubes

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, on va citer la méthode suivie pour l'élaboration des tubes composites réalisés par enroulement filamentaire qui est une méthode bien adaptée aux surfaces cylindriques et sphériques.

On a conçu ces tubes dans le but de faire une caractérisation, pour cela nous avons confectionné 2 catégories de tubes, la première à 8 couches et la deuxième à 10 couches de renfort pour ainsi étudier l'influence des couches sur les caractéristiques des tubes et les comparer avec les tubes conçus dans le projet de PFE à 3 couches.

La figure II.1 représente l'angle d'enroulement entre la fibre et l'axe du mandrin.

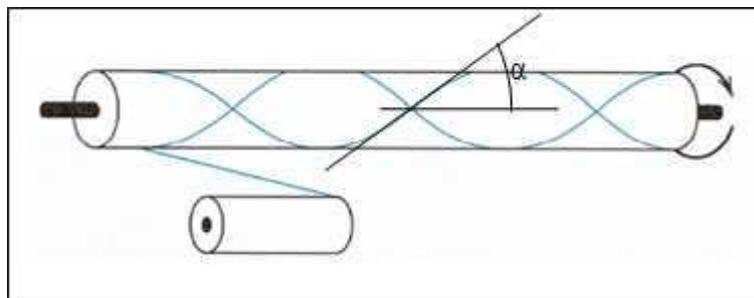


Figure II.1 : Angle d'enroulement entre la fibre et l'axe du mandrin.

II.2.Elaboration des tubes

Tous les tubes sont faits à base de renfort naturelle qui est la fibre de Jute et de matrice thermodurcissable qui est la résine époxy.

La résine utilisée est la résine époxy commercialisée sous le nom « Lorn » à base de résine époxy bis A et d'un durcisseur spécifique apportant au système une très grande adhérence et un faible jaunissement.

Caractéristiques de la résine (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Caractéristiques de la résine.

Résine EPOXY LORN	Résine	Durcisseur
Densité à 23°C	1.5	1.01
Viscosité à 23°C	12000	800
Rapport d'emploi en poids	65 %	35 %

Pour caractériser cette matrice, nous avons élaborés des éprouvettes en haltère selon la modalité de la norme ISO 527, les essais de traction sont effectués sur une machine Zwick/Roel de capacité 10 KN et dotée d'un extensomètre de haute résolution.

Les résultats des essais de traction sont présentés dans la figure II.2.

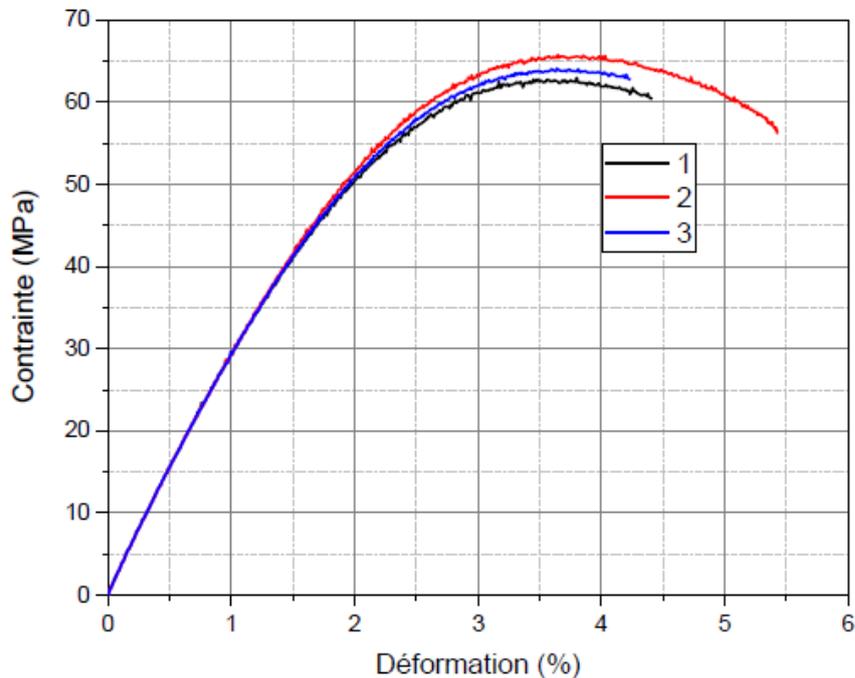


Figure II.2 : Comportement de la résine G 35 en traction.

Les propriétés élastiques sont présentées dans le tableau Tableau II.2.

Tableau II.2 : Caractéristiques de la résine.

Paramètre	Module de Young GPa	Contrainte max
Essai 01	2,84	65,67
Essai 01	2,85	63,87
Essai 01	2,84	62,97

Caractéristique du renfort (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Caractéristiques des fibres.

Renfort	Jute	Verre
Densité à 23°C	1.44	2.54
Module de Young E (GPa)	26.5	72 – 73

Pendant la réalisation des tubes, on a joué sur l'architecture des fibres. Comme on l'a déjà cité, on a fait deux catégories de tubes l'une à 8 couches et l'autres à 10 couches de fibres. Les deux catégories comportent des tubes de différents angles

Les figures II.3,...,7 représentent quelques étapes de mise en forme des tubes :



Figure II.3 : Bobine de fibre dans leur place à la machine.

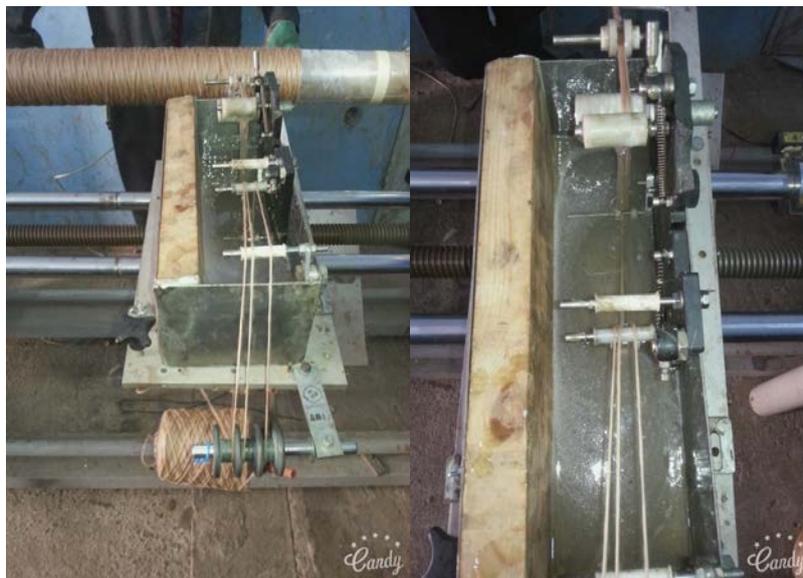


Figure II.4 : Fibres passant dans le bain de résine.



Figure II.5 : Réglyage des fréquences de translation et de rotation.



Figure II.6 : La machine en état de marche.



Figure II.7 : Tubes composites jute/époxy réalisés.

II.3.Caractérisation des tubes

Pour la caractérisation de ces tubes, on à procéder à des essais, de traction. Ces essais sont effectués au niveau de l'unité de recherche de Boumerdes.

Après les essais, on va donc avoir des courbes de contrainte déformation pour chaque tube, qui vont nous aider à déterminer les 3 paramètres qui sont : module de Young, la contrainte maximale et l'allongement à la rupture.

Dans le tableau II.4 on présente les résultats effectués déjà durant la thèse d'ingénieur pour des tubes à 3 couches.

Tableau II.4 : Paramètres des essais de traction des tubes à 3 couches.

Angle	$\sigma_{max}(MPa)$	$\epsilon_{Fmax}(\%)$	E (GPa)
50°	15.20333	0,804444	1.446
55°	11.26714	0.382857	3.1396
60°	21.51111	0.536667	4.06
65°	18.33571	0.667143	2.714

Les résultats obtenus pour les tubes à 3 couches sont représenté dans les histogrammes des figures II.8,...,10.

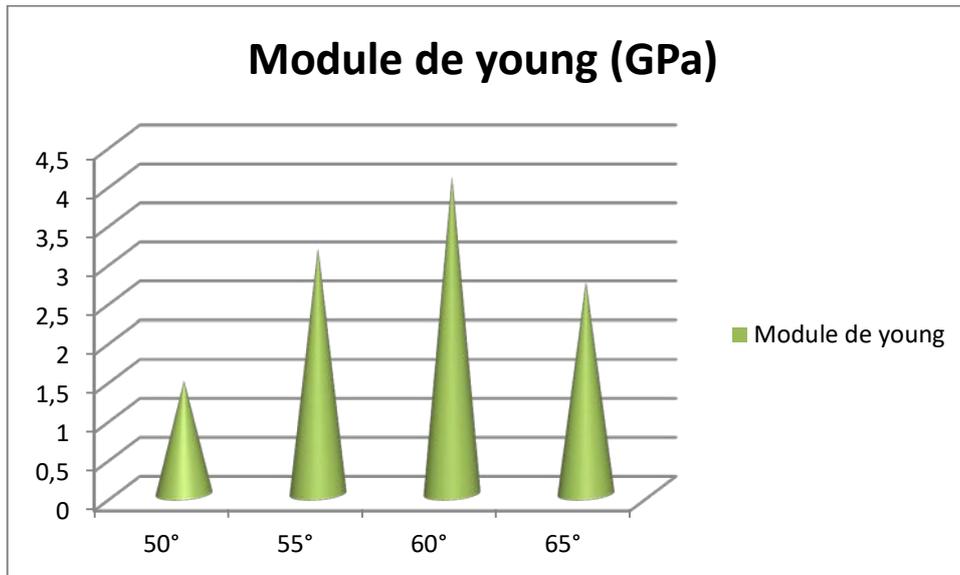


Figure II.8: comparaison du module de Young des 4 catégories de tubes à 3 couches à différents angles

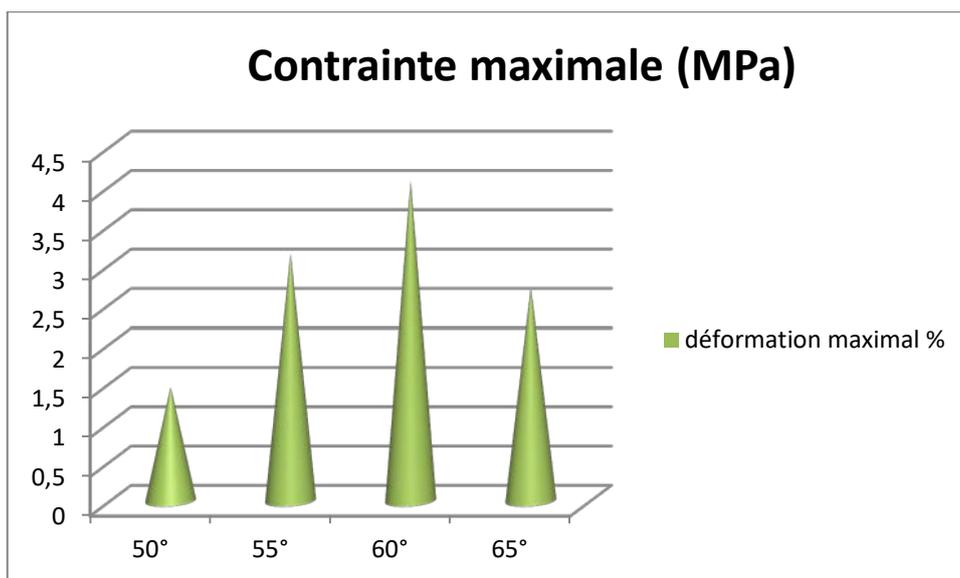


Figure II.9: Comparaison des contraintes maximales des 4 catégories de tubes à 3 couches à différents angles d'enroulement.

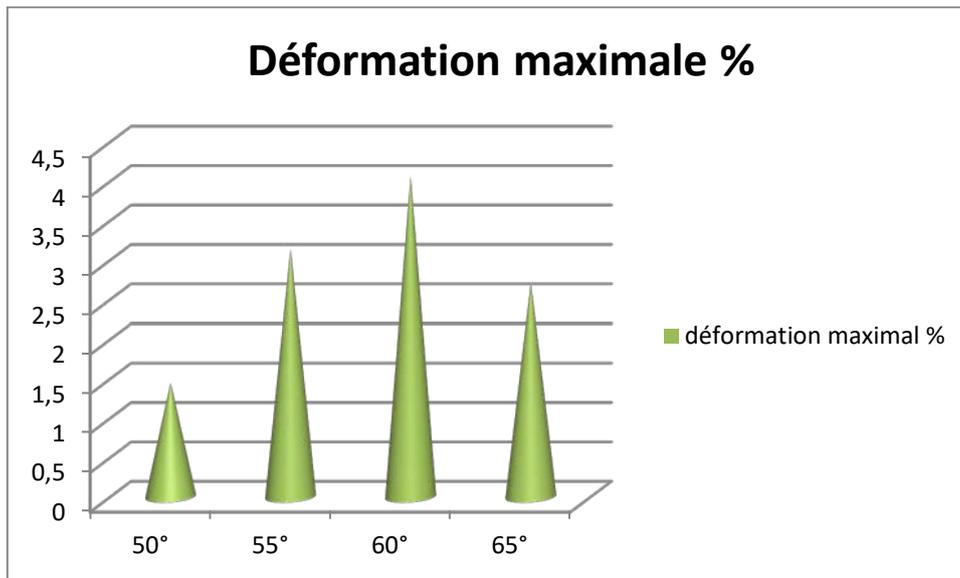


Figure II.10: Comparaison des déformations maximales des 4 catégories de tubes à 3 couches à différents angles d'enroulement.

II.3. Essai de traction :

Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes (figure II.11) sont préparées sous forme parallélépipédique de dimension (25mm×250mm) (largeur et longueur) de façon qu'ils répondent aux exigences des conditions de l'essai de traction, ils sont découpés à partir des tubes élaborés.



Figure II.11: Préparation des éprouvettes.

Les essais de traction sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type Zwick/Roell Z250 (figure II.12) au niveau de l'unité de recherche UR-MPE, dotée d'un capteur de force de capacité 250 KN et d'un extensomètre. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 9.0.



Figure II.12: Machine de traction Zwick/Roell.

Les courbes contraintes-déformations des éprouvettes sont représentées dans les figures qui suivent.

Ces courbes permettent de calculer le module de Young, la contrainte et l'allongement à la rupture. Ces paramètres sont présentés dans des tableaux.

- Courbes de traction des tubes de catégories 8 couches sont représentées dans les graphes des figures II.13,....,16.

50°

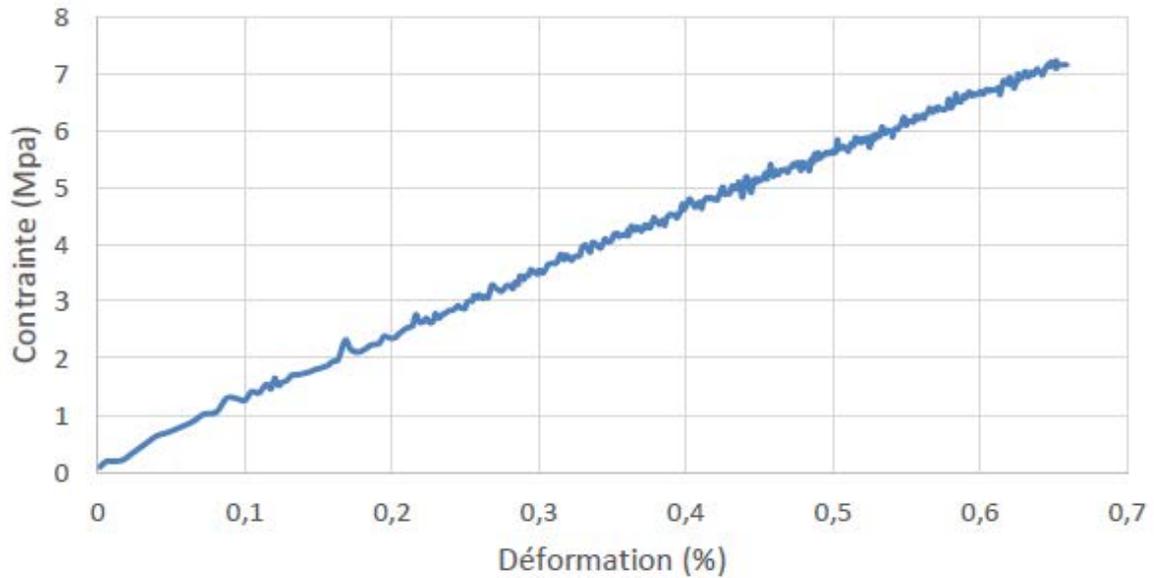


Figure II.13: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 8 couche enroulées à un angle de 50°.

55°

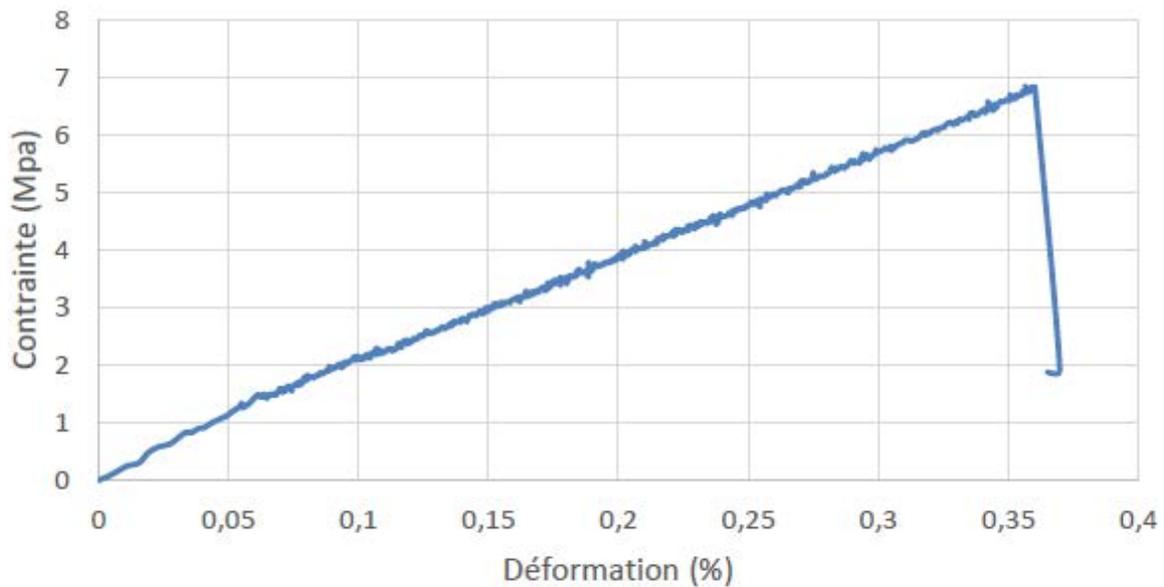


Figure II.14: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 8 couches enroulées à un angle de 55°.

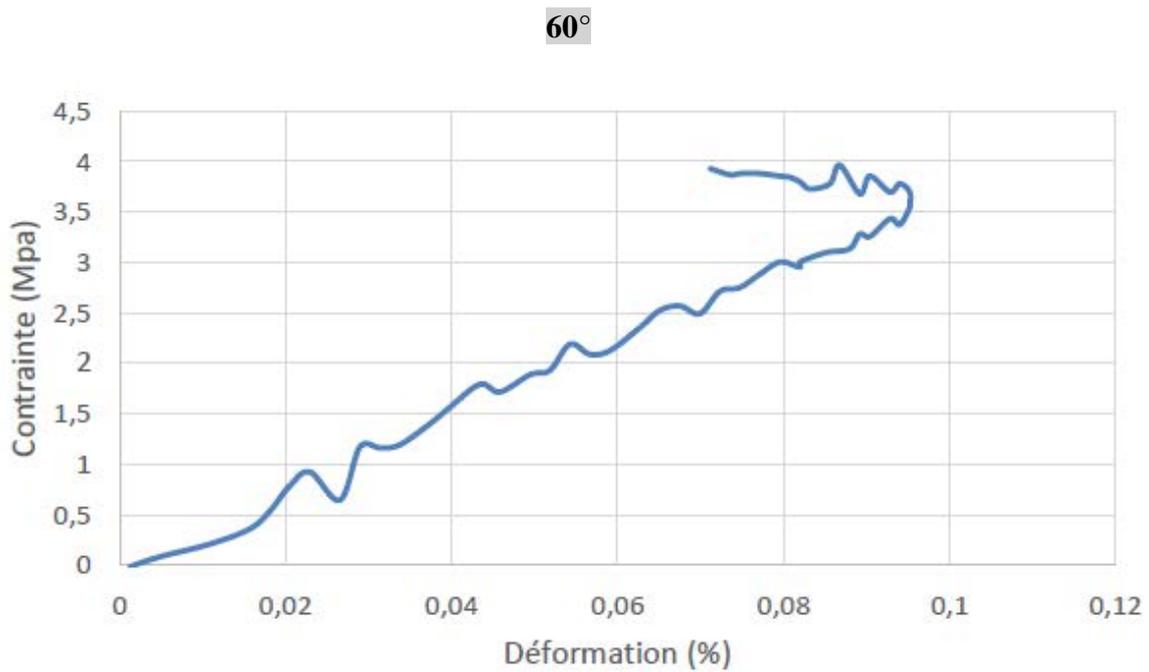


Figure II.15: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 8 couches enroulées à un angle de 60°.

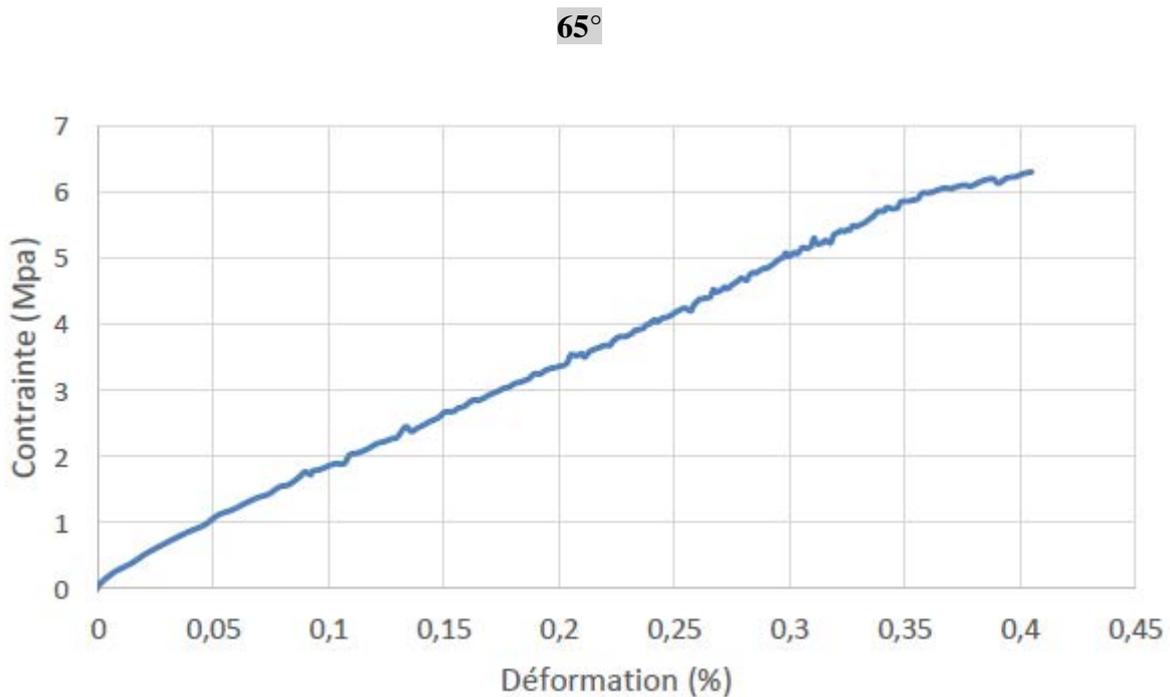


Figure II.16: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 8 couches enroulées à un angle de 65°.

Dans le tableau II.5 on présente les résultats pour des éprouvettes à 8 couches.

Tableau II.5 : Paramètres des essais de traction des éprouvettes à 8 couches

Angle	σ_{\max} (MPa)	$\epsilon_{F\max}$ (%)	E (GPa)
50°	7.1551	0.65	1.27767
55°	6.8327	0.36	2.33921
60°	3.9591	0.08	2.67302
65°	6.3122	0.40	1.93181

L'histogramme de la figure II.17 nous permet la comparaison du module de Young des 4 catégories des éprouvettes à 8 couches enroulées à différents angles.

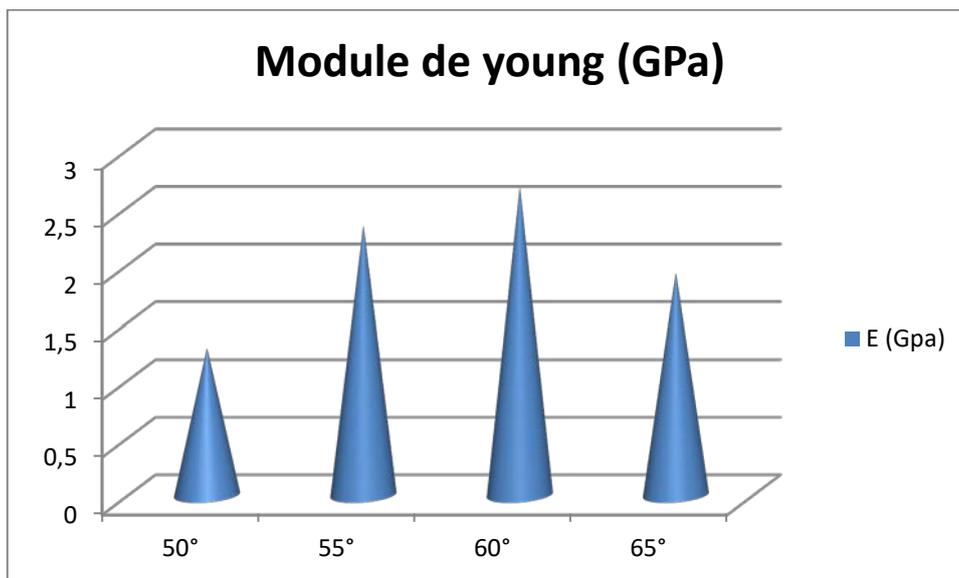


Figure II.17: Comparaison du module de Young des 4 catégories des éprouvettes à 8 couches enroulées à différents angles.

Le module de Young prend des valeurs supérieures pour le tube d'angle 60°, les autres présentent des valeurs inférieures, ces résultats sont expliqués par l'adhérence fibre matrice d'une part, et par l'angle d'orientation des fibres d'autre part.

- Courbes de traction des tubes de catégories 10 couches sont représentées dans les graphes des figures II.18,...,21.

50°

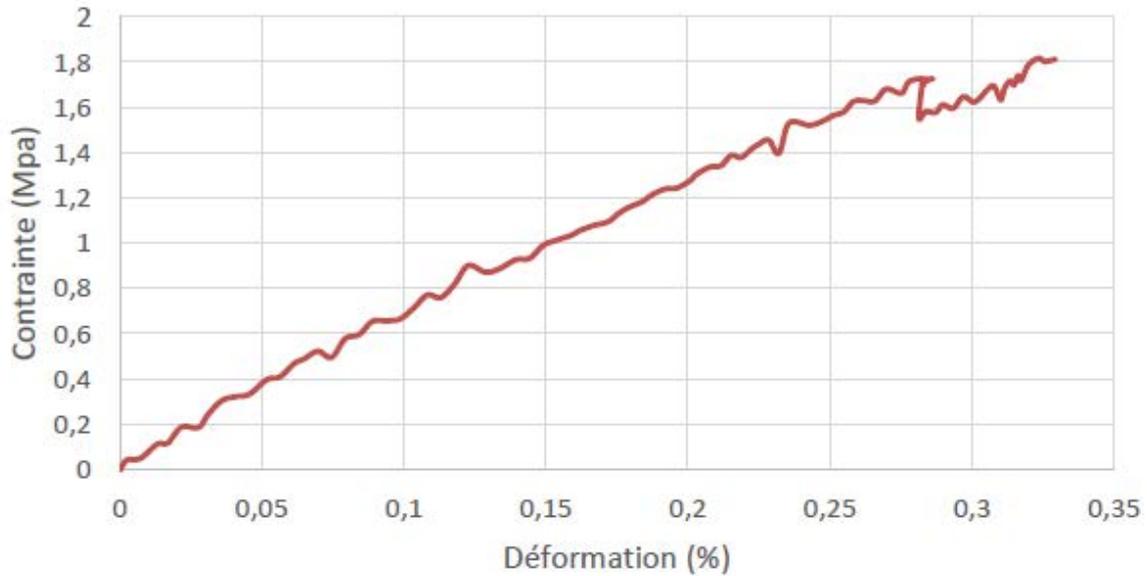


Figure II.18: Comportement à la traction d'une éprouvette epoxy/Jute de 10 couches enroulées à un angle de 50°.

55°

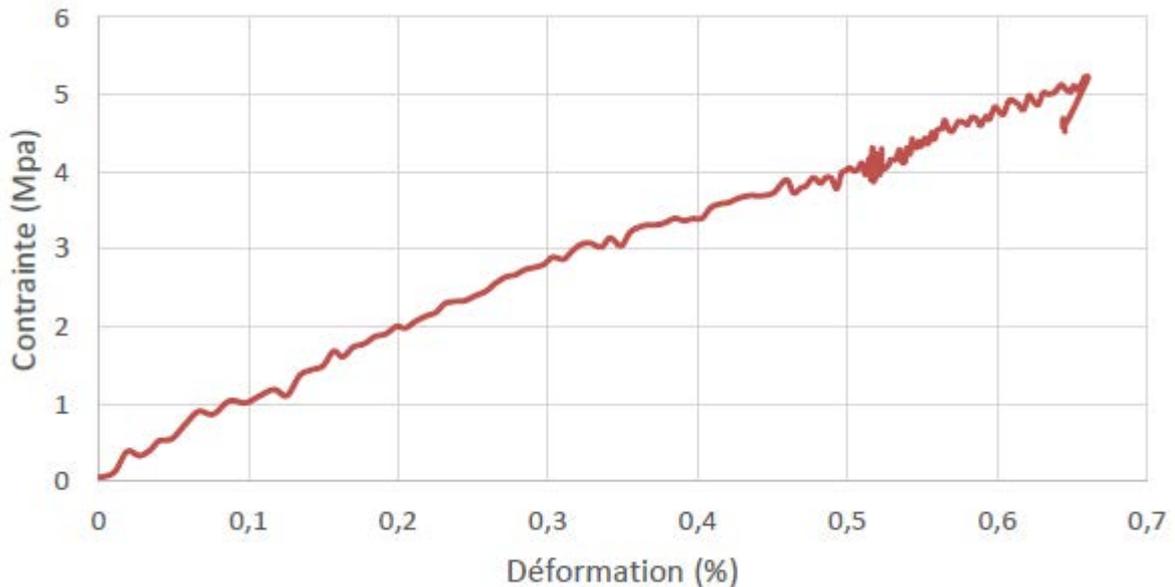


Figure II.19: Comportement à la traction d'une éprouvette epoxy/Jute de 10 couches enroulées à un angle de 55°.

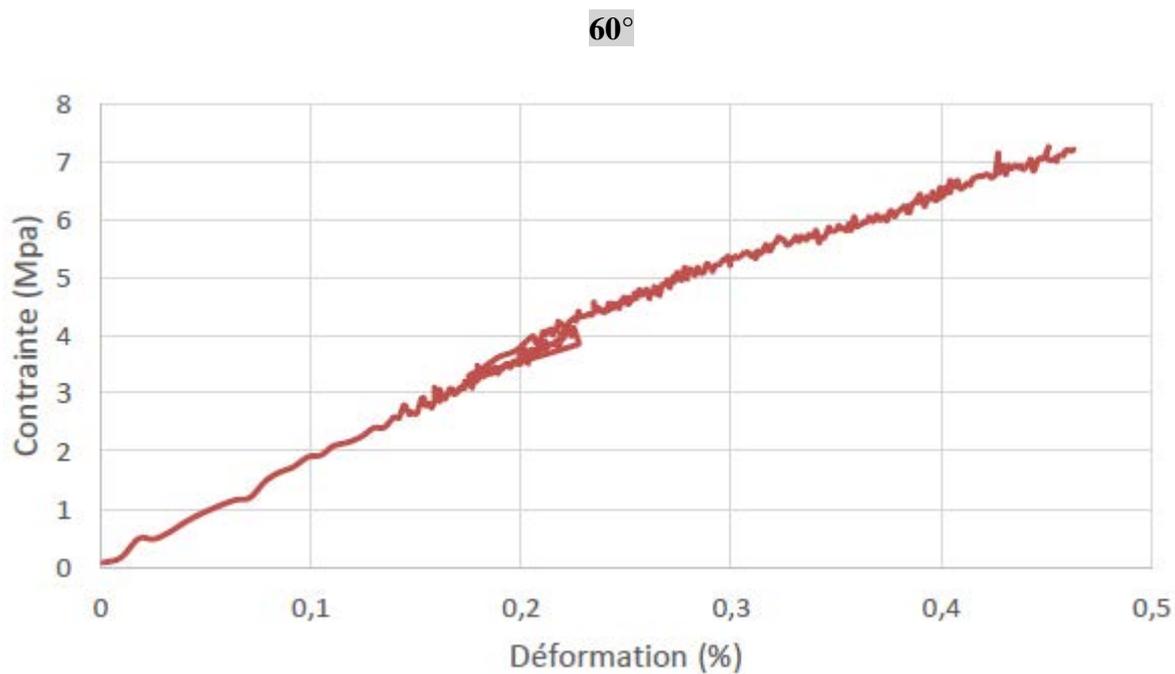


Figure II.20: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 10 couches enroulées à un angle de 60°.

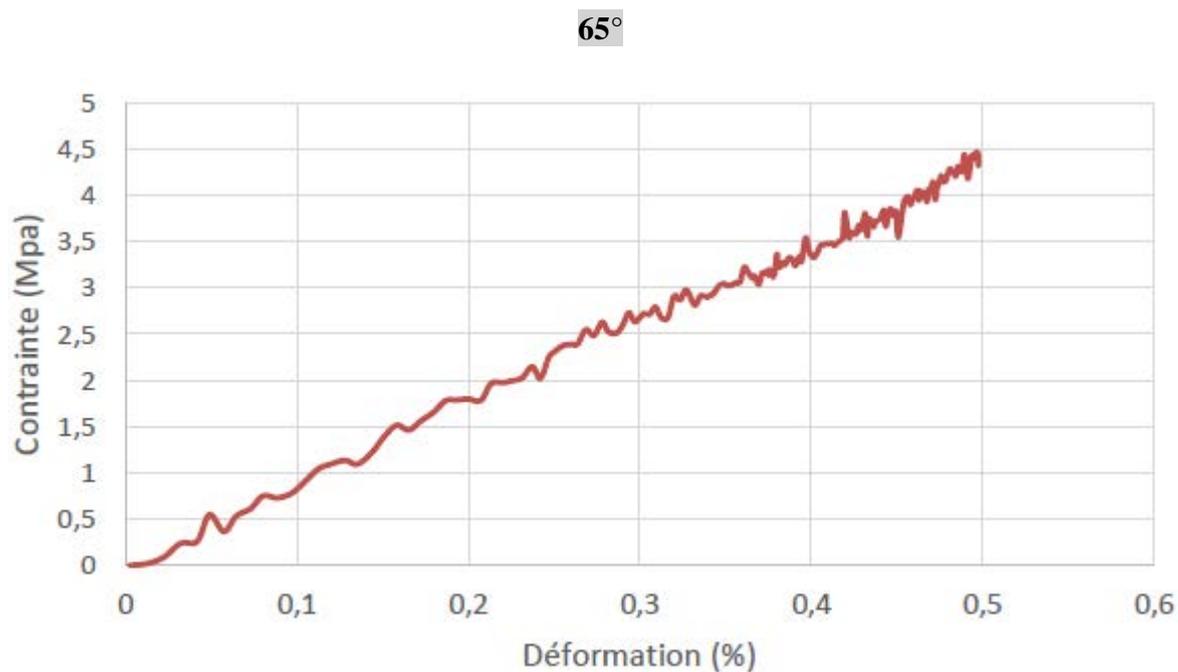


Figure II.21: Comportement à la traction d'une éprouvette époxy/Jute de 10 couches enroulées à un angle de 65°.

Dans le tableau II.6 on présente les résultats pour des éprouvettes à 10 couches.

Tableau II.6 : Paramètres des essais de traction des éprouvettes à 10 couches.

Angle	σ_{\max} (MPa)	$\epsilon_{F\max}$ (%)	E (GPa)
50°	1.8026	0.32	0.74728
55°	5.2237	0.66	1.13004
60°	7.2597	0.45	1.80014
65°	4.3898	0.49	1.01044

L'histogramme de la figure II.22 nous permet la comparaison du module de Young des 4 catégories des éprouvettes à 8 couches enroulées à différents angles.

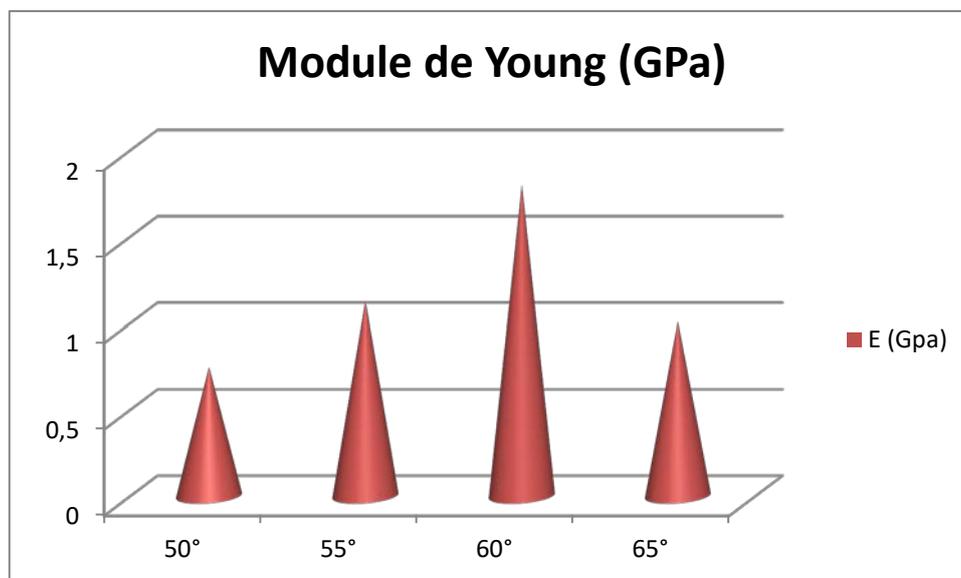


Figure II.22: Comparaison du module de Young des 4 catégories d'éprouvette à 10 couches à différents angles d'enroulement.

Comme dans le cas précédent à 8 couches d'enroulement, le module de Young prend des valeurs supérieures pour le tube d'angle 60°. Les autres couches présentent des valeurs inférieures. Ces résultats peuvent être expliqués par la bonne adhérence entre les fibres et la matrice d'une part, et par l'angle d'orientation des fibres d'autre parts, qui provoque la formation de nœuds entre les fibres dans des endroits de fortes concentrations de contraintes.

L'histogramme de la figure II.23 nous permet la comparaison du module de Young des 3 catégories d'éprouvette à 3 couches, 8 couches et 10 couches d'enroulement.

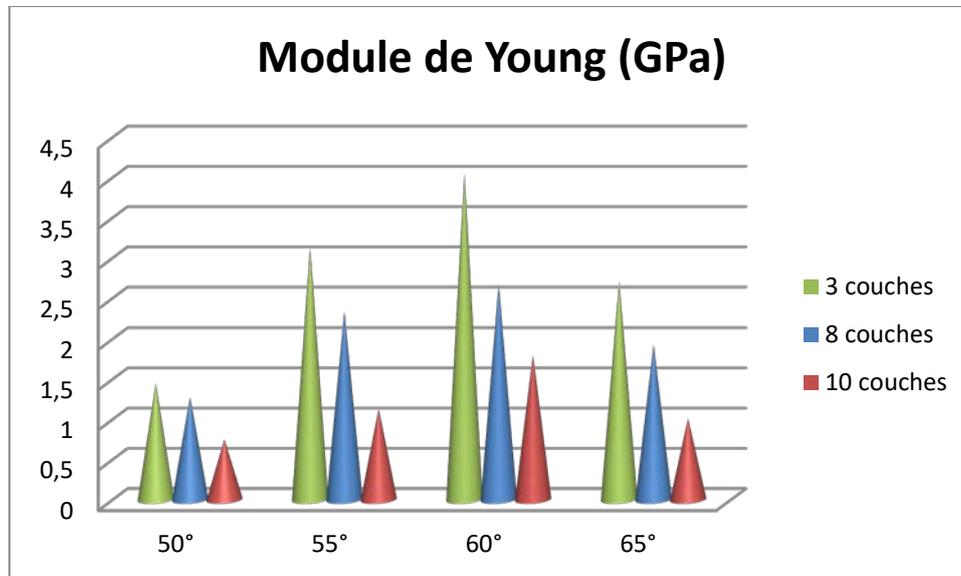


Figure II.23: Histogramme de comparaison du module de Young des 3 catégories d'éprouvette à 3 couches, 8 couches et 10 couches d'enroulement.

Les paramètres élastiques sont d'une part, plus faibles pour 10 couches, et prennent les meilleurs résultats pour l'angle de 60° pour toutes couches confondues. Cela est probablement due au fait que le pas d'enroulement (trois files) est insuffisant pour créer des conséquences positives sur la rigidité des tubes à 10 couches.

II.4.Conclusion

Ces essais montrent la nécessité d'augmenter le pas d'enroulement en fonction du nombre de couche, c'est-à-dire plus on augmente le nombre de couches plus on doit augmenter le pas d'enroulement. Par ailleurs, les résultats montrent que les meilleures propriétés sont obtenues sur des tubes à trois couches uniquement enroulées avec une orientation des fibres à 60°.

Conclusion générale

Le domaine des composites est très vaste et demande beaucoup d'efforts de conception pour son développement. Le travail réalisé m'a permis de connaître quelques difficultés que rencontre le fabricant de tuyaux en composites. Aussi, cette expérience m'a permis également de faire connaissance et d'apprécier cette activité passionnante de l'industrie et de la science des matériaux non métalliques.

La fabrication des canalisations en PRJ (Pipe Résine Jute) est une industrie nouvelle en Algérie utilisant le procédé d'enroulement filamentaire. L'idée est basée sur l'exploitation de cette technique pour l'élaboration des matériaux dits bio-composites à haute résistance mécanique et totalement insensible à la corrosion qui reste un immense problème dans le domaine hydraulique. Pour réaliser mes échantillons, une machine à enroulement filamentaire est utilisée pour produire des tubes de diamètre nominal intérieur de 91 mm.

Deux variables ont été étudiées dans ce projet.

1. L'angle d'orientation du fil qui varie de 50; 55; 60; et 65°
2. Le nombre de couches d'enroulement du fil qui est de : 3; 8 et 10 couches.

Les résultats de caractérisation mécanique ont montré que :

1. Le module de Young est plus élevé pour les tubes réalisés en trois couches d'enroulement du fil.
2. Le module de Young est plus élevé pour un angle d'orientation du fil compris dans l'intervalle (55-60)°; mais nettement meilleur pour un angle de 60°
3. La résistance à la traction (contrainte à la rupture) est également meilleur pour un tube à trois couches uniquement enroulées à 60° d'orientation du fil.
4. Paradoxalement, ce travail a montré que l'augmentation des couches d'enroulement n'apporte rien en termes de résistance des tubes, mais l'abaisse significativement.
5. Ce travail a montré les conditions optimales d'enroulement (3 couches; 60°) pour obtenir les meilleurs propriétés de résistance.
6. Grace aux résultats obtenus, l'industrie qui fabrique ces tubes pourra faire beaucoup d'économies en matière première, en évitant d'augmenter inutilement l'épaisseur des tubes (nombre de couches) qui diminuent les propriétés au lieu de les améliorer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : **Abderrezak Gharbi** : Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électrique, Constantine, 2005.
- [2] : **J. M. Berthelot** : Mécanique des matériaux et structures composites, troisième édition, le Mans-France, novembre 2010.
- [3] : **L. Teddy**, Analyse par thermographie infrarouge de l'endommagement des structures composites sous sollicitations quasi statiques. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier France, 2014.
- [4] : **P. Prombut**, Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier France, 2007.
- [5] : **L. Gornet**, Généralités sur les matériaux composites. Document pédagogique, École centrale d'ingénieur Nantes France, 2008.
- [6] : **CARMA** : glossaire matériaux composites - actualisation décembre 2004.
- [7] : **J. M. Berthelot**, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse de structure. Tec & Doc, 5^{ème} édition, Paris, 2010.
- [8] : **M. Dupeux**, Aide-mémoire science des matériaux. Dunod, Paris, 2004.
- [9] : **Bourouis Fairouz** : Etude du comportement mécanique de structures Sandwiches a différents matériaux de revêtements, mémoire de magister, université Constantine, 2005.
- [10] : **Glossaire des matériaux composites. Document pédagogique**, Centre d'animation régional en matériaux composites avancés, 2006.
- [11] : **P. V. Joeseeph, G. Mathew, K. Joeseeph, G. Groeninckx, S. Thomas**, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, Comp. Part A. **34**, 275- 290, (2003).(5).
- [12] : **Alain Dessarthe** : Introduction aux plastiques et composites en mécanique, (CETIM), techniques de l'ingénieur, traité génie mécanique, sous réf [B5170], publier le 10/08/1996.