

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



Université 8 Mai 45 Guelma
Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème

**Elaboration et caractérisation des tubes en matériaux
composites**

Présenté par :
DEBBICHE Mohammed Yassine

Sous la direction de
Pr. BEZAZI Abderrezak
Mr. Kari Djamel Eddine

Année universitaire: 2019/2020

Remerciements

Je remercie DIEU tout puissant qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadreur Pr. Bezazi Abderrezak, de m'avoir donné ce sujet, que je trouve très intéressant, pour sa compréhension, ses conseils et son aide. Pour sa gentillesse et sa précieuse orientation tout le long de l'élaboration de ce projet.

Egalement, je tiens à remercier Mr. Kari Djamel Eddine pour ses efforts, et ses conseils de grande valeur et pour ces aides précieuses aussi bien dans l'élaboration des tubes que pour les tests.

Je tiens aussi à remercier la direction de l'entreprise MAGHREB PIPE M'Sila Algérie et particulièrement Mr Baali Brahim pour leur collaboration positive en fournissant les machines et l'assistance nécessaire pour les tests effectués dans cette étude.

J'adresse également ma profonde gratitude à tous les professeurs de l'Université du 8 Mai 1945, Guelma en particulier ceux du département Génie Mécanique, votre enseignement a porté ses fruits.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes parents et mes proches pour leur soutien sans faille, et un grand merci à toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidé et encouragé à l'aboutissement de ce travail.

Yassine.



Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

∞ Mes très chers parents

∞ Mes encadreurs Pr. Bezazi Abderrezak et Mr. Kari Djamel Eddine,

∞ Toute ma famille

∞ Mes amis.

Que toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidée et encouragée à l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de mes sincères reconnaissances.

Debbiche Mohammed Yassine



Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	iv
Liste des Tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Résumé.....	1
Introduction générale	2

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1) Introduction	4
1.2) Définition des composites	4
1.3) Classification des composites.....	5
1.3.1) Selon le renfort.....	5
1.3.1.1) Types de renfort	5
1.3.1.2) Nature de renfort	5
1.3.2) Selon la matrice.....	6
1.3.3) Types des composites	7
1.4) Les charges et les additifs.....	8
1.4.1) Les charges.....	8
1.4.1.1) Les charges Renforçantes	8
1.4.1.2) Les charges non renforçantes	8
1.4.2) Les additifs.....	9
1.5) Architecture des matériaux composites	9
1.5.1) Les Monocouches	9
1.5.2) Les stratifiés.....	10
1.5.2.1) Bases de désignation des stratifiés.....	10
1.5.3) Les sandwiches	11
1.6) Mise en œuvre des matériaux composites	12

1.6.1) Moulage sans pression	12
1.6.1.1) Moulage au contact	12
1.6.1.2) Moulage par injection simultanée	12
1.6.2) Moulage sous vide	13
1.7) Enroulement filamentaire	14
1.7.1) Principe	14
1.7.2 Différents techniques d'enroulement filamentaire	15
1.7.3) Intérêt économique et mécanique	16
1.7.4) Polymérisation	17
Avantages et inconvénients du procédé	18
1.8) Etat de l'art :	19
Conclusion	30

Chapitre 2 : Elaboration des tubes et leur protocole de caractérisation mécanique

2.1) Introduction	31
2.2) Elaboration des tubes composites et leur découpe en éprouvettes	32
2.2.1) Matériau utilisé	32
2.2.2) Elaboration des tubes composites	32
2.2.3) Découpe des tubes composites en éprouvettes	35
2.3) Caractérisation mécanique des tubes composites	38
2.3.1) Test de Rigidité	39
2.3.2) Test de traction circonférentielle (Split-disc)	42
Conclusion	46

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1) Introduction	47
3.2) Test de rigidité	47
3.3) Traction circonférentielle	51
3.3.1) Analyse des résultats des essais de traction circonférentielle du tube $(90)_4$	51
3.3.2) Analyse des résultats des essais de traction circonférentielle du tube $(90/\pm 55)_s$	54
3.3.3) Endommagement des tubes sollicité en traction circonférentielle	58
Conclusions	59
Conclusion Générale	61
Références bibliographiques	62

Liste des figures

Figure 1.1 : Différentes familles du renfort [4].	6
Figure 1.2 : Différentes familles de matrices [4].	6
Figure 1.3 : Couche de composite.	9
Figure 1.4 : Structure d'un stratifié.	10
Figure 1.5 : Désignation ou codification d'un stratifié.	11
Figure 1.6 : Matériau sandwich à âme plein.	11
Figure 1.7 : Moulage au contact.	12
Figure 1.8 : Moulage par projection simultanée.	13
Figure 1.9 : Moulage sous vide.	14
Figure 1.10 : Principe de la technique d'enroulement filamentaire.	15
Figure 1.11 : Différentes méthodes d'enroulement traditionnelles. a) Enroulement circonférentiel b) Enroulement hélicoïdal c) Enroulement satellite.	16
Figure 1.12 : Comparaison entre les différentes techniques de point de vue économique. [1].	17
Figure 1.13 : Phases de polymérisation.[12].	18
Figure 1.14 : Spécimens de chemises de cheminée cylindriques en PRFV : (a) YT-1, (b) YT-2, (c) YT-3.	20
Figure 1.15 : Comparaison de la compression initiale théorique et expérimentale.	21
Figure 1.16 : Les courbes de charge axial-déplacement axial expérimental et simulé a) YT-1 b), YT-2, c) YT-3.	21
Figure 1.17 : Variation de la pression le long de la simulation en fonction de la longueur de l'arc.	23
Figure 1.18 : Déplacement circonférentiel dans la région centrale comme indiqué par la flèche « rouge ».	23
Figure 1.19 : Déplacement en fonction de pression pour la détermination de la résistance à pression externe maximale.	24
Figure 1.20 : Courbes force/déplacement et contrainte/déformation du test Split Disc des tubes PRV.	25
Figure 1.21 : Courbes force/déplacement et contrainte/déformation du test Split Disc des tubes PRC.	25
Figure 1.22 : Charge/déflexion des tubes en compression circonférentielle : résultats expérimentaux et numériques.	26
Figure 1.23 : Réponse charge-déplacement des tubes composite BFRP, GFRP et BGFRP ayant les fibres orientées à : a) $\pm 40^\circ$. b) $\pm 55^\circ$. c) $\pm 70^\circ$.	29
Figure 2.1 : Tubes en matériau composite Verre/époxy :a) Angle d'enroulement $(90)_4$ b) Angle d'enroulement $(90/\pm 55)_s$.	33
Figure 2.2 : Polymérisation de tube sur une plaque chauffante.	34
Figure 2.3 : Mandrin et bain de résine de la machine d'enroulement filamentaire.	35
Figure 2.4 : Variateurs de fréquence électrique de la machine d'enroulement filamentaire.	35
Figure 2.5 : interface d'utilisateur de la machine. a) pupitre de commande ; b) écran.	36

Figure 2.6 : Eprouvettes de $(90)_4$ et $(90/\pm 55)_s$ découpées selon les normes ASTM D2412.....	37
Figure 2.7 Préparation des éprouvettes pour le split-disc selon la norme ASTM D2290.....	38
Figure 2.8 : Test de compression radiale d'un tube verre/époxy.....	39
Figure 2.9 : Courbe de force-déflexion.....	40
Figure 2.10 : a) Machine de traction universelle YLE YL25.....	43
Figure 2.11 : Dispositif de test de Split-disc.....	44
Figure 2.12 : Courbe type de Contrainte-Temps.....	44
Figure 3.1 : Essai de compression radiale pour tube $(90/\pm 55)_s$	48
Figure 3.2 : Essai de compression radiale pour tube $(90)_4$	48
Figure 3.3 : Comparaison entre les angles d'enroulement dans les tests de compression radiale.	49
Figure 3.4 : Essai de Traction circonférentielle pour le tube $(90)_4$ épreuve 1.	52
Figure 3.5 : Essai de Traction circonférentielle pour le tube $(90)_4$ épreuve 2.	52
Figure 3.6 : Essai de traction circonférentielle pour le tube $(90)_4$ épreuve 3.....	53
Figure 3.7 : Comparaison entre les éprouvtes des essais split-disc des tubes $(90)_4$	53
Figure 3.8 : Essai de traction circonférentielle du tube $(90/\pm 55)_s$ épreuve 1.	55
Figure 3.9 : Essai de Traction circonférentielle du tube $(90/\pm 55)_s$ épreuve 2.....	55
Figure 3.10 : Essai de Traction circonférentielle du tube $(90/\pm 55)_s$ épreuve 3.	56
Figure 3.11 : Comparaison entre les trois éprouvtes $(90/\pm 55)_s$ sollicités en traction circonférentielle.	57
Figure 3.12 : Faciès de rupture des tubes composites sollicités en traction circonférentielle : a) tube $(90)_4$... b) tube $(90/\pm 55)_s$	58

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Exemple des composites et leurs constituants [6].....	7
Tableau 1. 2 Avantages et inconvénients de la technique d'enroulement filamentaire.[13].....	19
Tableau 2.1 Caractéristiques mécaniques de la résine époxy (LORN) [1].	32
Tableau 2.2 Caractéristiques mécaniques de la fibre TEX 2400 [1].....	32
Tableau 3.1 Résultats des essais de compression radiale pour tube composite.	50
Tableau 3.2 Résultats des essais de Traction circonférentielle du stratifié (90) ₄	54
Tableau 3.3 Résultats des essais de Traction circonférentielle du stratifié (90/±55)s.	57

Liste des abréviations

PS : La rigidité du pipe (kPa)

S : La rigidité spécifique (kPa)

E : Module d'élasticité de la compression radiale (GPa)

y : Déplacement qui correspond à 5% de déflexion (mm)

D : Diamètre intérieur moyen du tube composite (mm)

r : Rayon intérieur moyen de tube (mm)

F : La charge par une unité de longueur correspondante à 5% de déflexion (N/m)

I : Le moment d'inertie du tube

SF : Facteur de rigidité (mm³ kPa)

σ : La résistance à la traction circonférentielle (MPa)

ϵ : Déformation maximale en traction circonférentielle (%)

t : L'épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)

b : La longueur moyenne de l'éprouvette (mm)

v : La vitesse du test de traction circonférentielle (mm/min)

Résumé

Les tubes composites verre/époxy ont été fabriqués au laboratoire, à l'université 8 Mai 1945 Guelma, à l'aide d'une machine à enroulement à filament à deux axes. Ces tubes ayant un diamètre intérieur de 92 mm et avaient quatre couches, la première série ayant pour empilement (90/90/90/90) ou (90)₄ et la deuxième avait une architecture de 90/55/55/90 ou (90/±55)_s. Les éprouvettes en été découpées en 200 mm de longueur, à partir des tubes élaborés, pour les tests de rigidités conformément à la norme ASTM D2412. Les tests de traction circonférentielle (appelé aussi split-disc) des tubes composites, selon la norme ASTM D2290, nécessite des éprouvettes sous forme d'anneau ayant une largeur de 13,5 mm avec des zones réduites obtenu par perçage radial des tubes avant la découpe des spécimens. Les caractéristiques mécaniques moyennes à savoir les contraintes et les déformations ultimes ainsi que les modules de Young et leur écarts types P en été déterminé pour les des deux séries de tubes testés en rigidité et en split-disc. L'analyse des résultats obtenue montre que les tubes (90)₄ possède les modules de Young et les contraintes ultimes les plus élevés comparativement à ceux (90/±55)_s.

Abstract

The glass/epoxy composite tubes were manufactured in the laboratory at 8 Mai 1945 Guelma University, using a two-axis filament winding machine. These tubes having an internal diameter of 92 mm and had four plies, the first series having for stacking (90/90/90/90) or (90)₄ and the second had an architecture of 90/55/55/90 or (90/±55)_s. The specimens were cut into 200 mm in length, from elaborate tubes, for the stiffness tests in accordance with ASTM D2412 standard. The circumferential tensile tests (also called split-disk) of the composite tubes, according to ASTM D2290 standard, requires specimens in the form of a ring having a width of 13.5 mm with reduced zones obtained by radial drilling before the specimens tubes cutting. The average mechanical characteristics, namely the ultimate stresses and strains as well as the Young's modules and their standard deviations, were determined for the two series of tubes tested in rigidity and in split-disc. The analysis of the results obtained shows that the tubes (90)₄ have the highest Young's moduli and the ultimate stresses than those of (90/±55)_s.

Introduction
générale

Les matériaux composites modernes donnent de grands avantages pour les diverses industries actuelles ; pour leur résistance à la corrosion, légèreté et ténacité. Mais le marché demande le développement constant de ces matériaux pour satisfaire les exigences des consommateurs.

Un matériau composite lui-même a plusieurs avantages comparé aux matériaux traditionnels :

- Il combine plusieurs matériaux et utilise leurs points forts pour être plus performants que tous ces matériaux individuellement ;
- Il donne la capacité de produire facilement des géométries très complexes ;
- Ce type de matériau est souvent plus léger et performant que autres métaux ;
- Les matériaux composites sont en général non corrosifs, ce qui est très avantageux dans les environnements humides (les industries marines) ...etc.

Le procédé d'enroulement filamentaire spécialise dans la création des géométries de révolution, elle est notamment plus rapide en termes de vitesse de production en comparaison avec les autres techniques de mise en œuvre des matériaux composites, tout en fournissant des pièces hautes en qualité.

Le présent travail est divisé en 3 chapitres :

- Le premier chapitre concerne des généralités sur les matériaux composites, leur constituants, différentes techniques d'élaborations avec un accent sur la fabrication des tubes composites en utilisant les différentes méthodes d'enroulement filamentaire en détail. De plus, un état de l'art est effectué concernant les travaux scientifiques récents sur le sujet de l'élaboration par enroulement filamenteux des tubes composite ayant différent type de renfort (verre, carbone, basalte, etc.) et une matrice thermdurcissable (époxyde, vinylester, etc.) ainsi que leur caractérisation mécanique en compression axiale ou radiale ou encore traction radiale (Split-disc).
- Le deuxième chapitre est consacré à la description des constituants des composites utilisés et leur caractéristique mécanique, l'élaboration des tubes composite par enroulement

filamentaire et la description de la machine utilisée. Les normes ASTM D2412 et ASTM D2290 ASTM utilisées respectivement pour la préparation (ou découpe) des éprouvettes et les conditions des tests des tubes composite en compression radiale et traction radiale ainsi que la détermination de leurs caractéristiques mécaniques.

- Le dernier chapitre est dédié aux dépouillements et aux interprétations des résultats expérimentaux et leurs discussions. Ceci a permis la comparaison des résultats des caractéristiques mécaniques des deux types de tubes composite ayant pour empilement $(90)_4$ et $(90/\pm 55)_s$.

Le mémoire de master se terminera par une conclusion générale qui résumera le travail accompli.

Chapitre 1

Etude bibliographique

Chapitre 1

Etude bibliographique

1.1) Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux qui sont utilisables dans plusieurs industries grâce à leurs hautes performances mécaniques. Ce chapitre décrit les classifications des composites, les charges et les additifs, les architectures des matériaux composites et leurs différents procédés de fabrication. De plus, nous nous concentrons sur les différentes techniques de fabrication des tubes en composite par enroulement filamentaire qui est une méthode qui se caractérise par un rendement élevé et une bonne qualité des pièces. Enfin, un état de l'art est présenté sur l'élaboration et la caractérisation des tubes composites fabriqués par enroulement filamentaire.

1.2) Définition des composites

Un matériau composite se compose de deux ou plusieurs matériaux traditionnels, en générale ces derniers sont une matrice (résine) et un ou plusieurs renforts sous forme de grains ou de fibres. Ce mélange des matériaux présente des avantages mécaniques importants [1- 6] :

- Légèreté ;
- Maintenance réduite ;

- Résistance à la corrosion ;
- Permet des formes complexes.

Ces composites présentent des performances mécaniques beaucoup plus fortes que ses composantes prises séparément.

1.3) Classification des composites

Comme il était mentionné dans la définition des composites, ces matériaux se composent de matrice et renfort. Il est possible de distinguer plusieurs types de composites selon la matrice et selon le renfort utilisé.

1.3.1) Selon le renfort

Le renfort sert à améliorer les caractéristiques mécaniques dans un matériau composite par exemple la rigidité, la résistance mécanique à la rupture et la dureté. Il permet aussi à améliorer les propriétés physiques du composite, comme les propriétés thermiques et électriques et il peut être trouvé sous forme filamentaire (fibre) ou poudre (particules) [1,3].

1.3.1.1) Types de renfort

Les renforts des composites sont disponibles sous plusieurs formes commerciales, ils peuvent être sous forme de :

- Rovings ;
- Fibre longue en tissus unidirectionnel ou bidirectionnel ;
- Fibre courte ou mats ;
- Particules.

1.3.1.2) Nature de renfort

Les différentes natures des renforts sont illustrées dans la (Figure 1.1).

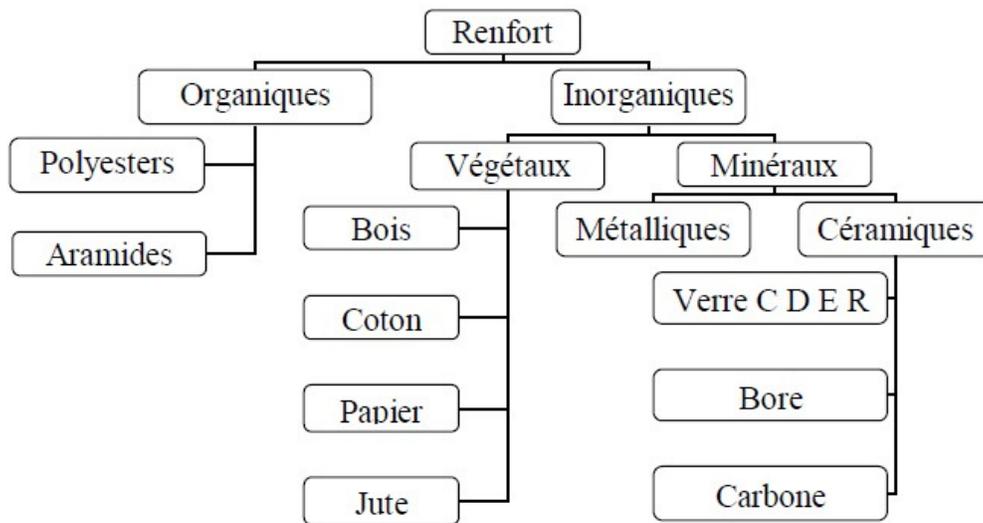


Figure 1.1 : Différentes familles du renfort [1, 4].

1.3.2) Selon la matrice

La matrice dans un composite est considérée comme un élément liant, qui a le rôle de répartir les sollicitations mécaniques (en compression et en flexion) [1, 5].

Les différents types des matrices sont présentés dans la (Figure 1.2).

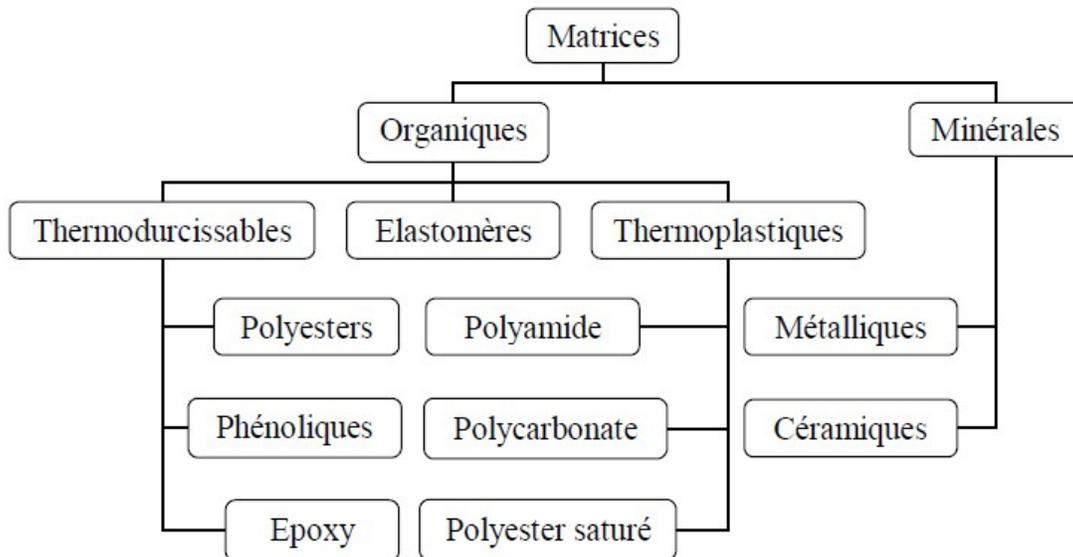


Figure 1.2 : Différentes familles de matrices [1, 4].

1.3.3) Types des composites

Dans le Tableau 1.1 sont regroupés les différents types de composites ainsi que leurs constituants et leurs domaines d'applications.

Tableau 1.1 : Exemple des composites et leurs constituants [1].

	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrices organique. <ul style="list-style-type: none"> • Papier, carton • Panneaux de particules • Panneaux de fibres • Toiles enduites • Matériaux d'étanchéité • Pneumatiques • Stratifiés • Plastiques renforcés 	Résine/charges/fibres cellulosiques. Résine/copeaux de bois. Résine/ fibre de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimeries, emballages, etc. Menuiserie. Sports, bâtiments Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
1. Composites à matrice minérale <ul style="list-style-type: none"> • Béton • Composite carbone-carbone • Composite céramique 	Ciment/sable/granulats Carbone/fibre de carbone	Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermo-mécaniques
2. Composites à matrice métallique	Aluminium/fibre de bore Aluminium/fibre de carbone	Espace
3. Sandwiches {Peaux Ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, blasa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

1.4) Les charges et les additifs

1.4.1) Les charges

Les charges servent à améliorer les performances mécaniques, ou à réduire le coût (prix) en conservant les caractéristiques des résines [6], on peut distinguer deux grands types de charges :

1.4.1.1) Les charges Renforçantes

Les charges renforçantes servent à améliorer les caractéristiques mécaniques de la matrice, ils sont classés selon leur forme géométrique en : [1]

- **Charges sphériques :**

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur forme sphérique, pleine ou creuse, qui permet d'éviter les concentrations de contraintes et, par conséquent, diminue la probabilité de l'apparition des fissures de la matrice par rapport à des charges non sphériques. Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150 μm . Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.). Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées.

- **Charges non sphériques :**

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écailles ayant 100 à 500 μm de dimensions, et une épaisseur de 1 à 20 μm . Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques.

1.4.1.2) Les charges non renforçantes

Les charges non renforçantes servent à diminuer le coût des résines en conservant leurs performances.

- Les charges de faible coût ;
- Charges ignifugeantes ;

- Charges conductrices et antistatiques.

1.4.2) Les additifs

Les additifs servent à assurer l'adhérence entre la matrice et le renfort, il est mélangé avec la résine en faible quantité [7]. Il existe plusieurs types d'additifs citant par exemple :

- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retraits ;
- Agents anti-ultraviolets ;
- Accélérateur ;
- Catalyseur.

1.5) Architecture des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être trouvés trois types d'architectures :

- Les monocouches ;
- Les stratifiés ;
- Les sandwichs.

1.5.1) Les Monocouches

Ce type d'architecture représente l'élément de base de la structure des matériaux composites, il se compose de renfort à fibre continue, tissu ou mat (Figure 1.3). [8]

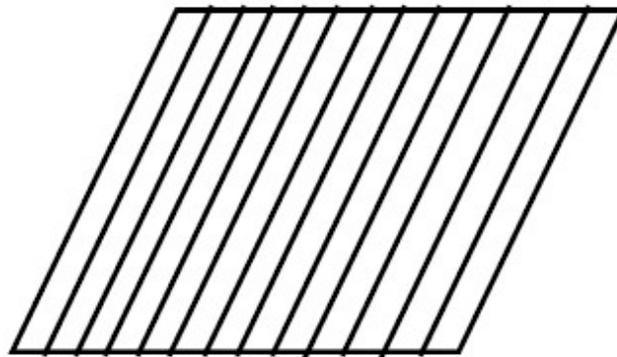


Figure1.3 : Couche de composite.

1.5.2 Les stratifiés

Les stratifiés se composent de plusieurs couches successives de monocouches imprégnés par la résine (Figure 1.4) [9].

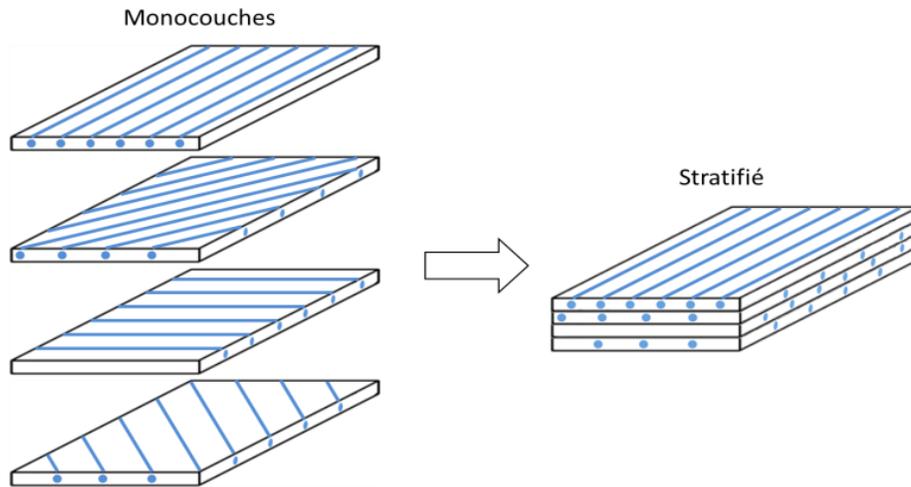


Figure 1.4 : Structure d'un stratifié.

1.5.2.1 Bases de désignation des stratifiés

Le code de désignation des stratifiés est effectué comme ci-dessous (Figure 1.5) :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence ;
- Les couches successives sont séparées par un « / » si leurs angles sont différents ;
- Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique ;
- Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou des parenthèses) indiquent le début et la fin du code ;
- En cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole x indique la symétrie.

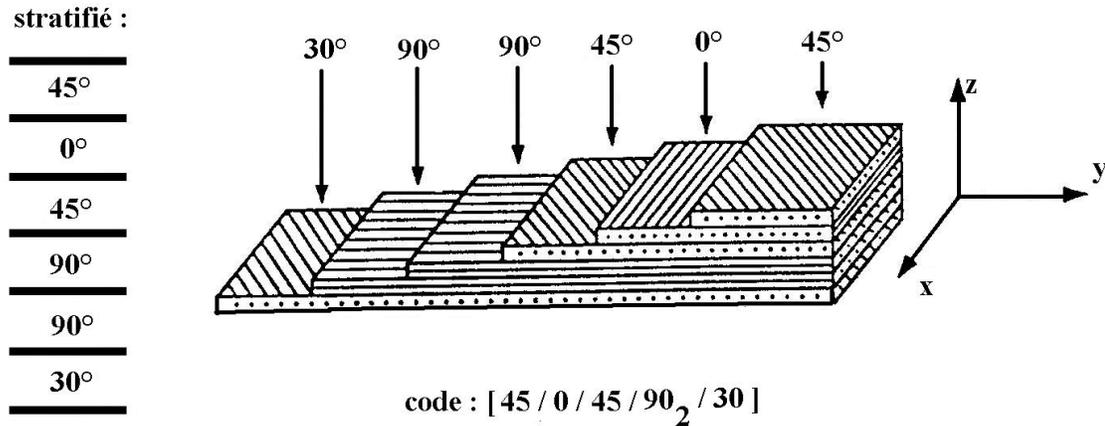


Figure 1.5 : Désignation ou codification d'un stratifié.

1.5.3) Les sandwichs

Ce type de composite se compose de deux feuilles (ou peaux) de grande rigidité mais de faible épaisseur, et une âme de grande épaisseur et faible rigidité mais ayant de bonnes propriétés de cisaillement (Figure 1.6). L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité. [8]

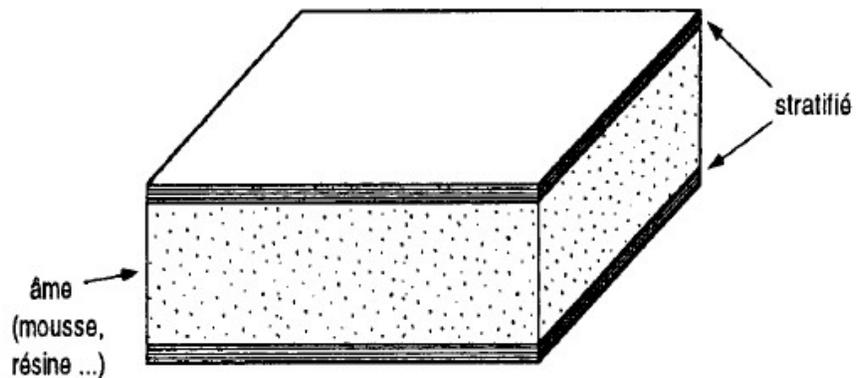


Figure 1.6 : Matériau sandwich à âme plein.

1.6) Mise en œuvre des matériaux composites

1.6.1) Moulage sans pression

1.6.1.1) Moulage au contact

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu), puis imprégnés manuellement une matrice thermdurcissable. Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible (Figure 1.7). [8]

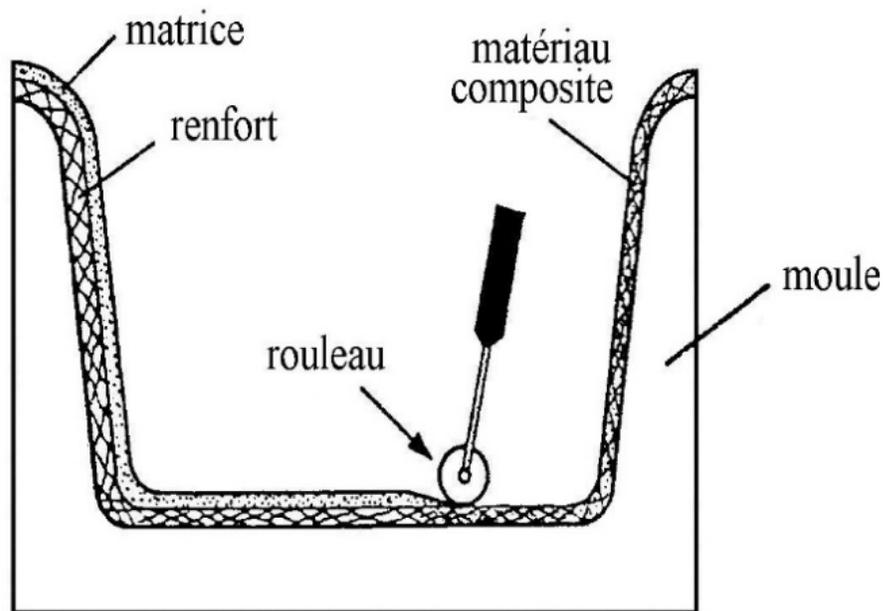


Figure 1.7 : Moulage au contact.

1.6.1.2) Moulage par injection simultanée

Le moulage par projection simultanée est un procédé de moulage au contact mécanisé. On projette simultanément les fibres coupées et la résine catalysée par un pistolet sur le moule. Le renfort imprégné de résine est compacté par un rouleau cannelé et après gélification de la première couche on ajoute les couches suivantes. [8] Le renfort est limité à des fibres coupées (Figure 1.8).

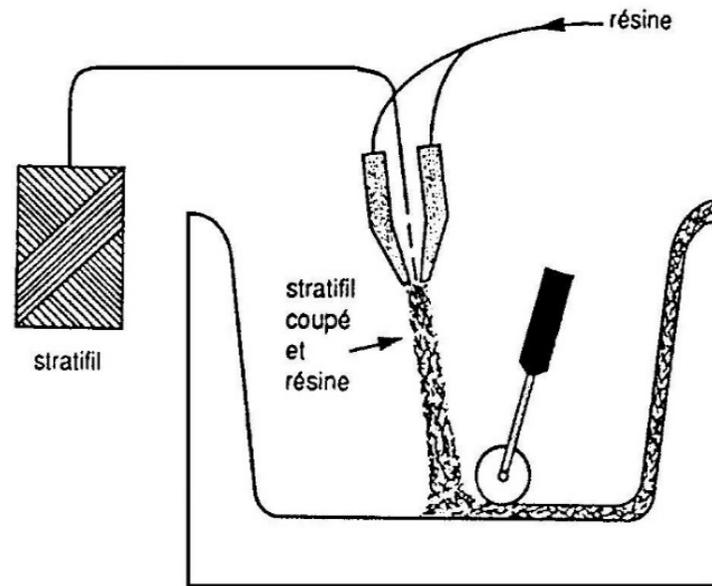


Figure 1.8 : Moulage par projection simultanée.

1.6.2) Moulage sous vide

Sur un moule rigide couvert par du gel-coat on pose le renfort puis on étale une couche de résine, recouvrant le moule par un contre moule poreux et une membrane flexible (feuille de caoutchouc, Nylon etc.), puis on applique un vide entre zéro et un bar qui a pour but d'imprégner et débuller le renfort (Figure 1.9). Pour le moulage au sac sous vide on n'a besoin que d'un sac flexible pour recouvrir le moule [8].

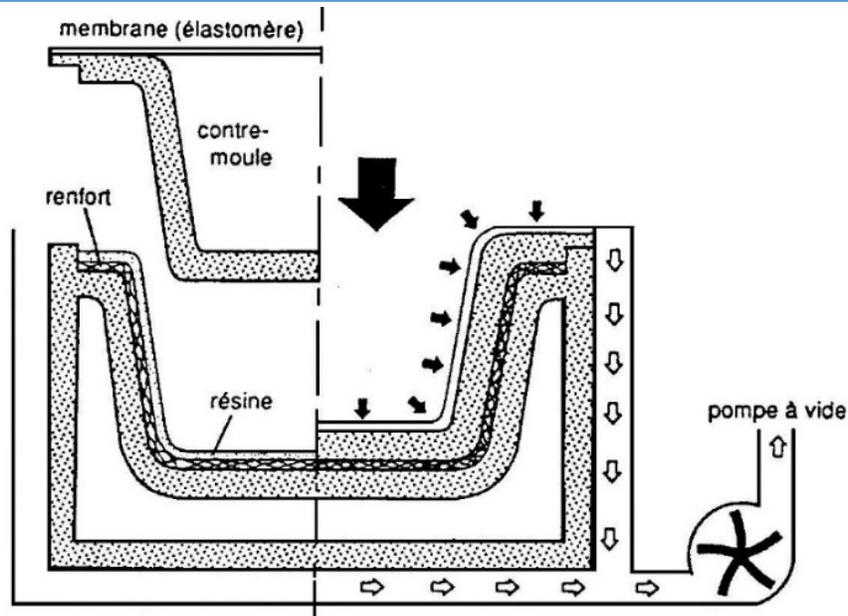


Figure 1.9 : Moulage sous vide.

1.7) Enroulement filamentaire

L'enroulement filamentaire est l'un des plus anciens procédés d'élaboration de structures Composites. C'est un Procédé de moulage destiné à la production des corps de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques, (tubes et canalisation, réservoirs, organes de fusées et de missiles, etc.), ou des pièces spéciale (coudes, manchons, réduction, tés, adaptateurs). Ce procédé est très employé industriellement pour la fabrication de tubes et de réservoirs destinés à des applications de tenue aux hautes pressions comme les réservoirs de stockage de gaz et pour les tubes de transporteur des eaux usées ou potable notamment dans les installations des stations de dessalement de l'eau de mer.

1.7.1) Principe

Cette technique est basée sur le principe de l'enroulement du filament continu de renfort (généralement verre ou carbone) sur un mandrin en rotation. Les fibres sont pré-imprégnés de résine ou imprégnés en ligne (Figure 1.10). L'angle de bobinage et le placement des fils sont assurés par le mouvement du guide fil et par une tension constante. La combinaison du mouvement de rotation du mandrin sur lequel s'enroule le filament et les déplacements du support fournissant le filament créent un tissage particulier, fonction des rapports relatifs de ces vitesses [10].

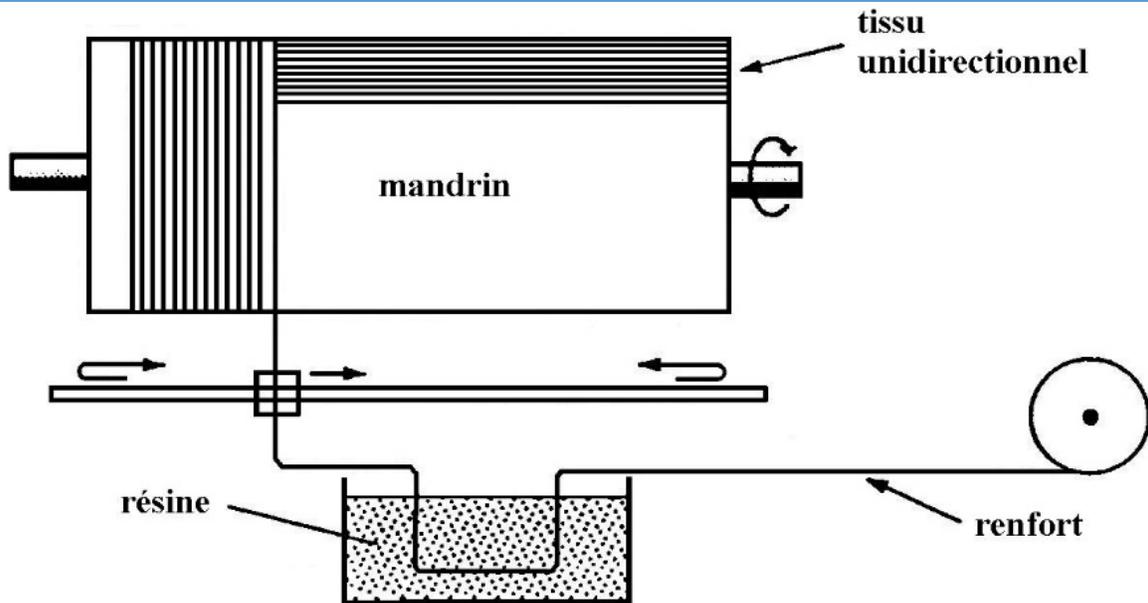


Figure 1.10 : Principe de la technique d'enroulement filamentaire.

1.7.2 Différents techniques d'enroulement filamentaire

On distingue trois techniques d'enroulement filamenteuses disponibles :

- **Enroulement circonférentiel** : le guide-fil ne dispose que d'un seul degré de liberté en translation et pour lequel le renfort fait un angle d'environ 90° avec l'axe de rotation du mandrin (Figure 1.11a). Cet enroulement est réalisé pour des structures appelées à ne subir que des efforts de pression intérieure sans effet de fond. [10]
- **Enroulement hélicoïdal** : le guide fil peut se déplacer dans les deux sens en translation. Cet enroulement permet d'ajuster l'angle des renforts par rapport à l'axe de la structure en fonction des caractéristiques mécaniques désirées et pouvant atteindre de 20° à 90° (Figure 1.11b). Cet enroulement est utilisé pour des structures soumises à des efforts de pression intérieure avec effet de fond qui créent des contraintes radiales et longitudinales dans les parois.
- **Enroulement satellite** : 6 ou 7 degrés de liberté sont accessibles et toute la plage angulaire peut être obtenue. Ce type est utilisé pour le bobinage de sphère et de réservoirs (Figure

1.11c). Cet enroulement convient à une structure cylindrique fermée aux extrémités (réservoir avec fond) résistant donc aux efforts axiaux.

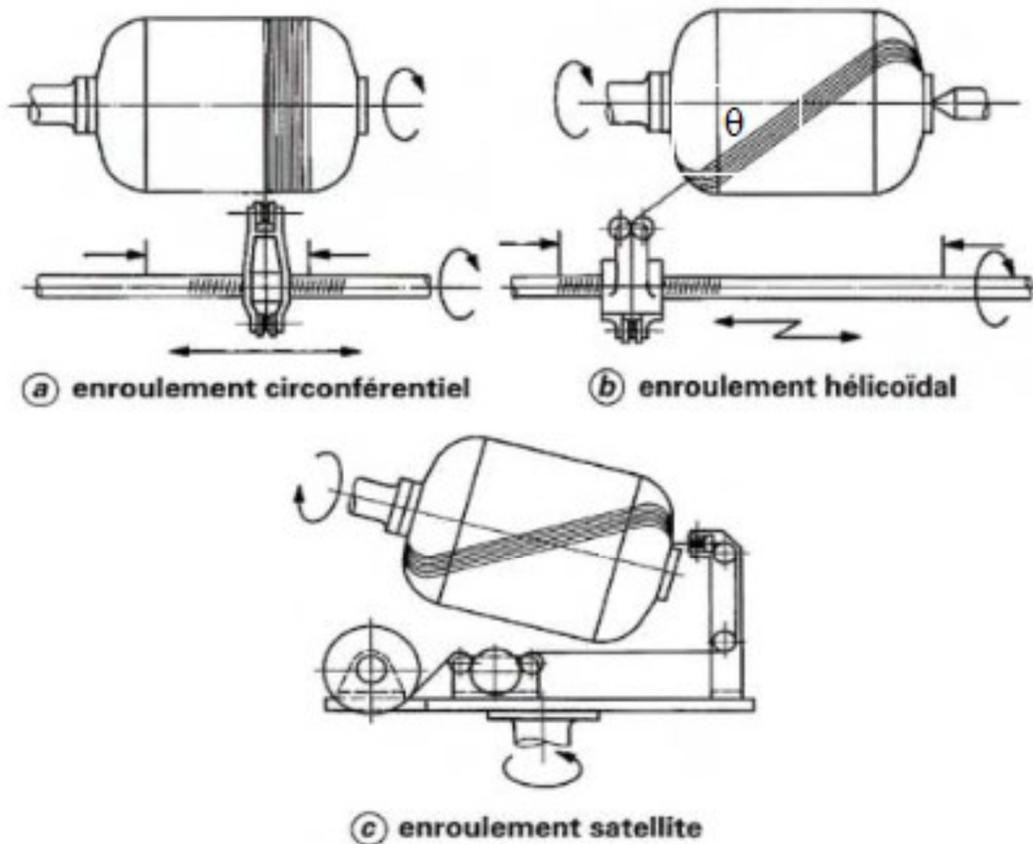


Figure 1.11 : Différentes méthodes d'enroulement traditionnelles. a) Enroulement circonférentiel b) Enroulement hélicoïdal c) Enroulement satellite.

1.7.3) Intérêt économique et mécanique

L'enroulement filamentaire permet l'obtention de pièces ou structures composites ayant de très bonnes caractéristiques. En outre, l'automatisation de cette méthode de mise en œuvre la rend adaptée aux productions en grande série, tout en réduisant la part de la main d'œuvre dans le coût final des pièces. Ce procédé permet de faire varier les angles d'orientation des renforts afin d'obtenir les caractéristiques élevées, requises pour résister aux sollicitations sévères auxquelles seront soumis les tubes composites durant leur vie en service. Le principal inconvénient de ce procédé est qu'il ne permet pas la variation de section. L'enroulement filamentaire, est, en outre, limité à la fabrication des pièces de révolution. D'autre part, la surface intérieure est lisse, alors que l'extérieure est rugueuse. D'un point de vue purement économique, le procédé est relativement

onéreux à cause de la complexité des pièces à réaliser, du temps de mise en œuvre et du coût des matières premières utilisées (Figure 1.12) [11].

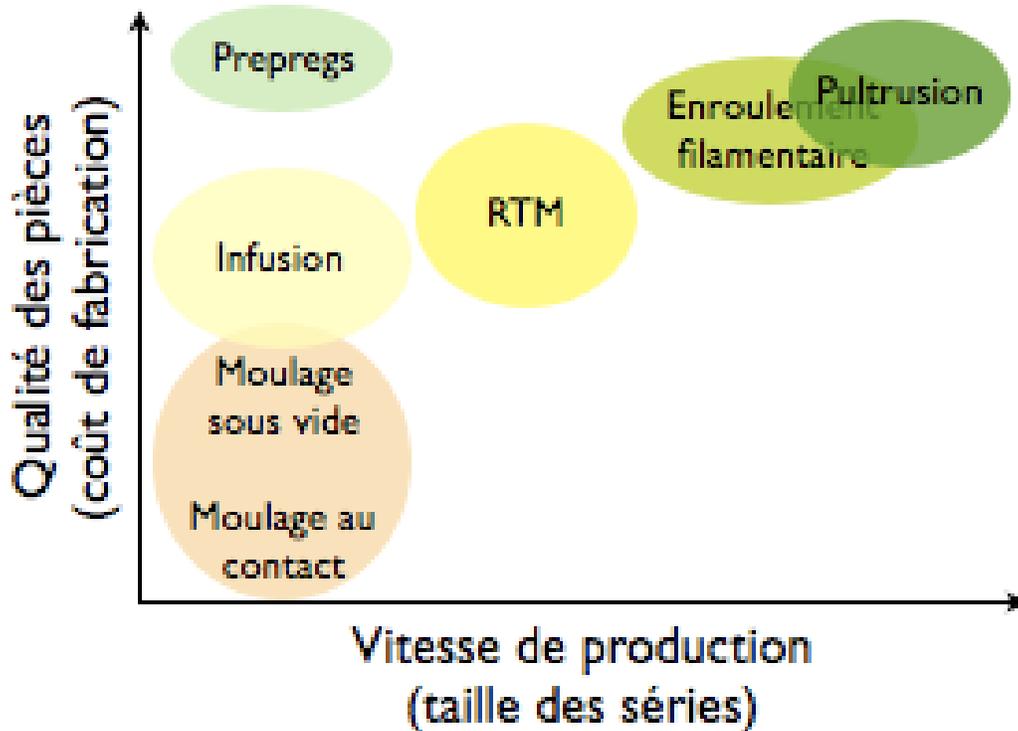


Figure 1.12 : Comparaison entre les différentes techniques de point de vue économique. [2]

1.7.4) Polymérisation

La polymérisation des thermodurcissables se caractérise par le durcissement de la résine provenant des liaisons covalentes entre les chaînes de polymères amorphes. La polymérisation d'une résine peut se faire de deux manières distinctes : par addition et par condensation. Dans le cas de la résine époxyde, ce sont les liaisons chimiques avec le durcisseur qui permettent la polymérisation, ayant lieu par addition. Inversement, la résine phénolique possédant des molécules d'eau se polymérise en formant de nouveaux liens à l'emplacement occupé par l'eau, ainsi ce type de polymérisation se nomme par condensation. Dans les deux cas, la réaction chimique est exothermique. Ce type réaction se produit généralement en trois phases montrées dans la figure (Figure 1.13) [12].

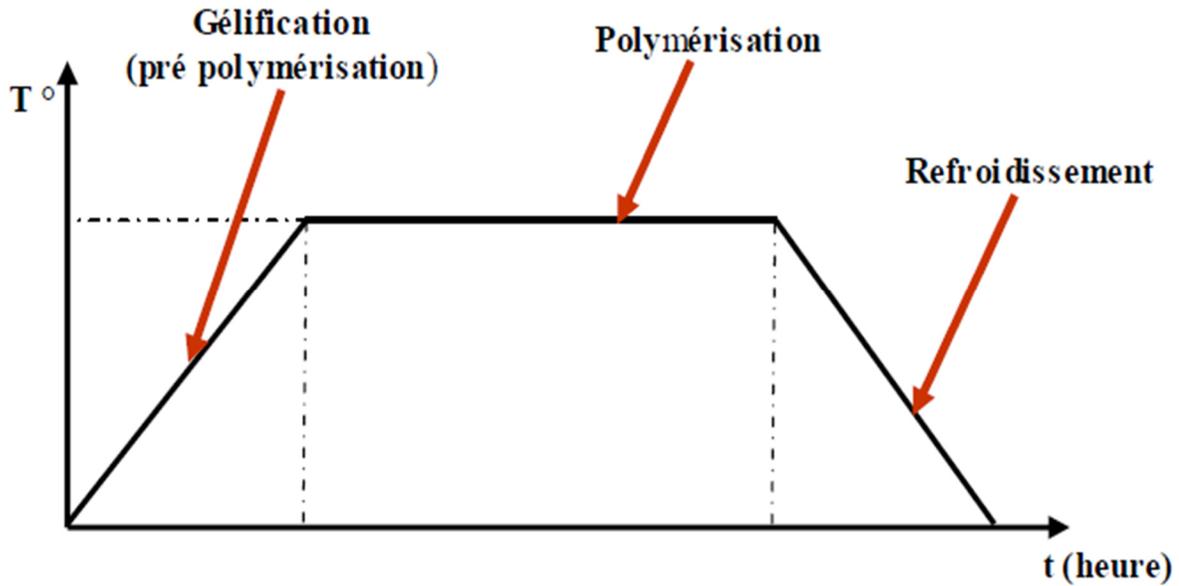


Figure 1.13 : Phases de polymérisation.[12]

La première phase correspond à la gélification de la matrice, suivie d'une seconde phase de polymérisation à plus haute température qui permet d'atteindre le taux de réticulation souhaité et enfin le refroidissement de la structure.

Avantages et inconvénients du procédé

Les principaux avantages et inconvénients du procédé d'enroulement filamentaire sont présentés dans le (Tableau 1.2).

Tableau 1. 2 : Avantages et inconvénients de la technique d'enroulement filamentaire [13].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Mandrin pouvant atteindre 10 mètres de long ; • Régularité du bobinage ; • Intégration d'un liner dès la fabrication ; • Utilisation de renforts économiques (rovings) ; • Taux élevé de renforts ; • Maitrise de l'orientation des fibres ; • Possibilité de production en continu ; • Equitension des fils lors de la dépose ; • Possibilité d'automatisation du procédé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle délicat du débullage et essorage de la résine par la tension des fils lors de l'enroulement ; • Mandrins onéreux pour les formes complexes (mandrins extractibles).

1.8) Etat de l'art :

Cheng et al. [14] ont étudié des tubes de très grande dimension en composite polymère renforcé de fibres de verre (PRV) élaboré par la technique d'enroulement filamentaire, ces tubes anticorrosifs sont souvent utilisés comme gaine de cheminée dans le système de désulfuration des gaz de combustion.

La conception du cheminé est effectuée en trois parties ayant les mêmes dimensions : 3000mm de hauteur, diamètre de 2800 mm, et une épaisseur de 5,6 mm (Figure I.14). L'empilement utilisé est 0/±45/90/0/90/±45/0.

Les trois segments de cheminée cylindrique ont été testés en compression axiale, les modes de défaillance, les relations charge-déplacement, la variation des déformations au cours du processus de chargement, ont été acquis par essai. Les effets des raidisseurs annulaires sur le comportement mécanique, la fiabilité de service du joint entre les deux segments de la gaine de cheminée et la fiabilité du support annulaire ont été examinés.



Figure 1. 14 : Spécimens de chemises de cheminée cylindriques en PRFV : (a) YT-1, (b) YT-2, (c) YT-3.

Les comparaisons entre la rigidité calculée théoriquement et la rigidité mesurée expérimentalement ont été discutées. De plus, une analyse par éléments finis a été effectuée pour identifier les modes de défaillance et le comportement de déplacement axial des charges des gaines de cheminée étudiées.

La **Figure 1.15** montre les comparaisons entre les résultats théoriques et expérimentaux, où ces derniers enregistrent des augmentations de la rigidité de l'ordre de 10 %, 63 % et 166 % respectivement des tubes YT-3, YT-1 et YT-2 comparativement aux résultats théoriques. Il est important de noter que les résultats de la rigidité de YT-3 est la plus proche de la valeur théorique, car YT-3 est sans raidisseurs et l'augmentation de 10% est due à l'existence de la bague de fixation. Les valeurs de rigidité de YT-2 et YT-3 illustrent une augmentation significative qui résulte de l'existence des raidisseurs et de la bande articulaire.

Les **figures 1.16 a, b et c** montrent les comparaisons de la charge axiale-déplacement entre les résultats expérimentaux et simulés, qui concordent bien en terme de rigidité initiale, de capacité portante de pointe et de rigidité de ramollissement.

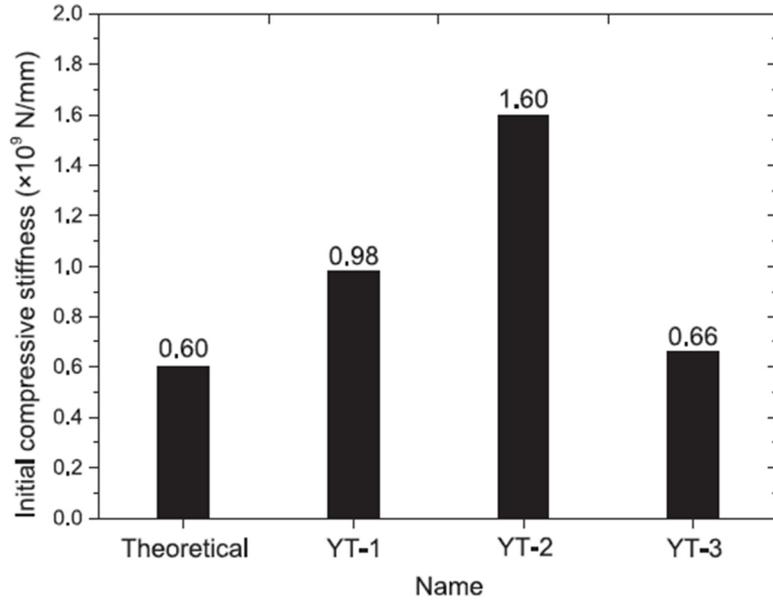


Figure 1.15 : Comparaison de la compression initiale théorique et expérimentale.

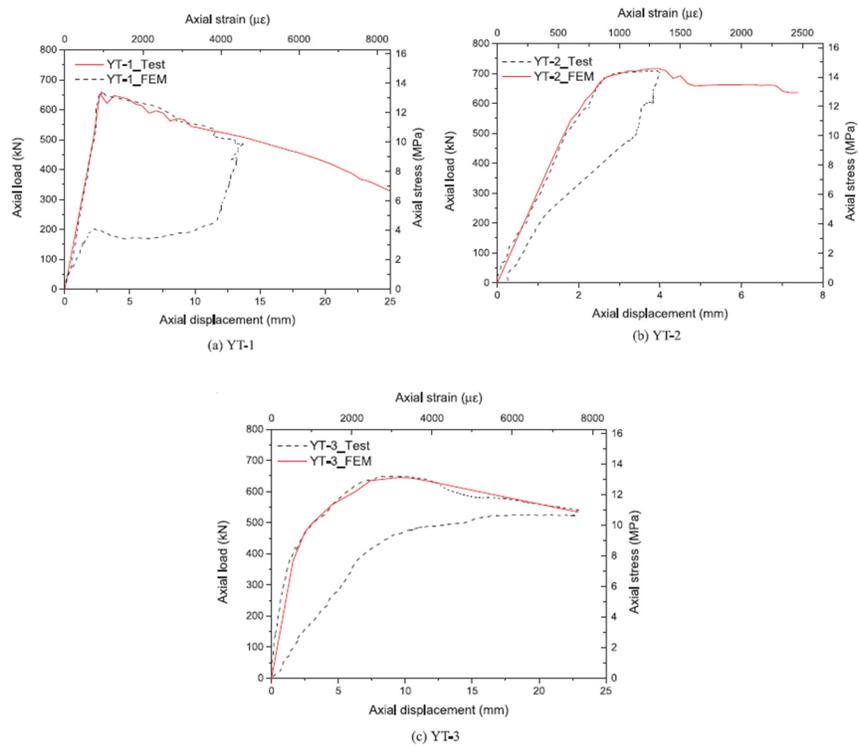


Figure 1.16 : Les courbes de charge axial-déplacement axial expérimental et simulé a) YT-1 b), YT-2, c) YT-3.

Les principales conclusions de ce travail peuvent être résumées comme suit :

- Le joint entre deux pièces de revêtement de cheminée a aidé YT-2 et YT-3 à générer une meilleure rigidité que YT-1.
- L'effet d'un joint annulaire sur la résistance axiale et le mode de rupture doivent être pris en compte dans la conception de la cheminée.
- Il est préférable d'avoir un rapport diamètre sur l'épaisseur de paroi de 500mm dans la conception d'une Cheminée en PRV.
- Il est conseillé d'installer deux raidisseurs à 1/3 et à 2/3 de la hauteur du liner.

Humberto et al. [15] ont étudié les dommages et les défaillances de trois tubes composites constitués d'une résine époxyde renforcé de fibre de carbone et ayant les empilements $[90/\pm 55_4/90]$, $[90/\pm 55_8/90]$ et $[90/\pm 55_{12}/90]$ qu'ils ont pu évaluer au moyen d'un modèle de dommages proposé. Les tubes ont été fabriqués par enroulement à filament sec à l'aide de câbles T700 towpreg et soumis à des essais de pression externes pour évaluer les analyses obtenues par des calculs. Ces résultats ont été comparés à des essais expérimentaux, et les différences relatives dans les intensités de pression externes étaient inférieures à 8,4 %. Le modèle développé présentait un faible coût de calcul et un très bon accord avec les résultats expérimentaux, ce qui est très attrayant aussi bien pour les universitaires que pour les industriels.

La Figure 1.17 présente un graphique de la pression externe appliquée en fonction de la longueur de l'arc. L'analyse de risque montre que le tube ayant l'empilement $[90/\pm 55_4/90]$ présente une instabilité géométrique sous basse pression, indiquant un flambage initial à environ 8 bars. Après le flambage initial, la courbe montre un comportement légèrement non linéaire jusqu'à la pression finale de flambage, qui est enregistrée à environ 44 bars. Le tube $[90/\pm 55_8/90]$ montre une réponse linéaire jusqu'à 131 bars, lors du flambage.

L'éprouvette supporte toujours une charge de 131 à 151 bars, comme le montre la figure 1.18, suivie d'un affaissement dû au flambage à environ 159 bars. D'autre part, le tube $[90/\pm 55_{12}/90]$ a une réponse linéaire jusqu'à la pression maximale appliquée dans la simulation, ne montrant aucun flambage.

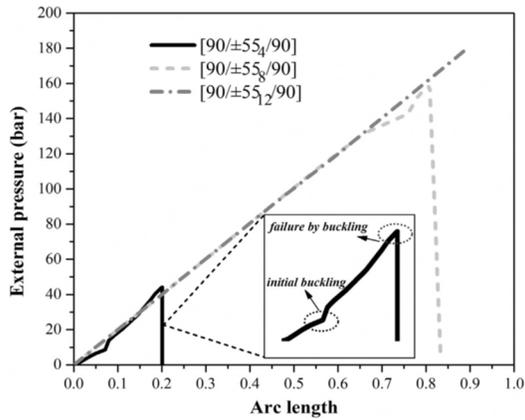


Figure 1.17 : Variation de la pression le long de la simulation en fonction de la longueur de l'arc.

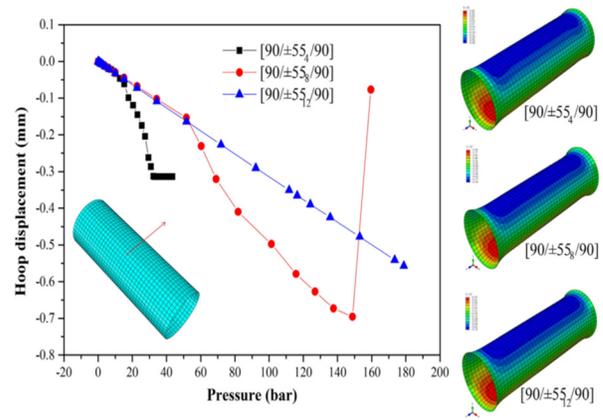


Figure 1.18 : Déplacement circonférentiel dans la région centrale comme indiqué par la flèche « rouge ».

L'analyse des défaillances progressives montre que le tube composite est capable de supporter des charges au-delà du début de la défaillance des fibres, comme le montre la Figure 1.19. Celle-ci peut être utile car des facteurs de sécurité moins prudents pour les structures tubulaires composites peuvent être adoptés en fonction du cas spécifique, diminuer le poids final du système.

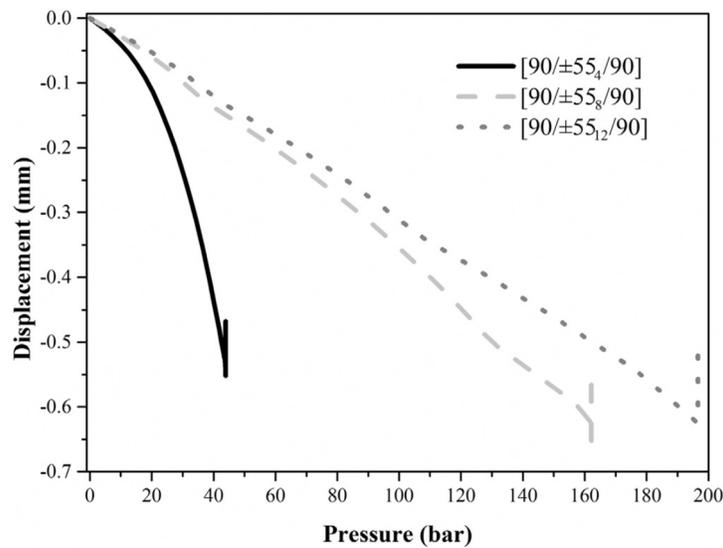


Figure 1.19 : Déplacement en fonction de pression pour la détermination de la résistance à pression externe maximale.

Les principales conclusions de Humberto et al sont :

- Les pressions de rupture ont été estimées avec précision par les analyses numériques pour tous les tubes.
- L'analyse a également été en mesure de prédire avec précision le mode de défaillance de chaque tube, par flambement pour (90/55₄/90) et (90/55₈/90) tandis que (90/55₁₂/90) devrait se rompre par délaminage ceci a été vérifié expérimentalement.

Perillo et al. [16] ont étudié la procédure complète de caractérisation des tubes composites à enroulement filamentaire produits avec du verre/vinylester (PRV) et du carbone/époxyde (PRC). En outre, une méthode optique innovante a été développée pour l'évaluation de la teneur en vide des deux matériaux produits qui ont montré une grande quantité de vides. Une technique a été développée sur Matlab afin d'obtenir directement une estimation du contenu des vides à partir des images optiques micrographiques des échantillons.

Des tests de split disc ont été utilisés pour évaluer les propriétés de base du matériau dans le plan. Les résultats force/déplacement ou contrainte/déformation présentés dans les figures 1.20 et 1.21 ont montré une forte dispersion de la résistance à la rupture mesurée pour les composites PRV et PRC. Les deux matériaux ont montré un comportement presque linéaire jusqu'à la rupture catastrophique (brutale) finale qui a été caractérisée par une forte explosion. De plus, dans presque tous les essais, même si aucune variation n'a été signalée dans les courbes (Figure 1.20 et 1.21), un bruit a été entendu quelques secondes avant la rupture finale, cela est une preuve évidente qu'il y a eu des endommagements avant la rupture finale.

Les auteurs ont démontré, la capacité du test split-disc d'évaluer la résistance du matériau ainsi que le module dans le sens des fibres par le développement d'une nouvelle conception de tests biaxiaux.

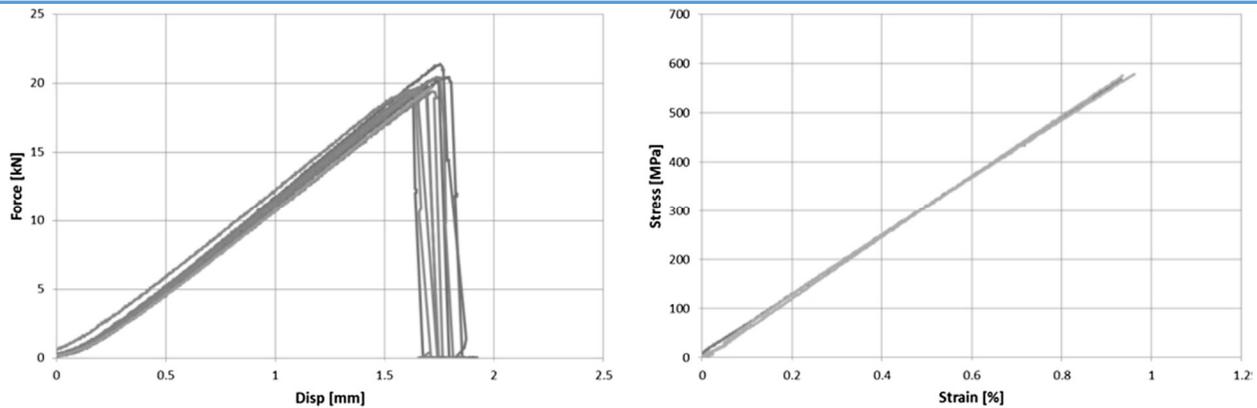


Figure 1.20 : Courbes force/déplacement et contrainte/déformation du test Split Disc des tubes PRV.

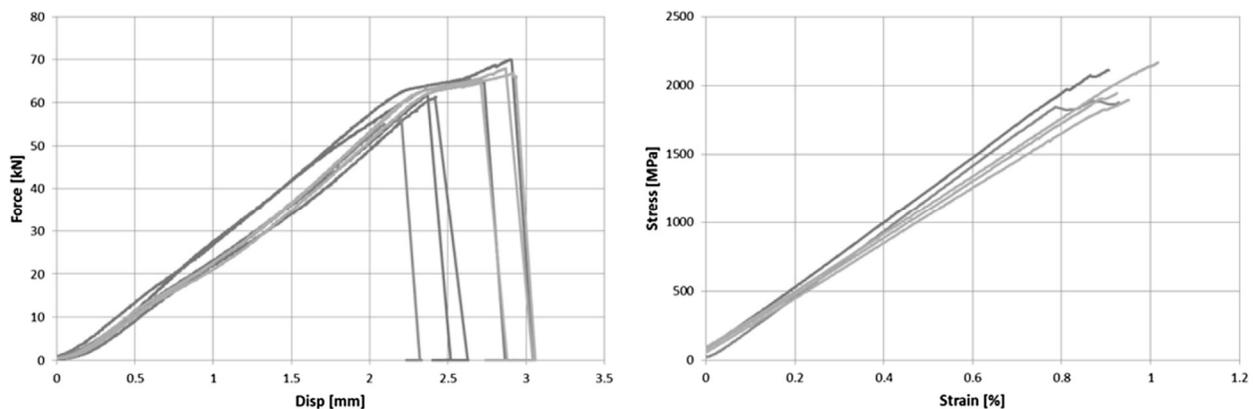


Figure 1.21 : Courbes force/déplacement et contrainte/déformation du test Split Disc des tubes PRC.

Almeida et al. [17] ont développé un modèle de calcul des dommages pour prédire les défaillances des tubes composites carbone/époxy élaboré par la technique d'enroulement filamentaire sous une charge de compression circonférentielle. L'analyse numérique est effectuée via la méthode des éléments finis (MEF), alors que l'étude expérimentale est effectuée selon la norme ASTM D2412.

L'analyse des défaillances progressives et les résultats expérimentaux des tubes composites sont présentés dans la Figure 1.22. Le modèle d'endommagement simule très bien le comportement des tubes. Autrement dit, les courbes de charge en fonction de la flèche, la charge maximale et la rigidité de chaque famille de séquences d'empilement peuvent être prédites avec une bonne précision.

Les résultats numériques et expérimentaux montrent que la présence de couches de cerceau au niveau des couches intérieures et extérieures $\pm 75^\circ$ des couches non géodésiques donne une charge de compression maximale au tube composite, car le renfort est enroulé proche de la direction du chargement. De plus, les modes de défaillance sont principalement par délaminages, ceci a été confirmé par des analyses numériques.

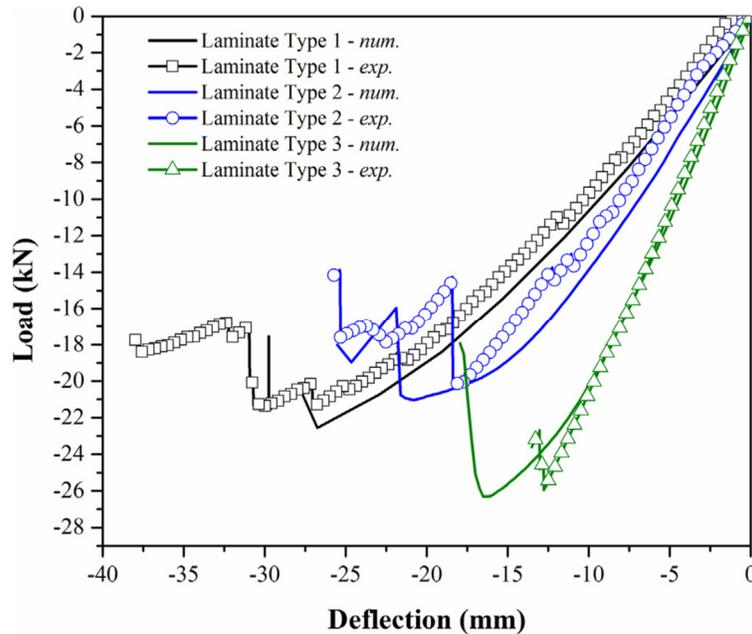


Figure1.22 : Charge/déflexion des tubes en compression circonférentielle : résultats expérimentaux et numériques.

Les principales conclusions des auteurs sont les suivantes :

- Les tubes ont commencé à concentrer les contraintes sur les couches les plus externes en raison de leur contact avec les plaques de chargement du dispositif et des dommages propagés à partir des zones de contact.
- Le modèle de calcul a prédit avec précision à la fois la charge et la déflexion par rapport aux résultats expérimentaux.
- La séquence d'empilement a fortement affecté la charge maximale supportée par les tubes composites, et le tube avec plus de couches de cerceau car les couches externes du stratifié et avec des couches non géodésiques enroulées à $\pm 75^\circ$ ont montré une meilleure réponse structurelle.

Des études expérimentales ont été effectuées récemment par Özbek et al. [18] sur des tubes en composites basalte/époxy (BFRP), verre/époxy (GFRP) et hybride basalte/verre/époxy (BGFRP). Les tubes fabriqués par la technique d'enroulement filamenteux et ayant divers angles d'orientation des fibres ($\pm 40^\circ$, $\pm 55^\circ$, et $\pm 70^\circ$) ont été soumis à des chargements de compression quasi statique.

Les figures 1.23 montrent les réponses charge/déplacement des trois tubes composites orientés respectivement à $\pm 40^\circ$, $\pm 55^\circ$, et $\pm 70^\circ$.

L'analyse de ces résultats montre que le tube composite verre/époxy dont les fibres sont orientées à $\pm 40^\circ$ avait le pic initial le plus élevé et la charge moyenne la plus faible, soit respectivement 45,51 kN et 23,33 kN, en raison de son mode d'écrasement catastrophique (Figure 1.23a).

La charge moyenne la plus élevée, soit 25,22 kN, a été obtenue pour le tube hybride basalte/verre/époxy BGFRP ayant l'orientation des fibres $\pm 55^\circ$ (Figure 1.23b), car elle correspond à la réponse de la charge pendant l'écrasement. Le tube hybride BGFRP a montré un écrasement progressif tout en ayant le bout avec les fibres évasées vers l'extérieur. De plus, le mode de rupture du GFRP a commencé par la fragmentation de la matrice et se traduit par un cisaillement transversal et une flexion de la lame provoqués par des fissures parallèles à la fibre ce qui est en bonne concordance avec la littérature [19, 20].

Le tube basalte/époxy BFRP ayant les fibres orientées à $\pm 70^\circ$ développe un mode de rupture par cisaillement transversal par pliage progressif dans diverses régions et une augmentation spectaculaire de la charge provoquée par le début de la densification (Figure 1.23c). L'échantillon BGFRP hybride fibres de verre et de basalte se caractérise par une réponse instable de la charge avant l'écrasement cyclique final progressivement par croissance interlaminaire de fissures. C'est cohérent avec une fracture des frondes, où la paroi du tube se divise en frondes intérieure et extérieure le long de la direction axiale [21]. Alors que le tube en fibre de verre GFRP a montré un mode d'écrasement catastrophique par cisaillement dans le sens de l'orientation des fibres.

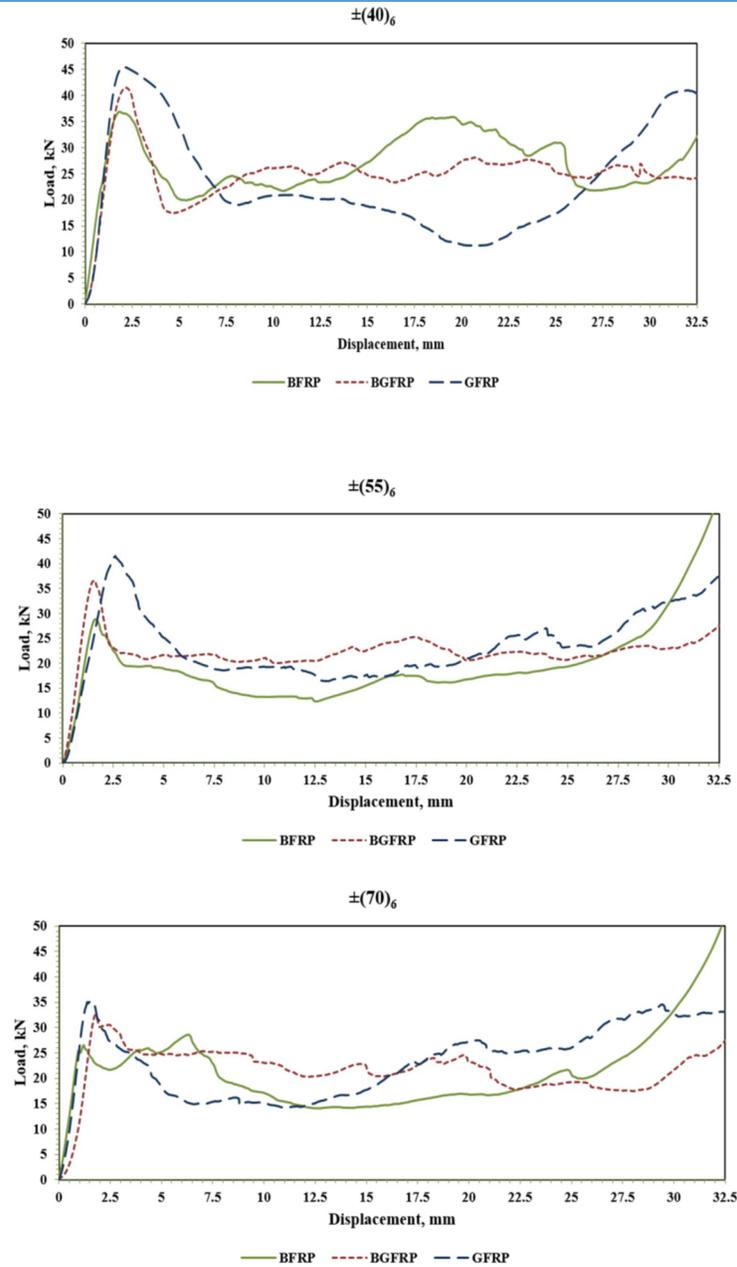


Figure 1.23 : Réponse charge-déplacement des tubes composite BFRP, GFRP et BGFRP ayant les fibres orientées à : a) $\pm 40^\circ$. b) $\pm 55^\circ$. c) $\pm 70^\circ$.

Les conclusions des auteurs peuvent être résumées comme se suit :

- Hybride BGFRP a montré le comportement plus stable sur la réponse de charge/déplacement par le mode de rupture fragile en cisaillement transversal et cintrage laminaire. Une rupture catastrophique a été observée pour les échantillons de GFRP en

raison de leur structure plus mince, tandis qu'une rupture progressivement est enregistrée pour tous les autres.

- La combinaison de la fragmentation de la matrice, du décollement des fibres, du délaminage et de la rupture des fibres s'est manifestement formée pendant tout le processus de chargement. Pour les angles d'orientation des fibres de $\pm 40^\circ$, $\pm 55^\circ$ et $\pm 70^\circ$, les valeurs de charge du premier pic du BFRP ont augmenté de respectivement de 12,5%, 27,8% et 23% avec l'ajout de fibres de verre et l'efficacité de chargement du BGFRP a également atteint des augmentations respectives de 18,6 %, 7,5% et 2,6% par rapport à celui du GFRP.
- Grâce à l'influence de l'orientation de la fibre, une orientation plus élevée de la fibre entraîne une diminution de l'absorption d'énergie. Cela est lié à la propagation de fissures inter laminaires qui se produisent dans une direction parallèle à la fibre.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions de bases des matériaux composites, ainsi que les techniques suivies pour les mises en forme et l'élaboration des composites.

La technique d'enroulement filamentaire a été discutée en détail car c'est celle-ci qui est utilisée dans cette étude.

Un état de l'art des travaux antérieurs sur ce sujet de l'élaboration et la caractérisation des tubes composites a été également bénéfique pour situer le présent travail par rapport à la littérature.

Chapitre 2

*Elaboration des tubes et leur
protocole de caractérisation
mécanique*

Chapitre 2

Elaboration des tubes et leur protocole de caractérisation mécanique

2.1) Introduction

Ce chapitre montre les méthodes et les outillages utilisés pour l'élaboration et la caractérisation des tubes en matériaux composites verre/époxy. Ces tubes sont élaborés par la méthode d'enroulement filamentaire, qui est l'une des anciennes et la plus efficace, en termes de productivité et de bonne qualité, pour la fabrication des pièces en composite ayant des surfaces de révolutions (cylindriques, conique, sphérique).

Deux catégories de tubes composites verre/époxy ayant quatre plies sont élaborées. Ces tubes ont deux architectures différentes, la première est 90/90/90/90 équivalente à $(90)_4$, et la deuxième est 90/55/55/90, c'est-à-dire $(90/\pm 55)_s$. Après avoir polymérisé les tubes, ils sont découpés en éprouvettes selon les normes ASTM avant d'être caractérisés à l'aide de deux essais mécaniques à savoir : la compression radiale (test de rigidité) et la traction circonférentielle (split-disc).

2.2) **Elaboration des tubes composites et leur découpe en éprouvettes**

2.2.1) *Matériau utilisé*

Dans ce travail, la fibre de verre TEX 2400 a été utilisée pour élaborer les tubes composites. La matrice utilisée est la résine époxy commercialisée sous le nom (LORN), la résine est mélangée avec un durcisseur spécifique qui offre une très grande adhérence et un faible jaunissement.

L'élaboration d'un tube composite nécessite la préparation de 500g d'un mélange résine/durcisseur soit : 335g de résine époxy et 175g de durcisseur correspond respectivement à 65% et 35% du mélange.

Les tableaux 2.1 et 2.2 présentent les caractéristiques principales de la résine et de la fibre utilisée dans l'élaboration des tubes composites.

Tableau 2.1 : Caractéristiques mécaniques de la résine époxy (LORN) [2].

	Époxy	Durcisseur
Densité à 23°C (g/cm ³)	1,5	1,01
Viscosité à 23°C	12000	800
Rapport d'emploi en poids	65 %	35 %

Tableau 2.2 : Caractéristiques mécaniques de la fibre TEX 2400 [2].

Renfort	Verre
Densité à 23°C (g/cm ³)	2,54
Module de Young E (GPa)	72 - 73

2.2.2) *Elaboration des tubes composites*

Dans cette étude, les tubes composites sont réalisés par le procédé d'enroulement filamentaire. La machine d'enroulement filamentaire à deux axes et a été utilisée pour fabriquer

les tubes composites. Les tubes composites fabriqués sont symétrique et équilibré et possèdent quatre plis qui ont différents angles d'orientations 55° et 90° selon les architectures suivantes : le premier ayant 4 plis de 90° $(90)_4$ (Figure 2.1a) et second possédant deux plis externes orientés à 90° alors que deux plis interne sont à 55° $(90/\pm 55)_s$ (Figure 2.1b). Les tubes fabriqués ont une longueur de 500 mm et un diamètre intérieur de 92 mm, ces tubes ont été polymérisés pendant une durée d'environ cinq heures à une température élevée en utilisant une plaque chauffante (Figure 2.2).



Figure 2.1 : Tubes en matériau composite Verre/époxy :a) Angle d'enroulement $(90)_4$
b) Angle d'enroulement $(90/\pm 55)_s$.



Figure 2.2 : Polymérisation de tube sur une plaque chauffante.

La machine utilisée pour l'élaboration des tubes a été fabriquée localement au laboratoire de l'université. La partie mécanique de cette machine est constituée par un mandrin, un guide-fil et un bain d'imprégnation (Figure 2.3). Cette machine a aussi une partie électrique qui contient deux moteurs pas à pas (Figure 2.4), l'un pour faire tourner le mandrin et l'autre pour faire translater le chariot qui porte le bain de résine qui sert à l'imprégnation de la fibre. La combinaison des fréquences de rotations de ces deux moteurs permet le réglage des angles d'orientations de la fibre. Cette machine est dotée d'un pupitre comprenant : des boutons poussoir, marche et arrêt, un écran digital pour visualiser les taches (Figure 2.5 a) et équipée aussi d'un automate Siemens de type LOGO! TD permettant la programmation des cycles de fabrication des tubes composites ayant n'importe quel nombre de plis ou orientation des fibres entre 10 et 90 degrés (Figure 2.5 b).

Cette machine est conçue pour fabriquer des tubes ne dépassant pas les 400 mm de diamètre avec des longueurs maximale de 1480 mm.



Figure 2.3 : Mandrin et bain de résine de la machine d'enroulement filamentaire.



Figure 2.4 : Variateurs de fréquence électrique de la machine d'enroulement filamentaire.



a)



b)

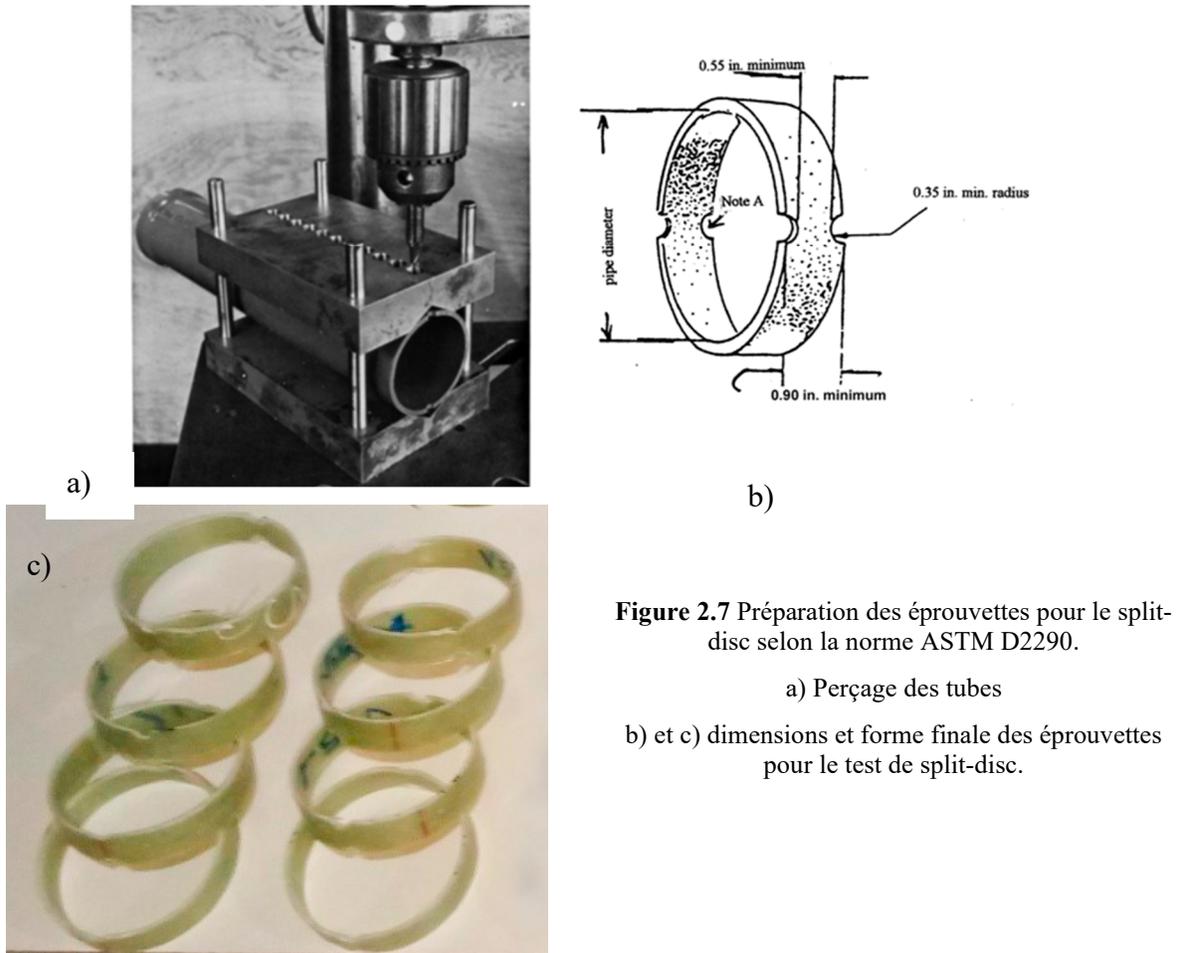
Figure 2.5 : interface d'utilisateur de la machine. a) pupitre de commande ; b) écran.

2.2.3) Découpe des tubes composites en éprouvettes

Avant de faire les essais, les tubes ont été découpés en éprouvettes pour des tests de compression radiale (rigidité) selon la norme ASTM D2412 ayant les dimensions de 200 mm de longueur et 92 mm de largeur (Figure 2.6). Afin de respecter la norme ASTM D2290 pour les tests de compression radiale, les tubes composites sont percés pour créer une section réduite, ces percages peuvent être d'un seul côté ou bien des deux côtés opposés à 180° avant d'être découpés en éprouvettes selon les dimensions indiquées dans la figure 2.7b et 2.7c. Cette section réduite est là pour concentrer la contrainte dans cette zone de l'éprouvette et conduire à une rupture dans cette zone.



Figure 2.6 : Eprouvettes de $(90)_4$ et $(90/\pm 55)_s$ découpées selon les normes ASTM D2412.



2.3) Caractérisation mécanique des tubes composites

Les tubes composites élaborés, puis découpés selon les normes ASTM, sont testés (trois essais pour chaque tube) en rigidité et en split-disc pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques. Les tests ont été effectués à l'entreprise MAGHREB PIPE Industries, M'silla. Puis, en utilisant les résultats des tests, des courbes ont été tracées pour mieux visualiser les caractéristiques des tubes.

Chaque test permet à déterminer certaines caractéristiques telles que : le module de Young, la contrainte à flexion radiale, la rigidité ... etc.

2.3.1) *Test de Rigidité*

La machine utilisée pour le test de rigidité est de type STM YL-28, dotée d'une cellule de charge de 65 kN et avec une vitesse d'essai comprise entre 10 et 400 mm/min (Figure 2.8). Un test de rigidité consiste à un chargement monotone d'un tube composite, de longueur courte (200 mm), mis entre deux plaques plates parallèles et rigides à un taux d'approche contrôlé les unes par rapport aux autres jusqu'à 5% de déflexion par rapport à son diamètre initial.



Figure 2.8 : Test de compression radiale d'un tube verre/époxy.

Les données charge-déplacement des tests effectués avec une vitesse constante de 2,5 mm/min sont enregistrées dans l'ordinateur et utilisées pour tracer les courbes Charge-Déflexion, en plus cette courbe est visualisée dans l'écran de la machine (Figure 2.9). En cas de fissuration, de déchirure, de délaminage ou de rupture sous la limite de 5% de déflexion, la charge et la déformation correspondantes au pourcentage de cette déflexion sont enregistrées et utilisées conformément à la norme ASTM D2412 [22].

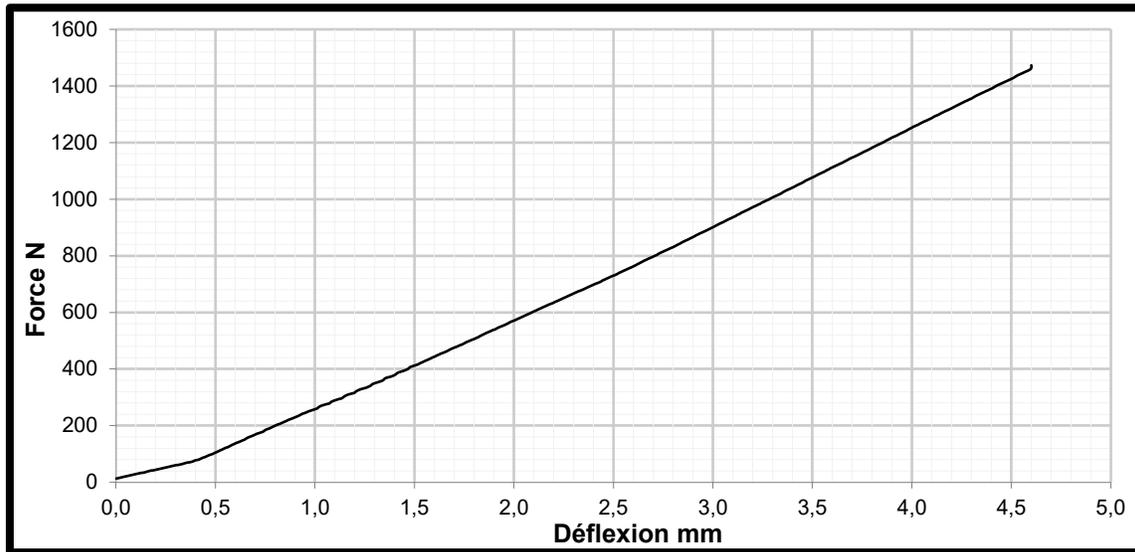


Figure 2.9 : Courbe de force-déflexion.

Il est possible de déterminer certaines caractéristiques des tubes composite selon la norme ASTM D2412 et qui sont comme suites :

- La charge correspondante à déflexion de 5% (Force N), qui est déterminée expérimentalement ;
- La rigidité du pipe PS (kPa) ;
- La rigidité spécifique S (kPa) ;
- Le module d'élasticité en compression radiale E (N/mm²).

Ces caractéristiques peuvent être calculées en utilisant les formules suivantes :

$$PS = \frac{F}{y} \left(1 + \frac{y}{2D}\right)^3$$

Où :

- y : Déplacement qui correspondant à 5% de déflexion (mm), $D \times d / 100$ ($d = 5\%$ déflexion maximale du test), dans notre cas : $y = (92 \times 5) / 100 = 4.6$ mm.
- D : Diamètre intérieur moyen du tube composite (dans notre cas $D = 92$ mm).

- F : La charge par une unité de longueur correspondante à 5% de déflexion (dans notre cas $F = 5 \times \text{Force N/m}$).

Pour calculer le module d'élasticité E , il faut d'abord calculer le facteur de rigidité « SF »

$$SF = 0,149 \times r^3 \times PS$$

Où :

0,149 : Valeur constante. r : Rayon intérieur moyen de tube ($D/2$).

Afin de calculer SF , la formule suivante peut être utilisée :

$$EI = SF = 0,149 \times r^3 \times PS$$

La valeur EI d'un tube est une fonction de module d'élasticité du matériau et de son épaisseur (t).

Où :

E : le module de Young du tube en compression radiale ;

I : le moment d'inertie du tube, qui peut être déterminé par : $I = t^3/12$.

Alors le module d'élasticité E pourra être déterminé par :

$$E = \frac{SF}{I} = \frac{0,149 \times r^3 \times PS}{I} = \frac{0,149 \times r^3 \times PS}{\frac{t^3}{12}}$$

Finalement E est égal à : $E = \frac{12 \times 0,149 \times r^3 \times PS}{t^3}$.

La rigidité spécifique S est généralement déterminée quand des normes différentes que l'ASTM sont utilisées comme ISO, BSBS, et elle est définie comme suit :

$$S = \frac{EI}{D^3}$$

- La relation entre la rigidité du pipe et la rigidité spécifique est comme suit :

Il est déjà déclaré que :

$$EI = 0,149 \times r^3 \times PS$$

$$EI = 0,149 \times \left(\frac{8}{8}\right) \times r^3 \times PS.$$

Et :

$$S = \frac{EI}{D^3}.$$

Alors :

$$EI = 0,149 \times \left(\frac{1}{8}\right) \times D^3 \times PS.$$

Et :

$$S = \frac{EI}{D^3} = 0,018625 \times PS.$$

2.3.2) *Test de traction circonférentielle (Split-disc)*

Le test de split-disc est fait pour déterminer les caractéristiques d'un pipe dans le cas d'une flexion radiale. La machine utilisée dans ce test est de type YLE YL25, dotée d'une cellule de charge de capacité de 250 kN et pouvant faire des tests avec des vitesses comprises entre 0,1 et 300 mm/min (Figure 2.10) [23]. La méthode split-disc consiste à charger l'éprouvette mise dans un dispositif du test auto-alignant (Figure 2.11), la partie mobile de ce dispositif translate vers le haut à une vitesse constante de 2,5 mm/min, cela applique une contrainte de traction à l'éprouvette d'essai jusqu'à la rupture selon la norme ASTM D2290 [24]. L'ordinateur enregistre les valeurs de la charge et la durée de l'essai et il trace la courbe Contrainte-Temps (Figure 2.12). Les données enregistrées sont utilisées pour le traçage des courbes.



Figure 2.10 : a) Machine de traction universelle YLE YL25.
b) Dispositif du test Split-disc.

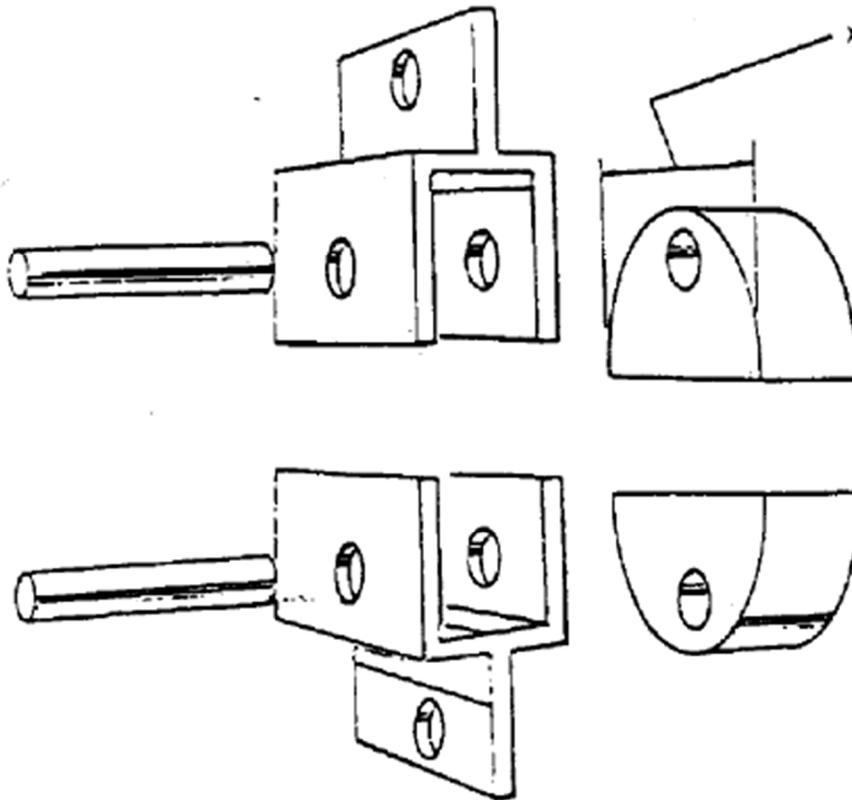


Figure 2.11 : Dispositif de test de Split-disc.

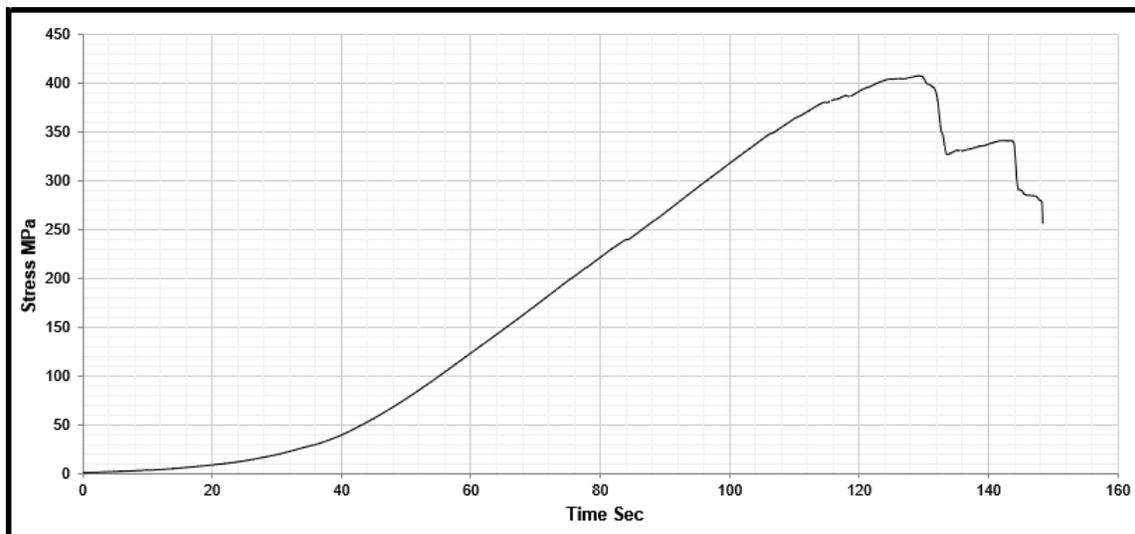


Figure 2.12 : Courbe type de Contrainte-Temps.

Les caractéristiques principales qui peuvent être déterminées par l'essai de split-disc selon la norme ASTM D2290 sont :

- La résistance à la traction circonférentielle σ (MPa) ;
- Déformation maximale en traction circonférentielle ε (%) ;
- Le module de Young en traction circonférentielle E (MPa).

Chacune de ces caractéristiques à une formule pour la déterminer comme suit :

Le calcul de la résistance à la traction circonférentielle σ peut être effectué par l'utilisation de l'équation [24]:

$$\sigma = \frac{F}{2 \times t \times b}$$

Où :

F : La force maximale de traction (N), déterminé expérimentalement.

t : L'épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm) ;

b : La longueur moyenne de l'éprouvette (mm).

Pour calculer la déformation ε (%) il faut d'abord calculer la déflexion de l'éprouvette en (mm).

Comme la vitesse est égal à $\frac{dx}{dt}$, alors $dx = v \cdot dt$, et comme v est constante est égal à 2,5 mm/min

et la déflexion pour chaque moment est calculer par $dx = \left(\frac{2,5}{60}\right) \times dt$.

Alors $\varepsilon = \frac{dx}{D} \times 100$.

Où :

D = Diamètre intérieure de l'éprouvette (92 mm).

Puis, après le calcul de la contrainte σ et la déformation ε (%), le module de Young en traction circonférentielle peut être finalement calculé depuis ces paramètres.

Le module de Young sera déterminé après le traçage de la courbe σ/ε . Il est montré graphiquement dans la partie linéaire de cette courbe, il est la pente de cette partie.

Le module de Young peut être aussi calculé à l'aide de cette équation :

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

Conclusion

La description de l'élaboration des tubes composites et leur protocole de caractérisation mécanique en rigidité et en split-disc permettent de conclure ce qui suit :

- Les matériaux composites nécessitent des quantités très précises des constituants de base (fibre, résine) pour être fabriqués ;
- Les angles d'enroulement sont contrôlés par les vitesses de rotation du mandrin et la translation de la table de la machine ;
- La découpe des tubes composites en éprouvettes pour qu'elle soit caractérisée mécaniquement est faite selon des normes internationales (ASTM D2412, ASTM D2290 respectivement pour les tests de rigidité et split-disc) avec des étapes et dimensions précises.
- Les normes de caractérisation gouvernent aussi l'outillage utilisé, les procédures des essais et elles fournissent des formules permettant le calcul des diverses caractéristiques des tubes composites élaborés et testés.

Chapitre 3

Résultats et discussions

Chapitre 3

Résultats et discussions

3.1) Introduction

Cette étude s'intéresse à la caractérisation des tubes en matériaux composites verre/époxyde élaborés au laboratoire, à l'université 8 Mai 1945 Guelma, par la technique d'enroulement filamentaire. Ce chapitre concerne la discussion des résultats des tests de rigidité (c'est un test de compression radiale à 5 %) et de traction circonférentielle (split-disc) effectués respectivement selon les normes ASTM D2412 et ASTM D2290. Les résultats expérimentaux des tubes composites ayant pour empilement $(90)_4$ et $(90/\pm 55)_s$ ont été comparés et leur principales caractéristiques mécaniques ont été aussi déterminées.

3.2) Test de rigidité

Le test de rigidité d'un tube composite, selon la norme ASTM D2412, consiste à faire un essai de compression radiale avec une déformation de 5% de son diamètre intérieur afin d'obtenir:

- La force correspondante à la déflexion maximale, F (N) (déterminée expérimentalement) ;
- La rigidité du tube PS (kPa) ;
- La rigidité spécifique, S (kPa) ;
- Le Module d'élasticité en compression, E (MPa).

Le comportement des courbes force/déplacement est généralement linéaire, que cela soit pour le composite $(90)_4$ ou celui $(90/\pm 55)_s$, comme le montre les figures 3.1 et 3.2.

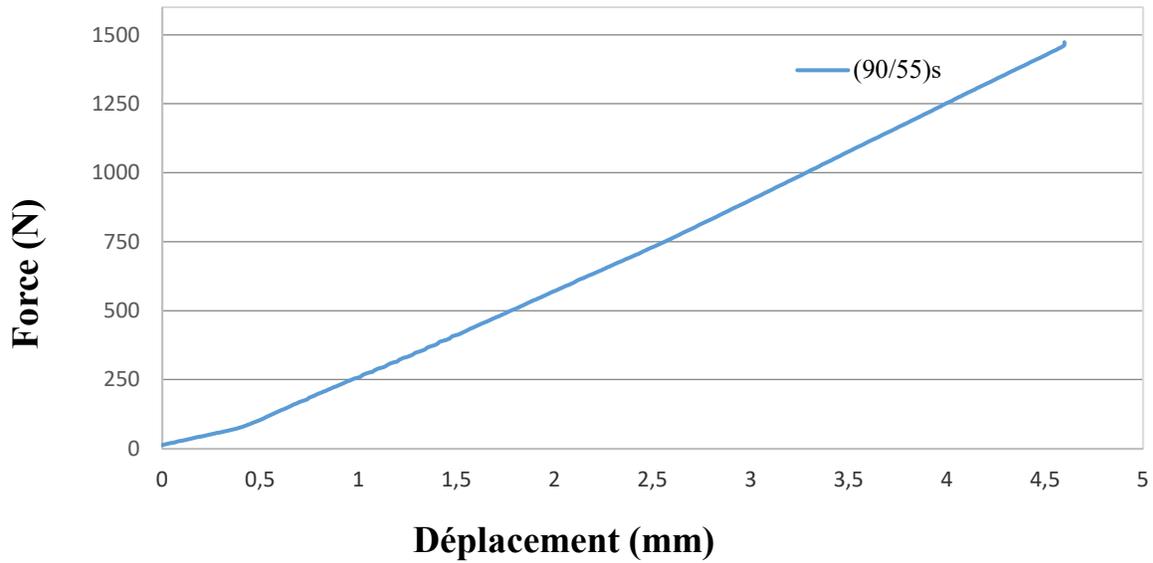


Figure 3.1 : Essai de compression radiale pour tube $(90/\pm 55)_s$.

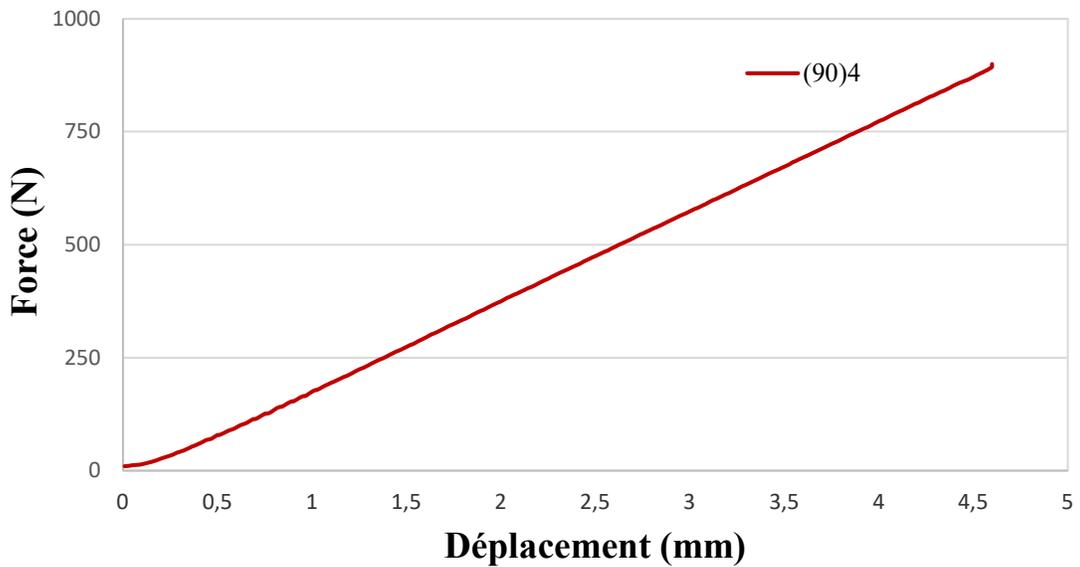


Figure 3.2 : Essai de compression radiale pour tube $(90)_4$.

Les courbes forces/déplacement des deux tubes composites sont présentées dans la figure 3.3.

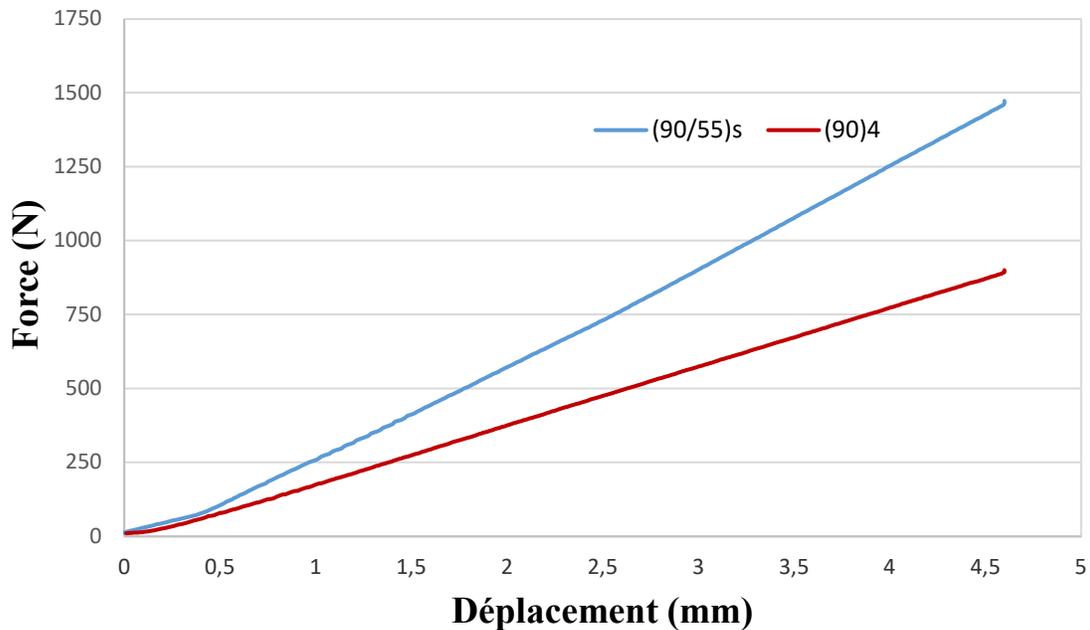


Figure 3.3 : Comparaison entre les angles d'enroulement dans les tests de compression radiale.

Ces courbes de force-déplacement ne sont pas adaptées pour la détermination graphique du module de Young, alors il doit être calculé à l'aide de formule fournie par la norme ASTM-D2412 comme suit :

Calcul du tube (90/±55)s :

- La rigidité du pipe : $PS = \frac{F}{y} \left(1 + \frac{y}{2D}\right)^3 = \frac{5 \times 1479}{4,6} \left(1 + \frac{4,6}{2 \times 92}\right)^3 = 1731,218 \text{ (kPa)}$.
- Le facteur de rigidité : $SF = 0,149 \times r^3 \times PS = 0,149 \times 46^3 \times 1731,218$
 $SF = 25107976,08 \text{ (mm}^3 \text{ kPa)}$.
- Le module de Young : $E = \frac{SF}{I} = \frac{12 \times 0,149 \times r^3 \times PS}{2,97^3} = \frac{12 \times 2510797,08}{2,97^3} = 11471688,94 \text{ (kPa)}$
 $E = 11,471 \text{ (GPa)}$.
- La rigidité spécifique : $S = \frac{EI}{D^3} = 0,018625 \times PS = 0,018625 \times 1731,218$
 $S = 32,243 \text{ kPa}$.

Calcul du tube (90)₄ :

- La rigidité du pipe : $PS = \frac{F}{y} \left(1 + \frac{y}{2D}\right)^3 = \frac{5 \times 901}{4,6} \left(1 + \frac{4,6}{2 \times 92}\right)^3 = 1054,650 \text{ (kPa)}$.
- Le facteur de rigidité : $SF = 0,149 \times r^3 \times PS = 0,149 \times 46^3 \times 1054,650$
 $SF = 15295664 \text{ (mm}^3\text{kPa)}$.
- Le module de Young : $E = \frac{SF}{I} = \frac{12 \times 0,149 \times r^3 \times PS}{2,08^3} = \frac{12 \times 15235664}{2,08^3} = 20359955 \text{ (kPa)}$
 $E = 20,359 \text{ (GPa)}$.
- La rigidité spécifique : $S = \frac{EI}{D^3} = 0,018625 \times PS = 0,018625 \times 1054,650 = 19,642 \text{ (kPa)}$.

Pour le même déplacement de 5% du diamètre intérieur du tube, la courbe du stratifié (90/±55)_s a une force plus importante de 39,1% et une pente visiblement plus grande (rigidité) par rapport à (90)₄.

Par contre, les épaisseurs moyennes des tubes (90/±55)_s et (90)₄ sont égales respectivement 2,97 et 2,08 mm et leur modules de Young, déterminés par ASTM-D2412, pour chacun correspond respectivement à 11,47 et 20,36 GPa. L'augmentation de l'épaisseur du tube (90/±55)_s est due au fait de la superposition des plis orientés à ±55. Ceci a conduit de conclure que le tube (90)₄ ayant le module de Young le plus grand (Tableau 3.1) est plus rigide que (90/±55)_s

Tableau 3.1 : Résultats des essais de compression radiale pour tube composite.

Tube	F (N)	Rigidité du pipe PS (kPa)	Rigidité spécifique S (kPa)	Facteur de rigidité SF (mm ³ kPa)	Module de Young E (GPa)
(90/±55) _s	1 479	1 731,22	32,24	25 107 976	11,47
(90) ₄	901	1 054,65	19,64	15 295 664	20,36

3.3) Traction circonférentielle

La traction circonférentielle est une méthode d'essai utilisée pour étudier la résistance apparente à la traction des tubes en matériaux composites à l'aide d'un dispositif d'essai spécialisé pour séparer un anneau de tube coupé d'un échantillon plus grand. Cette méthode est appelée split-disc selon la norme ASTM-D2290 et le dispositif d'essai contient les composants suivants :

- Une partie fixe ;
- Une partie mobile ;
- Un mécanisme d'entraînement, capable de communiquer une vitesse constante à la partie mobile jusqu'à la rupture ;
- Un indicateur de charge permettant le mesurage de la force appliquée.

3.3.1) Analyse des résultats des essais de traction circonférentielle du tube (90)₄

L'évolution des courbes de la contrainte en fonction de la déformation des essais split-disc contient deux parties linéaires avec une zone de transition, la première ayant une pente beaucoup plus faible en comparaison avec la deuxième (Figures 3.4, 3.5 et 3.6). La courbe reste pratiquement linéaire jusqu'à la contrainte maximale (ultime) par rapport à la déformation, après quoi le comportement devient non linéaire due aux plusieurs mécanismes d'endommagement conduisant à la rupture brutale de l'éprouvette.

La comparaison des trois tests des tubes ayant pour empilement (90)₄, présenté dans la figure 3.7, se caractérise par une dispersion aussi bien dans la rigidité que dans la contrainte et la déformation ultime.

Les modules de Young des trois tests ont été déterminés dans la partie linéaire de la deuxième pente des courbes contrainte/déformation en utilisant le logiciel Excel avec un coefficient de corrélation très élevé et les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau 3.2. Les principales caractéristiques mécaniques à savoir la contrainte et la déformation ultime ainsi que le module de Young ont été déterminées avec leurs valeurs moyennes ainsi que leurs écarts-types.

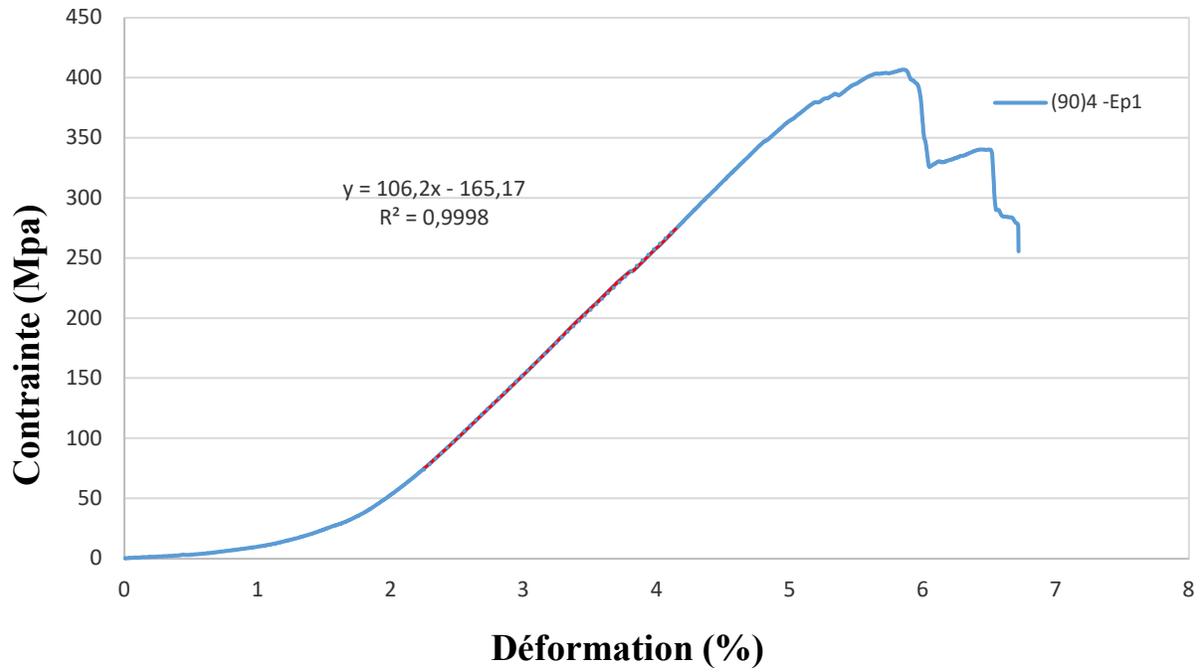


Figure 3.4 : Essai de Traction circonférentielle pour le tube (90)₄ éprouvette 1.

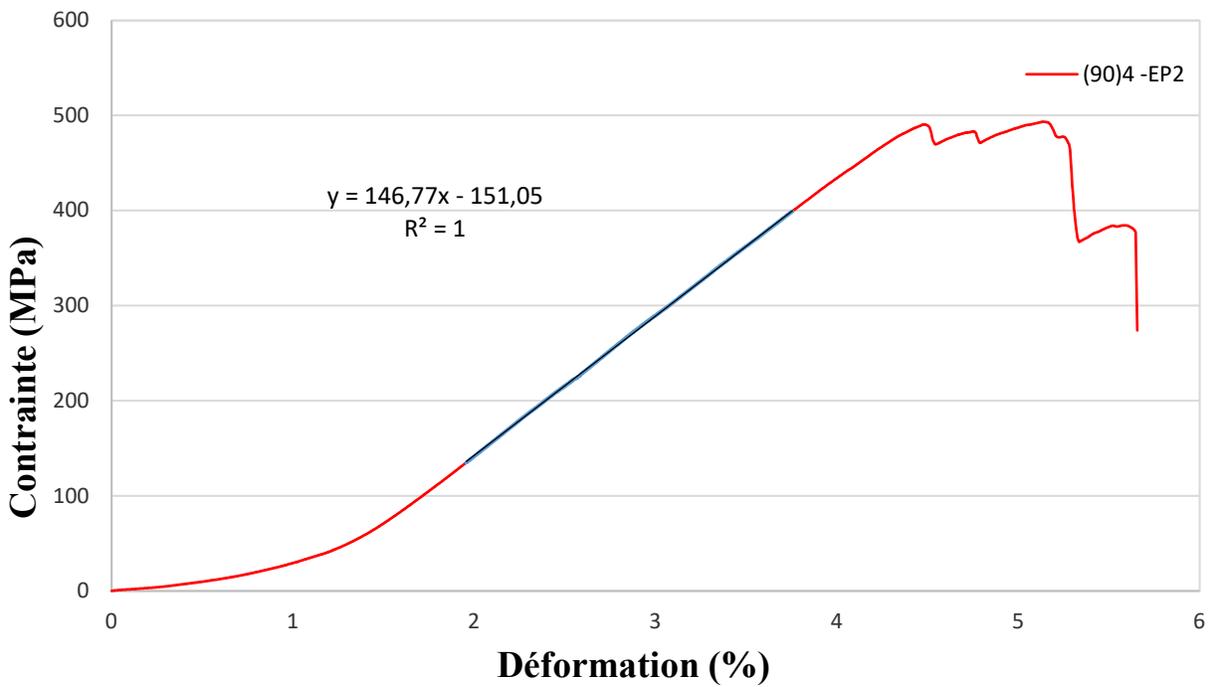


Figure 3.5 : Essai de Traction circonférentielle pour le tube (90)₄ éprouvette 2.

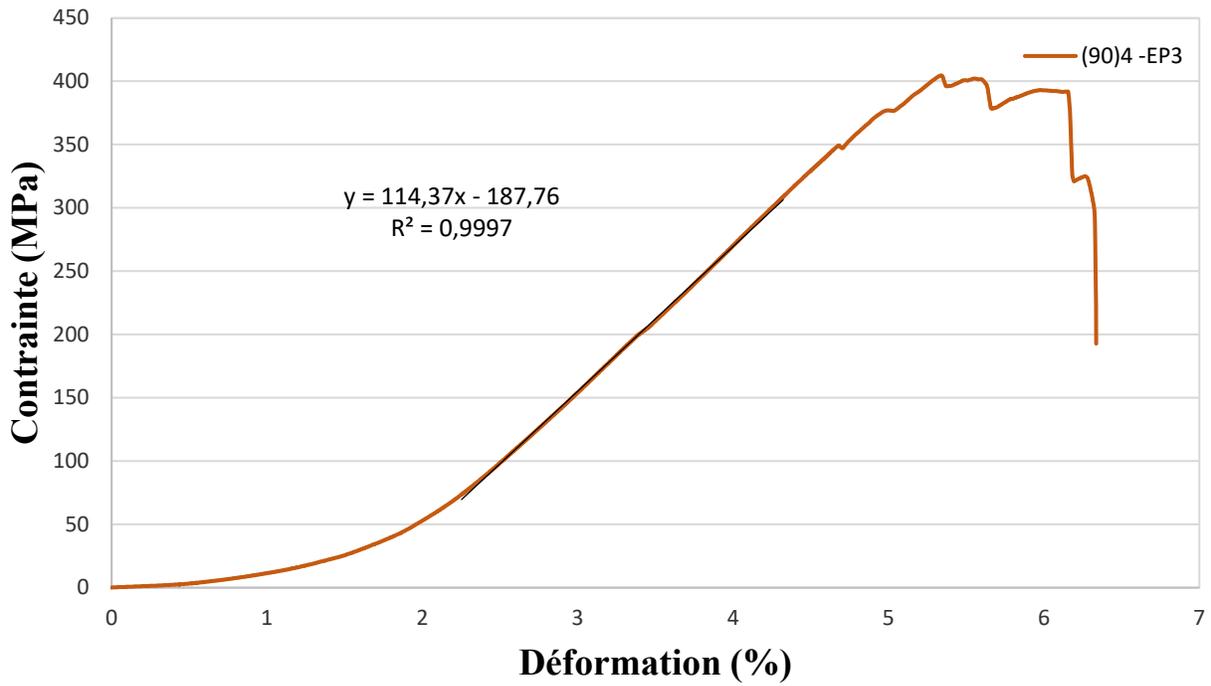


Figure 3.6 : Essai de traction circonférentielle pour le tube (90)₄ éprouvette 3.

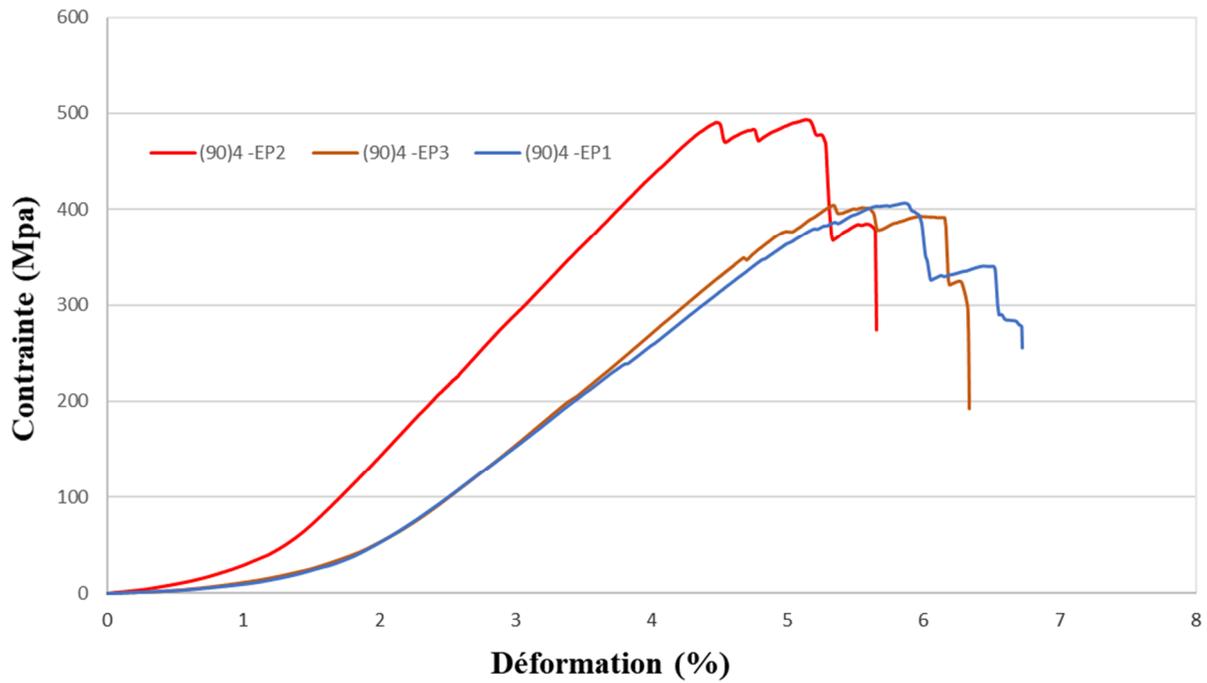


Figure 3.7 : Comparaison entre les éprouvettes des essais split-disc des tubes (90)₄.

Tableau 3.2 : Résultats des essais de Traction circonférentielle du stratifié (90)₄.

Tube	σ (Mpa)	σ_{moy} (Mpa)	ε (%)	ε_{moy} (%)	E (MPa)	E_{moy} (MPa)	R ²
(90) ₄ EP1	406,90	435,0 ± 41,3	6,72	6,24 ± 0,44	106,20	122,44 ± 17,52	0,9998
(90) ₄ EP2	493,40		5,66		146,77		1
(90) ₄ EP3	404,80		6,34		114,37		0,9997

L'analyse de trois courbes contrainte/déformation pour l'essai split-disc des tubes (90)₄ montre que les éprouvettes 1 et 3 sont très similaires, alors que l'éprouvette 2 possède de meilleures propriétés mécaniques c'est-à-dire une contrainte ultime et un module de Young plus élevés avec la déformation la plus faible. Les valeurs moyennes de la contrainte et de la déformation ultimes ainsi que le module de Young sont adoptés comme les valeurs caractéristiques de la résistance en traction circonférentielle du tube composite (90)₄.

3.3.2) Analyse des résultats des essais de traction circonférentielle du tube (90/±55)_s

L'évolution des courbes de contrainte/déformation des essais split-disc des différentes éprouvettes tube composites ayant comme empilement (90/±55)_s sont presque similaires à celles déjà observées dans le cas de tube (90)₄ (Figures 3.8, 3.9 et 3.10). Le comportement contrainte-déformation, débute par un comportement linéaire avec une faible pente, suivi par une zone de transition, puis un comportement linéaire mais avec une rigidité beaucoup plus élevée jusqu'à 90 à 95% de la contrainte ultime. Enfin la rupture brutale des éprouvettes se produit une fois la contrainte ultime est atteinte. Ce type de rupture est une caractéristique des matériaux composites notamment ceux renforcés par des fibres de verre.

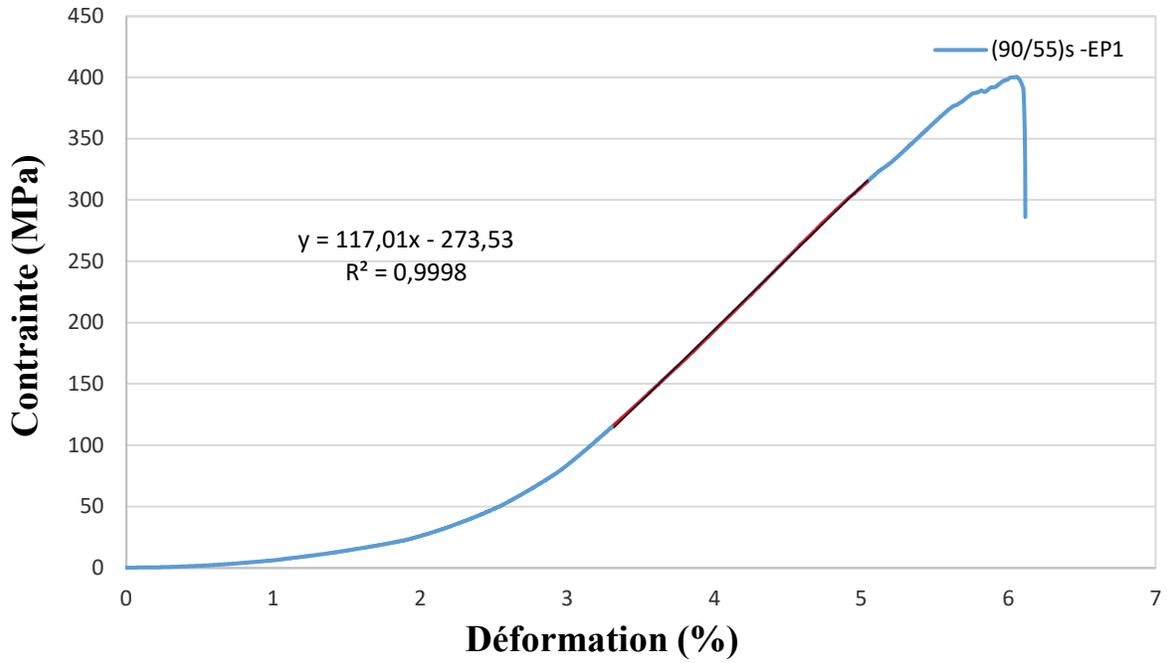


Figure 3.8 : Essai de traction circonférentielle du tube (90/±55)s éprouvette 1.

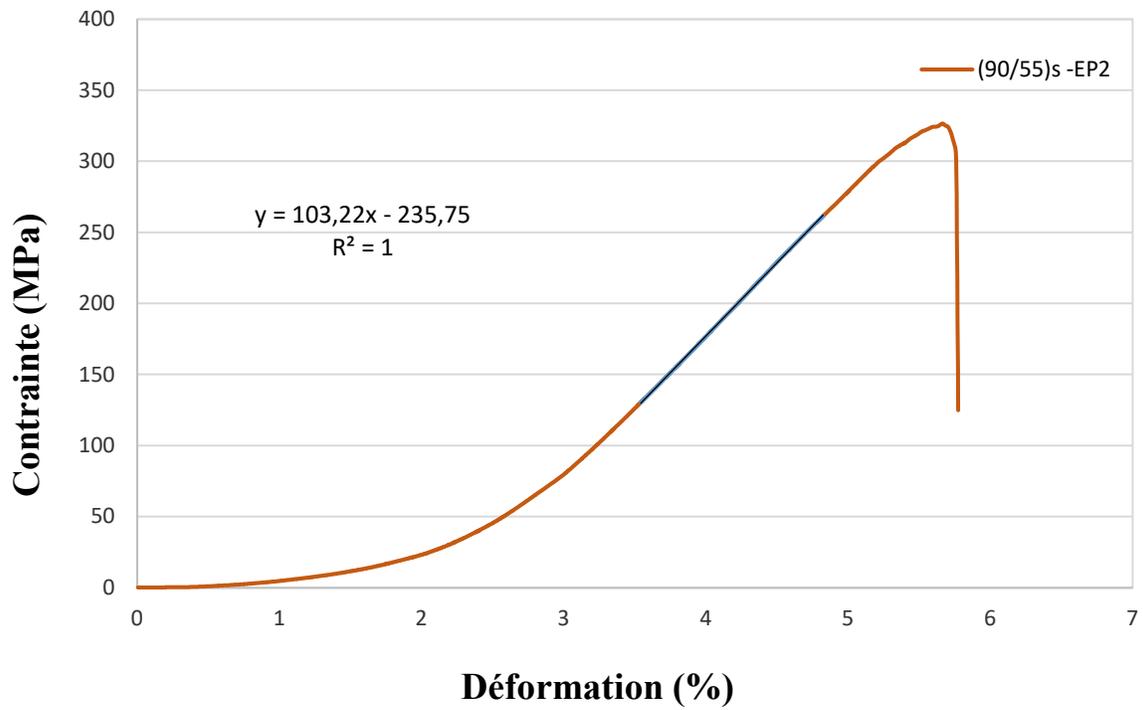


Figure 3.9 : Essai de Traction circonférentielle du tube (90/±55)s éprouvette 2.

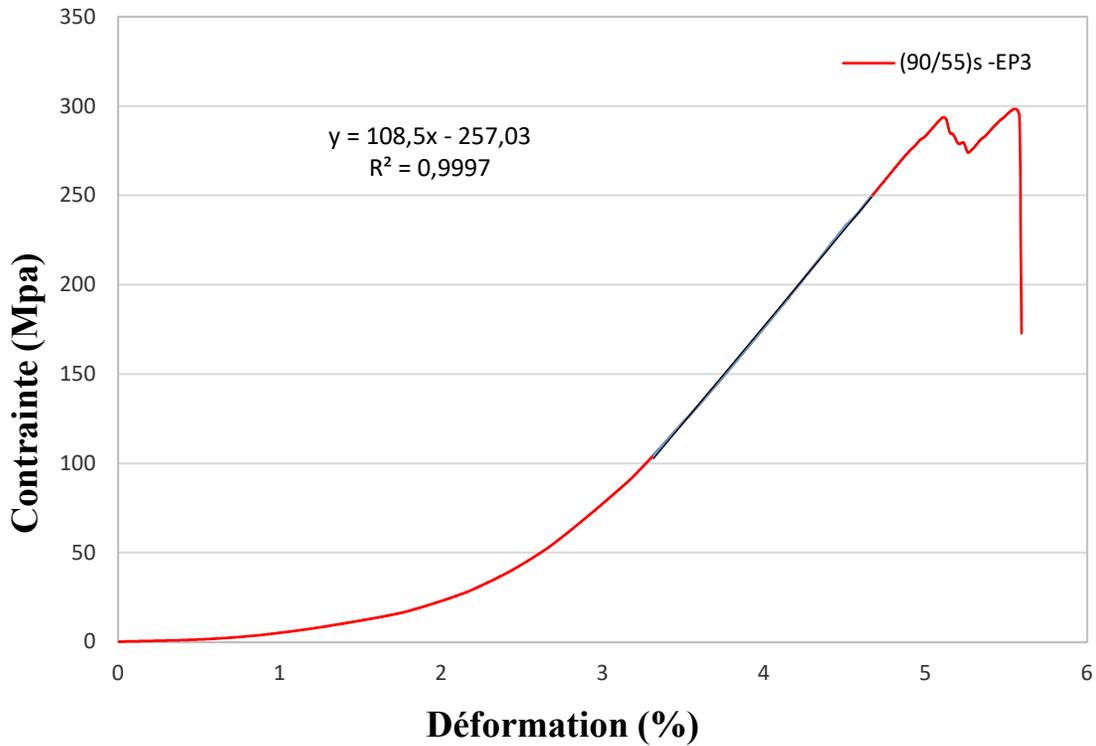


Figure 3.10 : Essai de Traction circonférentielle du tube (90/±55)s éprouvette 3.

La comparaison des trois tests des tubes (90/±55)s montré dans la Figure 3.11 présente que les éprouvettes 2 et 3 sont très similaires et possèdent pratiquement le même comportement et rigidité. Tandis que, l'éprouvette 1 a la rigidité la plus élevée ainsi qu'une contrainte à l'ultime supérieure d'environ 20% par rapport à l'éprouvette 2. Ces différences sont généralement dues aux procédés de fabrication des tubes et aussi qu'à la découpe des éprouvettes notamment la partie ronde.

Les modules d'élasticité de la traction circonférentielle ont été déterminés par un fitting, avec un coefficient de corrélation qui a été très élevé, de la partie linéaire de la deuxième pente des courbes contrainte/déformation. Les principales caractéristiques mécaniques, les contraintes et les déformations ultimes, modules de Young, leurs valeurs moyennes ainsi que leurs écarts type ont été déterminés et sont récapitulés dans le tableau 3.3.

Les valeurs moyennes de la contrainte et la déformation ultime ainsi que le module de Young sont considéré comme les valeurs caractéristiques de résistance des tubes (90/±55)s sollicité en traction circonférentielle.

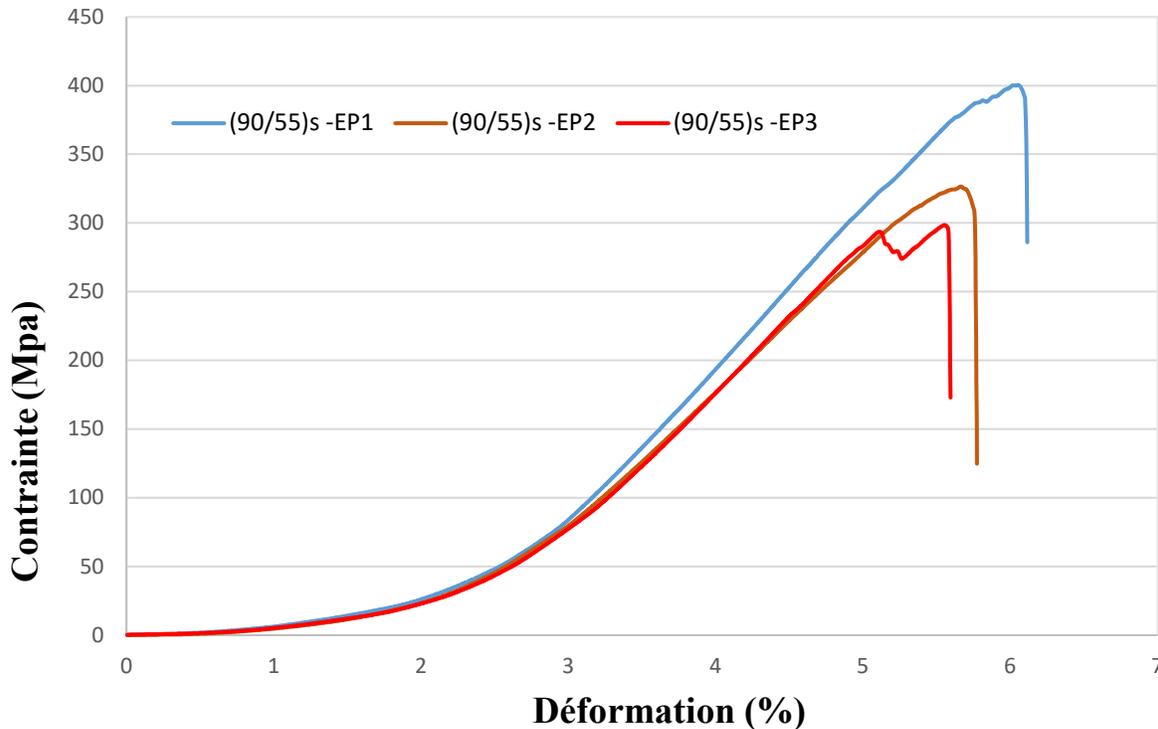


Figure 3.11 : Comparaison entre les trois éprouvettes (90/±55)s sollicités en traction circonférentielle.

Tableau 3.3 : Résultats des essais de Traction circonférentielle du stratifié (90/±55)s.

Tube	σ (Mpa)	σ_{moy} (Mpa)	ϵ (%)	ϵ_{moy} (%)	E (MPa)	E_{moy} (MPa)	R^2
(90/±55)s EP1	400,60	341,90 ± 43,06	6,114	5,83 ± 0,22	117,01	109,58 ± 5,68	0,9998
(90/±55)s EP2	326,60		5,774		103,22		1
(90/±55)s EP3	298,50		5,593		108,50		0,9997

Il est important de noter aussi que les caractéristiques mécanique moyennes des tubes composite (90)₄ sont plus élevés que ceux des (90/±55)s, ceci est due à l'orientation des fibres. En d'autres termes, les fibres orientées à 90 degrés sont dans le sens de la sollicitation, alors que ceux à ±55 provoque un effet de cisaillement.

3.3.3) Endommagement des tubes sollicités en traction circonférentielle

L'analyse des faciès de rupture montre que les tubes composites $(90)_4$ se rompent par rupture des fibres (Figure 3.12a), alors que les tubes $(90/\pm 55)_s$ se détériorent par la rupture des fibres orientées à 90 degrés avec un effet de cisaillement pour ceux orientées à ± 55 (Figure 3.12b).

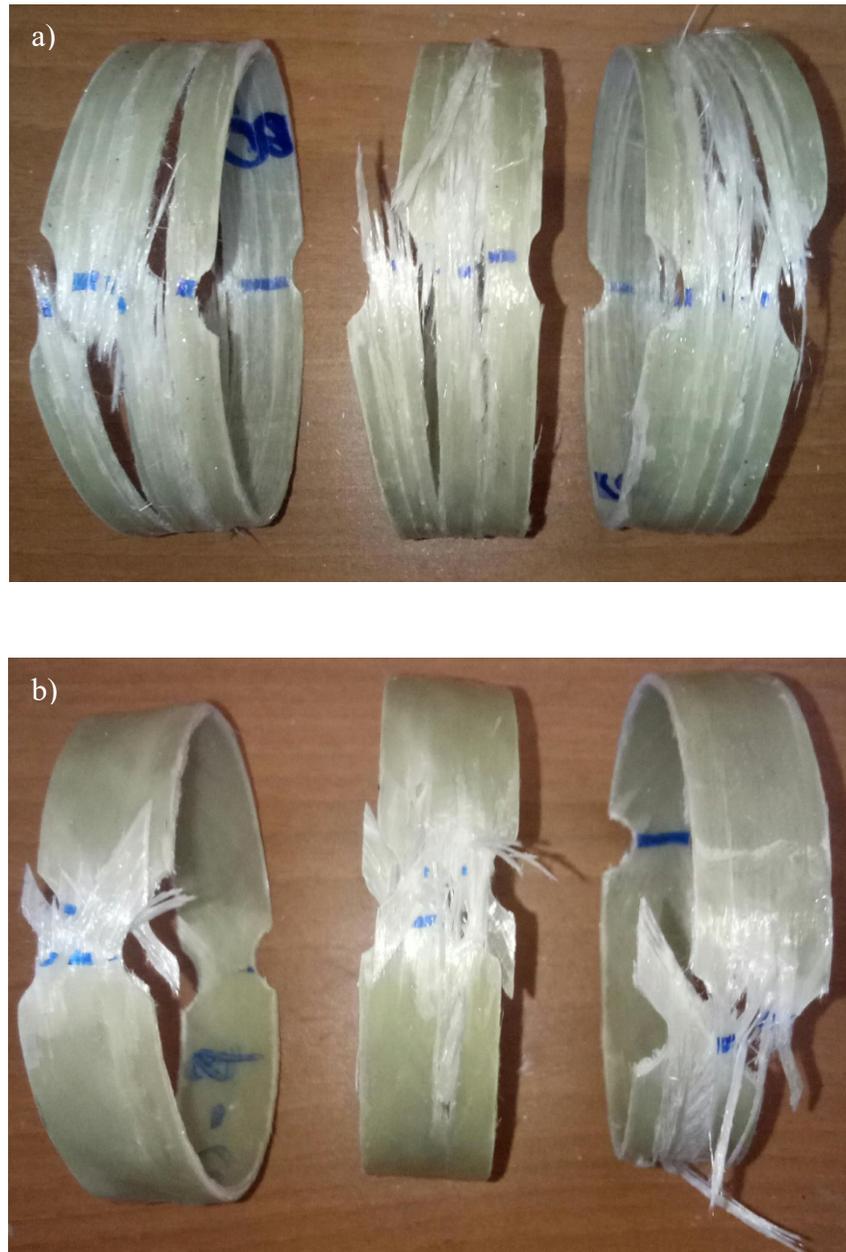


Figure 3.12 : Faciès de rupture des tubes composites sollicités en traction circonférentielle :

a) tube $(90)_4$

b) tube $(90/\pm 55)_s$.

Conclusions

En somme de tous les résultats des tests obtenus et discutés dans ce chapitre, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les (Tableau 3.1) et (Figure 3.3) montrent que le tube $(90)_4$ a une meilleure rigidité entre les deux tubes élaborés, car il a le module de Young le plus fort entre les deux. Ceci est grâce aux plis qui ont une orientation de 90° . Les couches de $\pm 55^\circ$ n'ont pas une bonne performance dans ce cas.
- Les (tableaux 3.2 et 3.3) montrent que l'angle d'enroulement des tubes a un certain effet sur la résistance σ , et l'angle d'enroulement $\pm 55^\circ$ n'est pas très efficace dans la résistance de la traction circonférentielle σ en comparaison avec le tube de $(90)_4$. Alors les enroulements de 90° sont les plus efficaces pour résister la traction circonférentielle σ grâce à la direction de ses fibres étant à la même direction de la force appliquée.
- Depuis les figures Figure 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9 et 3.10 l'angle d'enroulement a aussi un effet sur le module d'élasticité E du matériau dans le cas de traction circonférentielle. Le tube $(90)_4$ grâce à ses enroulement de 90° a un module d'élasticité plus important que le tube $(90/\pm 55)_s$, Alors il est possible de déduire que dans le cas où les fibres sont orientées dans la même direction que la force appliquée, le composite devient plus rigide.
- Les tubes présentent des performances différentes en fonction de la direction de la force appliquée. Ceci est en raison d'une caractéristique principale des matériaux composites en générale, qui montre qu'un matériau composite donne des performances maximales si la force appliquée est à la même direction du renfort.

*Conclusion
générale*

Les tubes en matériaux composites à renfort en fibre de verre ont des plusieurs caractéristiques mécaniques plus performants que les matériaux homogènes conventionnels. Ils présentent des avantages bien adaptés aux certaines industries qui exigent des propriétés spécifiques de ces matériaux, comme la légèreté, la rigidité, et la résistance à la corrosion.

Dans ce travail, deux types de tubes verre/époxy ont été élaborés dans le but de les caractériser en rigidité et en traction circonférentielle. Chacun de ces tubes est composé de quatre plis, le premier ayant les orientations des fibres (90_4) , et l'autre $(90//\pm 55)_s$ est composé de deux couches externes à 90° par contre ces deux plis internes sont orienté à $\pm 55^\circ$ afin d'avoir un stratifié symétrique et équilibré.

L'élaboration et la caractérisation mécanique des tubes permettent de tirer les principales conclusions :

- La technique d'enroulement filamenteuse utilisé pour l'élaboration des tubes composite, utilisé dans ce travail, permet une grande productivité avec une bonne précision (qualité) des pièces produites ;
- Les essais mécaniques de rigidité et de traction circonférentielle ont été effectués selon les normes ASTM D2412, et ASTM D2290 sur des éprouvettes découpées à partir des tubes élaborés ;
- Les caractéristiques mécaniques moyennes des tubes en été déterminé dans le but de montré le tube possédant les meilleures performances des tubes composites ;
- L'orientation des fibres influe sur les performances mécaniques des tubes. En effet, les tubes $(90)_4$ ayant les fibres des quatre plis orientées de 90° sont plus efficaces à résister bien à la traction circonférentielle et possèdent un module de Young plus élevé par rapport à ceux $(90//\pm 55)_s$.
- Un matériau composite présente généralement des performances maximales si son renfort a la même orientation que la force appliquée.

*Références
bibliographiques*

- [1] Berthelot J. M. Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures. 5^{ème} édition TEC & DOC, 2010.
- [2] Mezali amine, Talahari rabah (2016). Elaboration et caractérisation des tubes composites par enroulement filamentaire. Mémoire de master, Université M'hamed Bougara Boumerdes.
- [3] Boudenne Abderrahim (2003). Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques de matériaux composites à matrice polymère. Thèse de doctorat, Université PARIS XII.
- [4] Djebloun, Youcef (2004) ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES. Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra.
- [5] Bakhouche Bouchra, Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statiques. Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [6] Soualah Sarra (2018). Amélioration des Performances d'un Matériau Composite Stratifié Biomécanique chargé de granulés de noyaux de dattes. Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [7] Fenniche Loubna, Stambouli Chahrazed (2019). Optimisation d'un réservoir sous pression type IV en matériaux composites. Mémoire de master, Université Saad Dahlab Blida 1.
- [8] C.A.R.M.A « glossaire des matériaux composites » actualisation octobre 2006.
- [9] D. Gay, Matériaux composites. 5^{ème} édition ed 2005.
- [10] Rekibi Fares Mohammed Laid (2016). Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux composites. Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider Biskra.
- [11] Ibrahim Georgina (2017). Comportement hygromécanique de tubes composites obtenus par enroulement filamentaire en immersion et soumis à différentes températures. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- [12] Ghouaoula Abdelhamid (2011). Simulation du comportement mécanique de la partie cylindrique d'un réservoir de stockage d'hydrogène soumis à un chargement quasi statique. Mémoire de magister, Université de Hassiba Benbouali Chlef.
- [13] P. Jeannetaud (1995). Etude paramétrique du comportement de coudes en composite sous pression interne : Prévision et mécanismes d'endommagement. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille France.
- [14] Cheng, S., Feng, P., Meng, X., Li, Z., & Du, J. (2020). Compression behavior of large-scaled cylindrical GFRP chimney liner segments. *Composite Structures*, 232, 111543.
- [15] José Humberto S. Almeida Jr, Marcelo L. Ribeiro, Volnei Tita, Sandro C. Amico. Damage and failure in carbon/epoxy filament wound composite tubes under external pressure: Experimental and numerical approaches. *Materials and Design* 96 (2016) 431–438.

- [16] Perillo, G., Vacher, R., Grytten, F., Sørbø, S., & Delhaye, V. (2014). Material characterisation and failure envelope evaluation of filament wound GFRP and CFRP composite tubes. *Polymer testing*, 40, 54-62.
- [17] Almeida Jr, José Humberto S., et al. "Damage modeling for carbon fiber/epoxy filament wound composite tubes under radial compression." *Composite Structures* 160 (2017) : 204-210.
- [18] Özbek, Ö., Bozkurt, Ö. Y., & Erklığ, A. (2019). An experimental study on intraply fiber hybridization of filament wound composite pipes subjected to quasi-static compression loading. *Polymer Testing*, 79, 106082.
- [19] G.L. Farley, R.M. Jones, Crushing characteristics of continuous fiber-reinforced composite tubes, *J. Compos. Mater.* 26 (1) (1992) 37–50, <https://doi.org/10.1177/002199839202600103>.
- [20] G.L. Farley, Relationship between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes, NASA Technical Paper, 1992.
- [21] Z. Xin, Y. Duan, J. Zhou, H. Xiao, Effect of tailored plies on the energy absorption capability of square CFRP tubes with discontinuous fibers, *Compos. Struct.* 209 (2019) 150–159, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.010>.
- [22] *ASTM D2412-02*. Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading; 2008.
- [23] Baali Brahim (2016). Etude théorique et expérimentale de la rupture des tuyaux PRV fabriqué par enroulement filamentaire. Mémoire de master, Université Mohammed Boudiaf M'sila.
- [24] *ASTM D2290-92*. Standard test method for apparent tensile strength of ring or tubular plastics and reinforced plastics by split disk method; 1992.