

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

**Ecole Nationale Polytechnique**



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en  
génie des matériaux

***Elaboration et caractérisation mécanique  
d'un composite par enroulement  
filamentaire avec un renfort naturel***

Réalisé par : - Massinissa IDIR

- Imad ZEMOURI

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

- M. Djamel KARI

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	M. Mohamed CHITROUB	Professeur	ENP Alger
Rapporteur/ Promoteur	M. Abd El Madjid KASSER	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP Alger
Examineur	M. Mohamed Lamine DJEGHLAL	Professeur	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 projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en  
génie des matériaux

***Elaboration et caractérisation mécanique  
d'un composite par enroulement  
filamentaire avec un renfort naturel***

Réalisé par : - Massinissa IDIR

- Imad ZEMOURI

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

- M. Djamel KARI

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	M. Mohamed CHITROUB	Professeur	ENP Alger
Rapporteur/ Promoteur	M. Abd El Madjid KASSER	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP Alger
Examineur	M. Mohamed Lamine DJEGHLAL	Professeur	ENP Alger

## **Remerciements**

*En premier lieu, Nos vifs remerciements et profondes gratitude à DIEU tout puissant qui nous a comblé des bienfaits de l'Islam et de la science.*

*C'est pour nous un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui nous 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 notre promoteur, le Docteur KASSER Kasser Abd El Madjid de l'Ecole Polytechnique d'Alger, trouve ici notre profonde gratitude pour ses précieux conseils, aide, orientation et disponibilité.*

*Nous voudrions exprimer nos remerciements ainsi que notre profonde gratitude à notre co-promoteur, le docteur « Kari Djamel el dine » qui nous à accorder sa confiance en nous permettons d'apprendre notre projet fin d'études dans son atelier à « Haïzer willaya de Bouira ». Il a été un grand secours et une aide pour nous dans la réalisation de ce travail.*

*Nous tenant plus particulièrement à remercier la direction de l'entreprise MAGHREB PIPE Msila Algérie de leur collaboration positive en fournissant l'accès a l'atelier de préparation des échantillons pour les essais, et en particulier Monsieur BAALI Brahim, Directeur de l'usine pour son accueil et son accompagnement durant le déroulement de nos essais effectuer au sein du laboratoire de l'usine.*

*On voudrais remercier aussi nos enseignants et ceux parmi eux qui ont accepté d'être membre du jury.*

*On tien enfin à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, à réaliser notre travail.*

# Dédicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut. . .  
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la  
reconnaissance. . Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce projet de fin d'étude....*

*A mes chers parents*

*Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient- elles ne sauraient exprimer ma  
gratitude et ma reconnaissance. Vous avez su m'inculquer le sens de la  
Responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.  
Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de  
mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le tout  
puissant, vous préserve, vous accorde santé, et bonheur.*

*A mes adorables sœurs : Hadjira et Loubna ainsi que mon cher frère : Roujdi  
Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre  
tendresse.*

*Et à tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

**I.ZEMOURI**

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

*A mes frères et sœurs.*

*À ma grande famille.*

*À tous mes enseignants.*

*À tous mes amis.*

*Pareillement ne sont pas oubliés ceux qui ont de près ou de loin  
contribuer à notre formation.*

**M.IDIR**

## 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 realised is a conceptual study for the elaboration of composite pipes by filament winding. This technique is used in various fields (automobile industry, aeronautics, aerospace, military industry, piping ...).

The composite pipes are elaborated in 2 different thickness using reinforcing jute fiber and epoxy matrix with different winding angles of the fibers.

In traction, small thickness pipes have the highest Young's modulus. We also deduce that the pipes elaborated with angles 55°-60° are the most performant 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 différents domaines (industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, industrie militaire, canalisation 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.

En traction, les tubes de petite épaisseur ont le module de Young le plus élevé. On déduit aussi que les tubes élaborée avec un angle 55°-60° sont les plus performants par rapport aux autres.

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

# Sommaire

Liste des figures	
liste des tableaux	
Introduction générale.....	13

## *Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites*

<b>I. Généralités sur les matériaux composites :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.1.Introduction :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.2.Matériaux composite :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.2.1.Classification des matériaux composites :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.2.2.Matrice :</b> .....	<b>17</b>
<b>I.2.2.1.Résine thermodurcissable :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.2.2.2.Résines thermoplastiques :</b> .....	<b>20</b>
<b>I.2.3.Renforts :</b> .....	<b>21</b>
<b>I.2.3.1.Formes linéiques :</b> .....	<b>22</b>
<b>I.2.3.2.Formes surfaciques :</b> .....	<b>22</b>
<b>I.2.4.Les charges :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.3.Fibre naturelle :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.3.1. Introduction :</b> .....	<b>24</b>
<b>I.3.2. Extraction :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.3.3.Jute :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.3.3.1.La plante :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.3.3.2.Fibre de jute :</b> .....	<b>27</b>
<b>I.3.3.3.Traitements des fibres :</b> .....	<b>28</b>
<b>I.4.Les résines époxyde :</b> .....	<b>29</b>
<b>I.4.1.Composition chimique :</b> .....	<b>29</b>
<b>I.4.2.Propriétés mécaniques des résines époxyde :</b> .....	<b>30</b>
<b>I .5. Mise en forme de matériaux composites :</b> .....	<b>31</b>
<b>I .5.1. Moulage au contact :</b> .....	<b>31</b>
<b>I .5.2. Moulage par projection simultanée :</b> .....	<b>31</b>
<b>I .5.3. Moulage sous vide :</b> .....	<b>32</b>
<b>I .5.4. Moulage par injection de résine ou RTM :</b> .....	<b>32</b>
<b>I .5.5. Moulage par pultrusion :</b> .....	<b>33</b>
<b>I .5.6. Moulage par centrifugation :</b> .....	<b>34</b>
<b>I .5.7. Enroulement filamentaire :</b> .....	<b>35</b>

## Sommaire

I.6.Domaine d'utilisation des matériaux composite : .....	35
I.7.Conclusion : .....	35

### Chapitre II :

### Enroulement filamentaire

II. L'enroulement filamentaire : .....	37
II.1.Introduction : .....	37
II.2.Historique : .....	37
II.3. Procédés d'Enroulement filamentaire : .....	39
II.3.1.Enroulement hélicoïdal : .....	39
II.3.2.Enroulement circonférentiel : .....	41
II.3.3.Enroulement Polaire : .....	42
II.4. Matériels : .....	43
II.4.1.Mandrins : .....	45
II.4.2.Applications : .....	46
II.4.3. Avantages et Inconvénients : .....	46
II.4.Conclusion : .....	47

### Chapitre III :

### Machine d'enroulement filamentaire

III. Machine d'enroulement filamentaire: .....	49
III.1.Introduction : .....	49
III.2.Présentation de la machine : .....	49
III.2.1.Chaine cinématique de la machine : .....	50
III.2.2.Schéma descriptif de la machine : .....	51
III.2.3.Les différentes parties mécaniques de la machine : .....	52
III.2.4.Fonctionnement de la machine : .....	53
III.2.5.Angle d'enroulement : .....	55
III.2.5.Relation entre les différents paramètres (angle, vitesse de rotation du mandrin, vitesse de rotation de la IIIs) : .....	56
III.3.Conclusion : .....	56



<b>IV. Elaboration et caractérisation des tubes :</b>	<b>58</b>
<b>IV.1.Introduction:</b>	<b>58</b>
<b>IV.2.caracterisation des fibres et de la résine :</b>	<b>58</b>
<b>IV.3. Élaboration des tubes :</b>	<b>60</b>
<b>IV.3.1.Préparation du moule :</b>	<b>60</b>
<b>IV.3.2.Préparation de la résine :</b>	<b>60</b>
<b>IV.3.3.Préparation et calcul des paramètres de la machine :</b>	<b>60</b>
<b>IV.3.3.Angles et paramètres adéquats :</b>	<b>62</b>
<b>IV.3.4.Découpages et préparation des échantillons pour les tests :</b>	<b>62</b>
<b>IV.4.Caracterisation :</b>	<b>65</b>
<b>IV.4.1.Essai de traction circonférentiel :</b>	<b>65</b>
<b>IV.4.1.1.Tracer du graphe moyen pour les 3 essais de traction circonférentiel de chaque tube et détermination de ces paramètres :</b>	<b>66</b>
<b>IV.4.2.Essai de rigidité :</b>	<b>75</b>
<b>IV.4.2.1.Rigidité annulaire spécifique S :</b>	<b>75</b>
<b>IV.4.2.2.Tracer du graphe pour essais de rigidité de chaque tube et détermination de ces paramètres :</b>	<b>77</b>
<b>IV.4.3. Essai de traction :</b>	<b>83</b>
<b>IV.5.Conclusion :</b>	<b>90</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>91</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>92</b>

## Liste des figures

Figure.1 : Principaux procédés.....	14
-------------------------------------	----

### Figures chapitre I

Figure I.1 : Les principaux types de matrices .....	18
Figure I.2 : représente les différents types de renforts .....	21
Figure I.3 : Mono-filaments réunis en mèches .....	22
Figure I.4 : Chaîne et trame d'un tissu .....	23
Figure I.5 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus. ....	23
Figure I.6 : Les différentes sources des fibres végétales. ....	24
Figure I.7 : Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales .....	25
Figure I.8 : Jute: a) variabilité due au caractère naturel, b) variabilité due à la technique de tissage.....	27
Figure I.9 : Influence de nature du traitement (alcaline) et de sa durée (4 et 24 heures) sur le tissu de jute .....	28
Figure I.10 : Observations au MEB des surfaces de rupture du Jute/résine : (a) non traité, (b) traité au silane .....	29
Figure I.11: Principe du moulage au contact.....	31
Figure I.12: Principe du moulage par projection simultanée. ....	32
Figure I.13: Moulage sous vide. ....	32
Figure I.14: Principe du moulage RTM. ....	33
Figure I.15: Principe du moulage par pultrusion.....	34
Figure I.16: Principe du moulage par centrifugation .....	34
Figure I.17: Principe de l'enroulement filamentaire. ....	35

## Liste des figures

### Figures chapitre II

Figure II.1: Richard E.Young, le fondateur de l'enroulement Filamentaire moderne ..	37
Figure.II.2 : Principe d'enroulement hélicoïdal. ....	40
Figure.II.3 : Enroulement hélicoïdal continu. ....	40
Figure.II.4: enroulement hélicoïdal .....	41
Figure.II.5: Principe d'enroulement circonférentiel.....	41
Figure.II.6 : Enroulement circonférentielle .....	42
Figure.II.7 : Principe d'enroulement polaire.....	42
Figure II.8 : L'enroulement polaire .....	43

### Figures chapitre III

Figure III.1: Sous-chaîne cinématique .....	50
Figure III.2: Chaîne cinématique proposée. ....	51
Figure III.3 : Schéma descriptif de la machine. ....	51
Figure III.4: Mécanisme de rotation. ....	52
Figure III.5: Mécanisme de translation.....	52
Figure III.6: Le mandrin avec le moule. ....	52
Figure III.7: Bain de résine. ....	52
Figure III.8: Assemblage de la machine avec « solidworks ».....	53

### Figures chapitre IV

Figure IV.1: Comportement de résine G 35 en traction.....	59
Figure IV.2 : Bac d'imprégnation.....	60

## Liste des figures

Figure IV.3: Réglage des fréquences de translation et de rotation.....	61
Figure IV.4: Fibres passant dans le bain de résine. ....	61
Figure IV.5: La machine en état de marche. ....	62
Figure IV.6:Découpage et préparation des échantillons pour les tests. ....	63
Figure IV.7: les échantillons prêts pour les essais.....	63
Figure IV.8: Essai de traction circonférentiel .....	65
Figure IV.9: Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (50°)...	66
Figure IV.10: Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (55°).	67
Figure IV.11: Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (60°).	68
Figure IV.12: Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (65°).	69
Figure IV.13: Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (75°).	70
Figure IV.14: Comportement à la traction circonférentiel des tubes époxy/Jute .....	71
Figure IV.15: Contrainte de Cisaillement (rupture) circonférentiel des éprouvettes époxy/Jute. ....	72
Figure IV.16: Force maximale des éprouvettes époxy/Jute.....	72
Figure IV.17: Contrainte de cisaillement (rupture) des éprouvettes époxy/Jute .....	73
Figure IV.18: Module de Yong circonférentiel des éprouvettes époxy/Jute.....	73
Figure IV.19: Déformation maximal des éprouvettes époxy/Jute .....	74
Figure IV.20 : (a) Fibres unidirectionnelle, (b) Fibres en tissu.....	74
Figure IV.21 : Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites : lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b). Au lieu d'une rupture brutale, on observe donc une décohésion progressive des constituants. ....	75
Figure IV.22: Essai de compression (rigidité) .....	76
Figure IV.23: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (50°) .....	77
Figure IV.24: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (55°) .....	78
Figure IV.25: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (60°) .....	79
Figure IV.26: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (65°) .....	80

## Liste des figures

<b>Figure IV.27: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (75°)</b> .....	<b>81</b>
<b>Figure IV.28: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (90°)</b> .....	<b>82</b>
<b>Figure IV.29: Rigidité des éprouvettes époxy/Jute</b> .....	<b>83</b>
<b>Figure IV.30: Préparation des éprouvettes</b> .....	<b>83</b>
<b>Figure IV.31: Machine de traction Zwick/Roell</b> .....	<b>84</b>
<b>Figure IV.32: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°)</b> .....	<b>85</b>
<b>Figure IV.33: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°)</b> .....	<b>86</b>
<b>Figure IV.34: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (60°)</b> .....	<b>87</b>
<b>Figure IV.35: Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (65°)</b> .....	<b>88</b>
<b>Figure IV.36: comparaison du module de Young des 4 catégories des tubes a défèrent degré</b> .....	<b>89</b>
<b>Figure IV.37: Comparaison des contraintes maximal des 4 catégories des tubes a défèrent degrés</b> .....	<b>89</b>
<b>Figure IV.38: Comparaison des déformations maximal des 4 catégories des tubes a défèrent degrés</b> .....	<b>90</b>

## Liste des tableaux

### Tableaux chapitre I

Tableau.I.1. : Caractéristique des résines thermoplastiques.....	20
Tableau1.2 : Caractéristiques mécaniques de la fibre (jute).....	29
Tableau1.3 : Caractéristiques mécaniques de la matrice époxy (données à 25°C après cuisson de 8h à 80°C).....	31

### Tableaux chapitre IV

Tableau IV.1 : Architecture des différents tubes réalisés.....	58
Tableau IV.2 : Caractéristiques de la résine.....	59
Tableau IV.3 : Caractéristiques de la résine.....	59
Tableau IV.4 : Caractéristiques des fibres.....	60
Tableau IV.5 : Vitesse de rotation du mandrin et de chariot pour chaque angle. ....	62
Tableau IV.6 : Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (50°).....	67
Tableau IV.7 : Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (55°).....	68
Tableau IV.8 : Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (60°).....	69
Tableau IV.9 : Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (65°).....	70
Tableau IV.10 : Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (75°).....	71
Tableau IV.11 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (50°) .....	77
Tableau IV.12 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (55°) .....	78
Tableau IV.13 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (60°) .....	79
Tableau IV.14 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (65°) .....	80
Tableau IV.15 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (75°) .....	81
Tableau IV.16 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (90°) .....	82
Tableau IV.17 : Paramètres des essais de traction des tubes. ....	89

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.

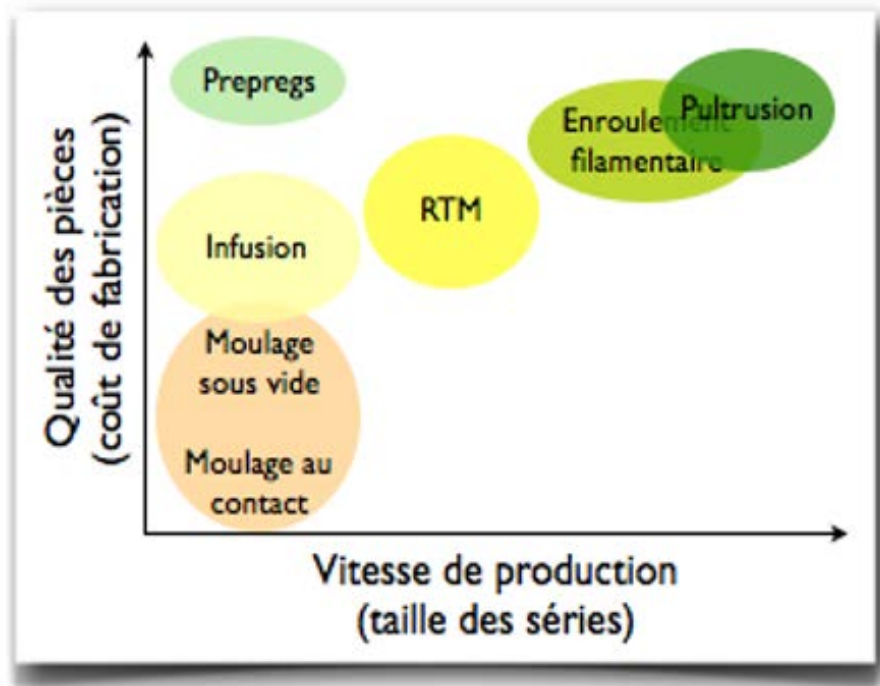
Le choix du procédé de transformation est guidé à la fois par la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable), la forme de la pièce à réaliser, les performances visées, et les impératifs de production en termes de quantité et de qualité.

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 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.

L'importance du procédé d'enroulement filamentaire par rapport aux autres procédés de mise en oeuvre des matériaux composites est mentionnée dans la figure ci-dessous. Cette figure propose un comparatif entre les différents procédés où deux critères sont étudiés: la qualité des pièces (qui va de pair avec les coûts de fabrication) et la vitesse de production (que l'on adapte à la taille des séries). Donc l'enroulement filamentaire est un bon procédé en termes de vitesse de production et qualité des pièces par rapport à d'autres procédés.



**Figure.1** : Principaux procédés.

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

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les matériaux composites, ces éléments constitutants, les différents procédés de mise en forme, ensuite leur domaines d'utilisations.

Le deuxième chapitre est dédié au procédé d'enroulement filamentaire, les différents modèles d'enroulement, les différentes applications de ce procédé.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la machine d'enroulement filamentaire, avec un schéma descriptif des différentes parties de la machine.

Le dernier chapitre porte sur la partie pratique, réalisation et caractérisation du produit.



CHAPITRE I  
GENERALITES SUR LES MATERIAUX  
COMPOSITES

## I. Généralités sur les matériaux composites

### I.1.Introduction

Dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. L'utilisation des matériaux naturels disponibles en Algérie pour le développement de l'industrie des composites est un élément clef, notamment pour répondre aux besoins de l'habitat.

Alors l'importance est de trouver une nouvelle génération des matériaux dite écologique. Qui peuvent remplacer le rôle des matériaux qui sont élaboré dans des conditions néfaste pour l'environnement.

Les matériaux composites sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, où la fonction mécanique reste dominante. Le but qu'on recherche le plus souvent à atteindre en substituant un matériau composite à un matériau traditionnel est d'obtenir, pour une même rigidité de structure, une réduction de masse appréciable, c'est la raison pour laquelle les matériaux composites connaissent un grand essor, dans le domaine aéronautique en particulier.

Notre étude porte sur la conception et la caractérisation d'un nouveau matériau composite à base de jute/époxy. Ce matériau composite est destiné à être utilisé dans les domaines de canalisations, irrigation, aéronautique, armement...etc.

### I.2.Matériaux composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes (matrice, renfort), se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément.

Selon sa classe, chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres. Ainsi en combinant divers types de matériaux normalement non miscibles, et tout en contrôlant leur morphologie et leur répartition, on obtient des matériaux composites, dont les propriétés sont totalement différentes de celles des composants de base [1].

#### I.2.1.Classification des matériaux composites

Le classement de ces matériaux peut se faire de différentes manières, comme détaillé dans ce qui suit :

- **Selon que leurs propriétés mécaniques sont faibles ou élevées :**
  - les matériaux composites dits de "grande diffusion dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série.

- Les matériaux composites dits "hauts performants", présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautiques et dans le spatial.

Il est à noter, néanmoins, que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

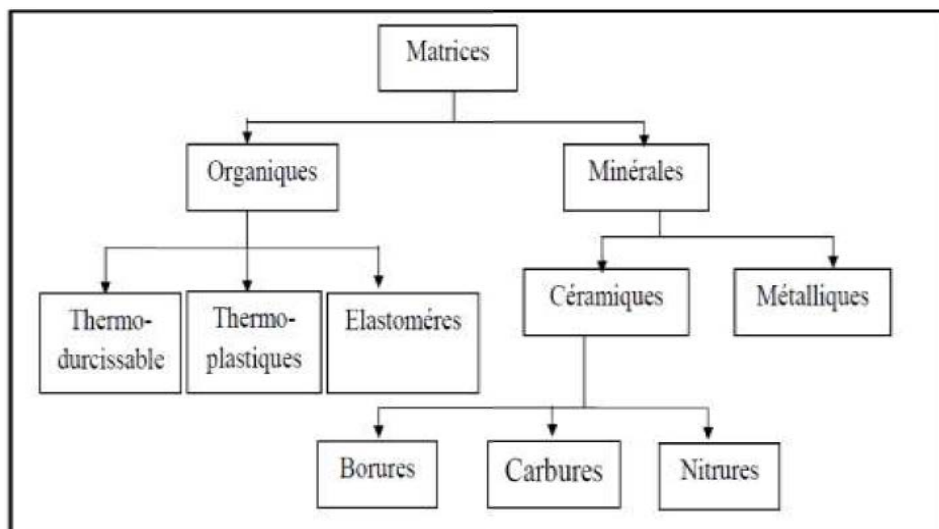
- **Selon la forme de leurs renforts**

- les composites à fibres: constitués de fibres discontinues (fibres coupées ou courtes) ou continues. Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes.
- les composites à particules) : les renforts sont sous formes de particules, généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux, notamment celles de certains métaux (Al, Mg).

### **I.2.2.Matrice**

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. Les principales matrices utilisées sont :

- Les résines polyester peu onéreuses, elles sont généralement utilisées avec les fibres de verre et se retrouvent dans de nombreuses applications de la vie courante.
- Les résines vinylester sont surtout utilisées pour des applications de résistance chimique.
- Les résines époxy possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique.
- Les résines phénoliques utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue au feu imposées par les normes dans les transports civils.
- Les résines thermoplastiques comme le polypropylène ou le polyamide.



**Figure I.1 :** Les principaux types de matrices [2].

### I.2.2.1. Résine thermodurcissable

#### I.2.2.1.1. Résines polyesters

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

- D'un faible coût de production ;
- D'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser ;

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

Masse volumique	1200 Kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge	60 à 100 °C

### Avantage

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé ;
- Une bonne stabilité dimensionnelle ;
- Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus ;
- La facilité de mis en œuvre ;
- Une bonne tenue chimique ;
- Un faible coût de production ;
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

### Inconvénients

- Une tenue médiocre en température : supérieur à 120 °C ;
- Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs ;
- Une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets ;

#### I.2.2.1.2. Les résines époxy

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxy. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5% du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxy, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxy sont les suivantes :

Masse volumique	1100 à 1500 Kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contraintes à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contraintes à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Les résines époxy conduisent donc à un ensemble de performances élevées.

**Avantage**

- De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- Une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu,
- Une excellente résistance chimique,
- Une très bonne mouillabilité des renforts,
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

**Inconvénients**

- Un temps de polymérisation long,
- Un coût élevé,
- La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- Une sensibilité à la fissuration.

**I.2.2.2. Résines thermoplastiques**

La famille des résines thermoplastiques (on parle de " plastiques ") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle, le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et polyamide.

	<b>Polypropylène</b>	<b>Polyamide</b>
<b>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	900	1140
<b>Contrainte à la rupture (MPa)</b>	20-35	60-85
<b>Module d'élasticité (GPa)</b>	1,1-1,4	1,2-2, 5
<b>Température de fléchissement sous charge (°C)</b>	50-60	65-100

**Tableau.I.1. :** Caractéristique des résines thermoplastiques.

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

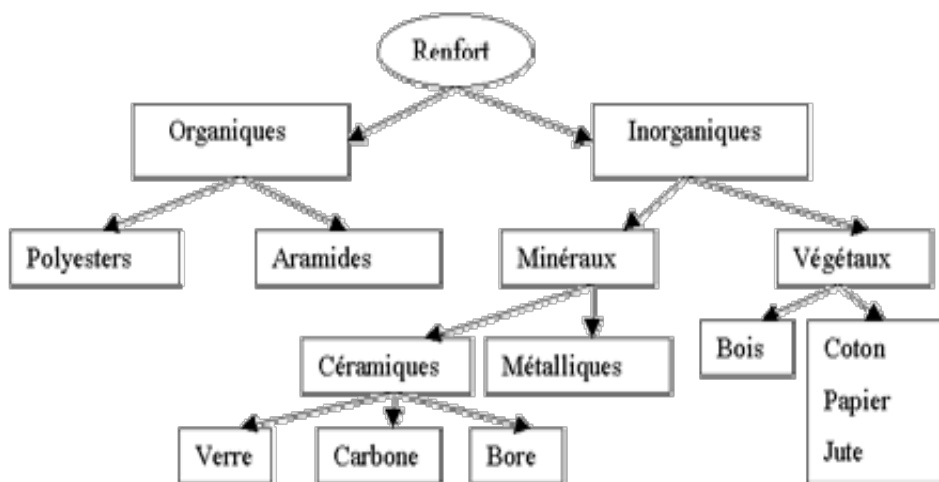
### I.2.3.Renforts

Les renforts confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté...etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques... etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût...etc.

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique...etc. [3].

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.),
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.),
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.),



**Figure I.2 :** représente les différents types de renforts

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.),
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.),
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

### I.2.3.1. Formes linéiques

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres (une dizaine), et ne peuvent par conséquent pas être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. La nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée, et généralement dérivée de celle utilisée pour les fibres de verre.

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou mono-filament. Les mono-filaments sont ensuite réunis en fils ou mèches (Figure I.3). Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique. Cette masse linéique dépend du diamètre et du nombre de mono-filaments.

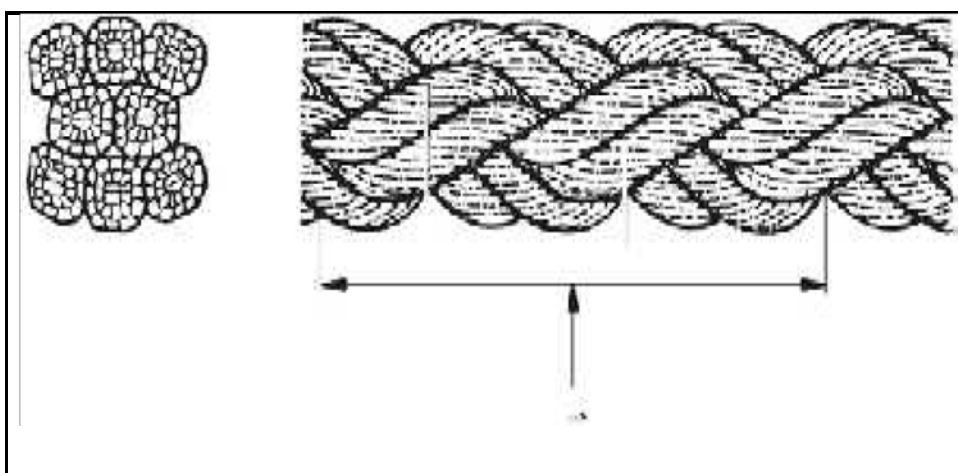


Figure I.3 : Mono-filaments réunis en mèches. [4]

### I.2.3.2. Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

- **Mats**

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

- **Tissus et rubans**

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèche, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué (Figure I.4).

- D'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu.



- D'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

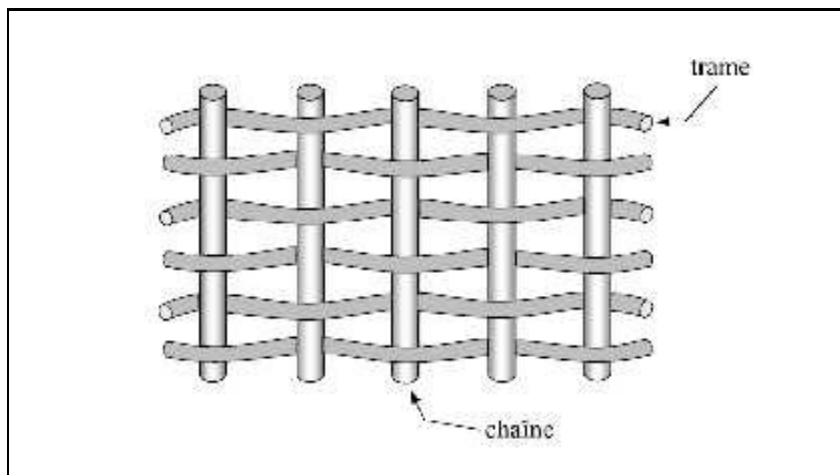


Figure I.4 : Chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaînes et des fils de trames.

La Figure I.5 illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin, armure croisée, armure unidirectionnelle.

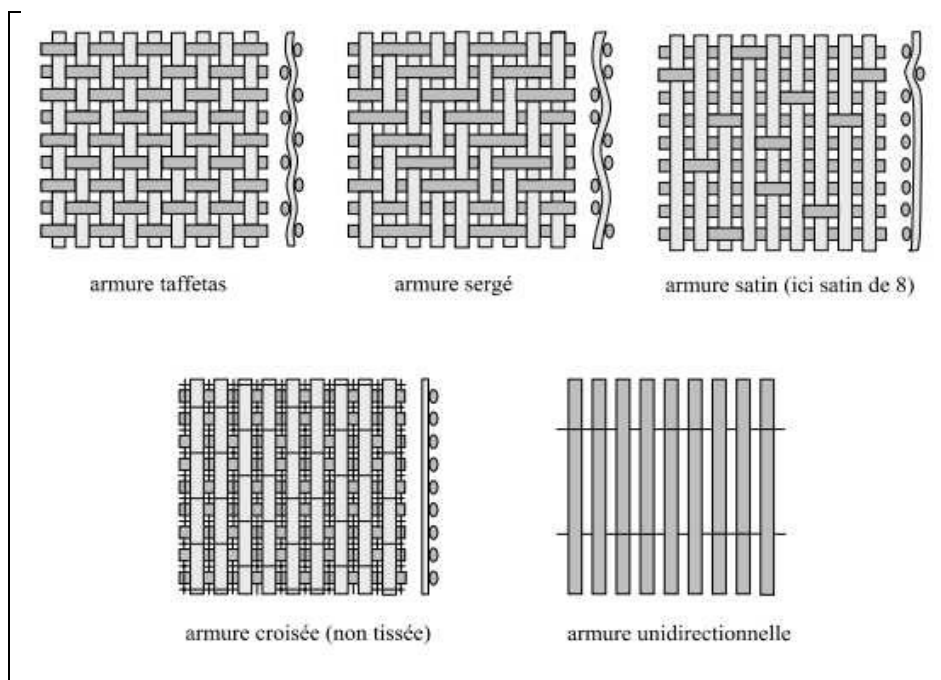


Figure I.5 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus. [4]

### I.2.4. Les charges

- **Charges renforçantes** : l'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine.
- **Charges non renforçantes** : les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

## I.3. Fibre naturelle

### I.3.1. Introduction

Dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique en particulier la présence de métaux lourds, en prenant en considération les enjeux du développement durable vers la mise en valeur et la gestion des ressources renouvelables, les matériaux composites tendent à considérer un caractère écologique à travers l'utilisation de matières naturelles [5].

Les fibres naturelles peuvent être classées en fonction de leurs origines : animales, végétales ou minérales.

- fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie),
- fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco),



Figure I.6 : Les différentes sources des fibres végétales.

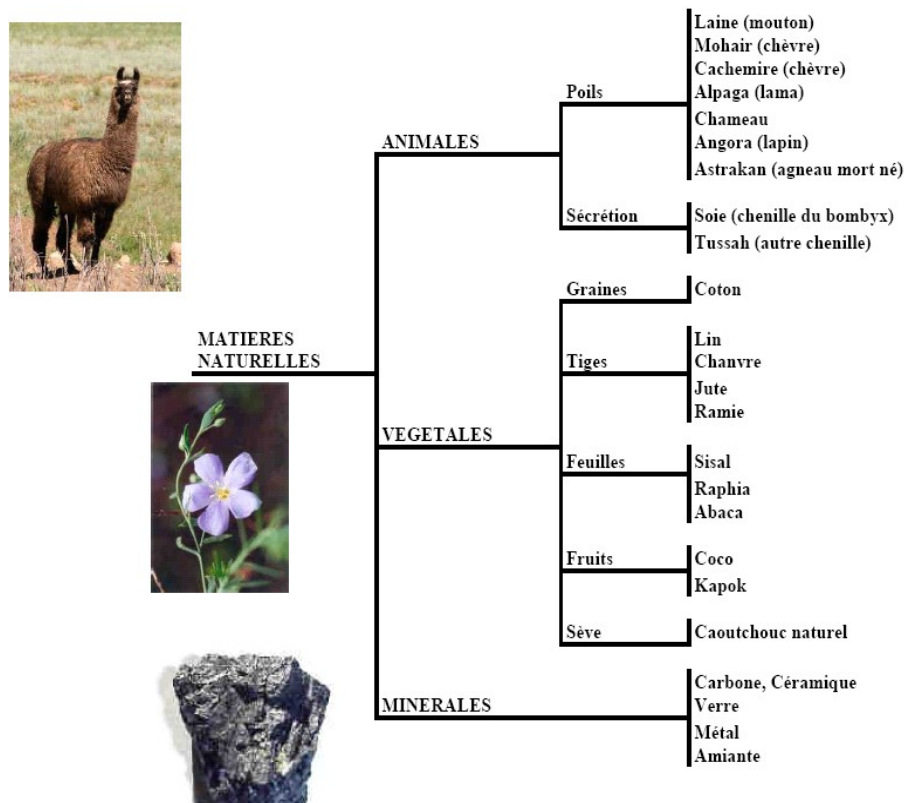


Figure I.7 : Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales.

**Avantage**

Les avantages que représentent ces fibres sont les suivants (Par comparaison avec les fibres de verre) :

- Faible coût.
- Biodégradabilité.
- Ressource renouvelable.
- Demande peu d'énergie pour être produite.
- Bonne isolation thermique et électrique.
- Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).
- Large gamme de variétés disponibles.
- Génération d'emplois dans le monde rural.

**Inconvénients**

- Absorption d'eau.
- Faible stabilité dimensionnelle.
- Mauvaise tenue en vieillissement.

- Faible tenue thermique (200 à 230 °C max).
- Fibres anisotropes.
- Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
- Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock.
- Renfort discontinu.

### I.3.2. Extraction

L'extraction de fibres végétales est un procédé classique. Le filage des fibres nécessite des transformations : extraction et purification la matière première ou brute en une forme filable. Vu la diversité des matières brutes, le procédé d'extraction diffère d'un type à l'autre [6].

Parmi les fibres naturelles que nous venons de voir, et pour des raisons de disponibilité en Algérie grâce à l'importation, nous nous intéressons à l'utilisation de la fibre de jute qui peut être utilisée dans le domaine de la canalisation et l'irrigation...etc. Notre objectif est de valoriser dans les pays peu industrialisés, une ressource locale naturelle qui est le jute, et ainsi, développer un nouveau matériau par le biais d'une technologie accessible prenant en compte les impacts sur l'environnement [7].

### I.3.3.Jute

Surnommé la « fibre d'or », le jute est une des fibres naturelles les plus longues et les plus utilisées. On le retrouve dans divers textiles.

#### I.3.3.1.La plante

Le jute est extrait de l'écorce du jute blanc (*Corchorus capsularis*) et, dans une moindre mesure, de la corète potagère (*C. olitorius*). Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or » en raison de ses reflets. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité (avril/mai-juillet/août).



**Figure I.8 :** Jute: a) variabilité due au caractère naturel, b) variabilité due à la technique de tissage.

Le jute prospère dans les terres tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60 et 90 pour cent. C'est une culture pluviale peu gourmande en engrais et pesticides. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibre sèche par hectare. Le jute est l'une des fibres naturelles les moins chères. Il vient en deuxième position derrière le coton sur le plan des volumes produits comme de la diversité des usages.

### **I.3.3.2.Fibre de jute**

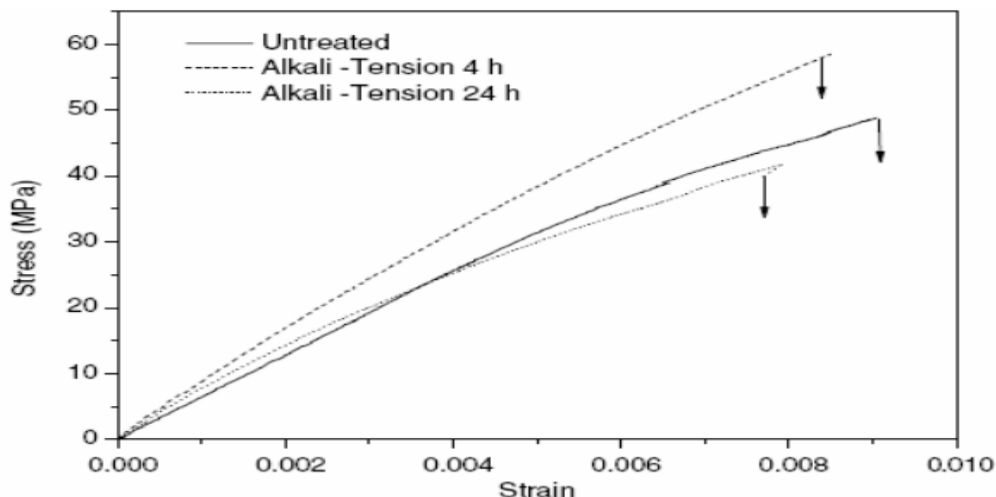
Le jute est une fibre naturelle qui présente des caractéristiques de résistance en traction, avec des propriétés intéressantes en flexion, bien qu'il puisse présenter quelques problèmes de dureté [8]. Le jute composé de fibres naturelles, ses propriétés changent considérablement selon leur structure, en effet, les fibres naturelles se composent de plusieurs cellules formant les micro-fibrilles cristallins (cellulose) reliés ensemble par la lignine et l'hémicellulose amorphes comme couche, ces murs de cellules diffèrent dans leur composition (relation entre la cellulose, la lignine, et l'hémicellulose comme composants les plus importants) et dans l'orientation (angle en spirale) des micro-fibrilles de cellulose par lequel les paramètres structuraux caractéristiques changent d'une fibre naturelle à l'autre [9-10].

La fibre de jute est longue, douce et brillante. Sa longueur va de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois. Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse avec la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. On gratte ensuite la matière non fibreuse, ce qui permet enfin d'arracher les fibres.

### **I.3.3.3.Traitements des fibres**

Les différents types de traitement des fibres naturelles ont pour objectifs primordiaux les points suivants :

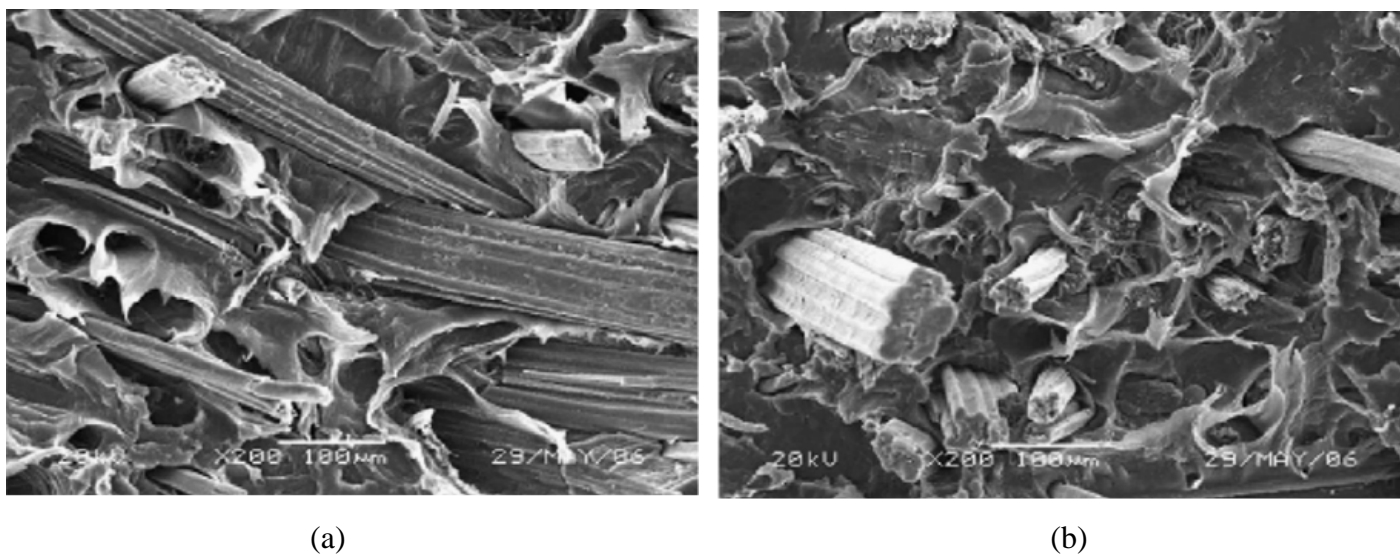
- Améliorer la compatibilité (mouillage / polymère à l'état liquide) et l'adhérence fibre – matrice (résistance inter faciale au cisaillement /polymère à l'état solide) par modification chimique de la surface des fibres afin de créer des liaisons chimiques avec le polymère : utilisation de composés de type silane (hydrophobie), isocyanate, acide carboxylique (adhésion),
- Diminuer le caractère hydrophile des fibres (présence de groupements hydroxydes de la cellulose),
- Augmenter la rugosité de la surface des fibres,
- Améliorer la stabilité dimensionnelle des fibres,
- Améliorer la résistance à la dégradation environnementale.



**Figure I.9 :** Influence de nature du traitement (alcaline) et de sa durée (4 et 24 heures) sur le tissu de jute [11].

Pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques du jute, ainsi que son comportement en milieu humide, il existe plusieurs traitements de fibre ou processus de purification pour les fibres cellulosiques. Plusieurs travaux se sont intéressés aux traitements de surface du jute [7].

L'observation au MEB montre l'influence du traitement à l'alcaline sur l'effet de serrage des tissus jute à l'intérieur de la matrice. Dans le tissu non traité les filés qui composent le jute sont disposés d'une manière aléatoire, ce qui va contribuer à un comportement aléatoire en traction aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame (figure 1.10-a). Dans la figure 1.10-b, le traitement à l'alcaline pendant 4 heures a contribué à rassembler les filés entre eux, ce qui va permettre au renfort de se comporter de manière uniforme en traction [11].



**Figure I.10 :** Observations au MEB des surfaces de rupture du Jute/résine : (a) non traité, (b) traité au silane [12].

### I.3.7. Propriétés mécaniques de la fibre

Fibres	E(Gpa)	A(%)	$\delta_u$ (Mpa)	Densité	Références
Jute	3,6	1,5-1,8	393-773	1,44	[19-20]

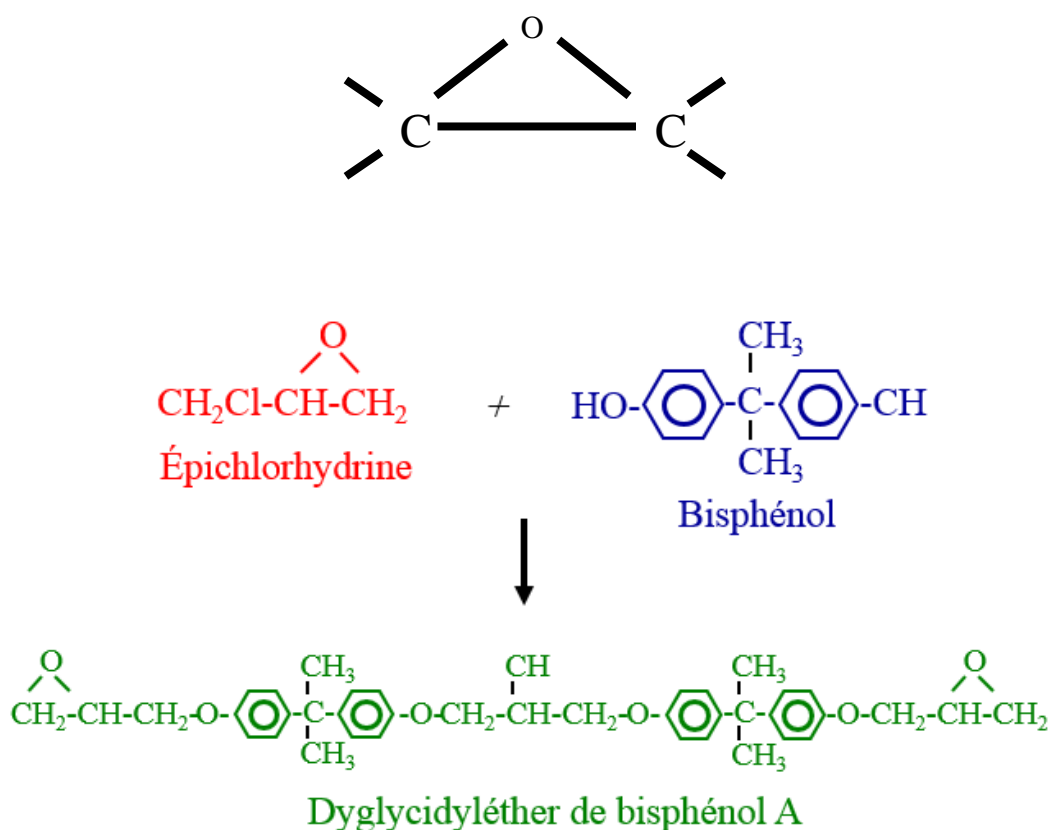
Tableau1.2 : Caractéristiques mécaniques de la fibre (jute).

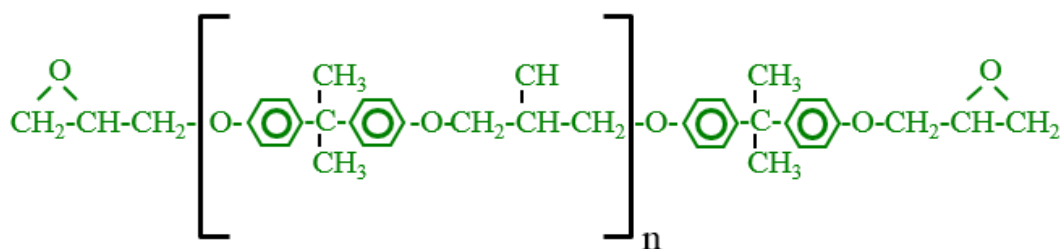
### I.4. Les résines époxy

Les résines époxy furent découvertes presque simultanément à la fin des années 30 par le Suisse Castan et l'Américain Greenlee. Ces polymères thermodurcissables ont connu une recherche intensive et sont utilisés dans de nombreux domaines tels que les revêtements, les adhésifs ou encore dans la composition de matériaux structuraux.

Les résines époxy présentent de bonnes propriétés mécaniques et une bonne adhésion sur les fibres et matériaux divers en particulier sur le jute. Cependant certaines de ces résines se polymérisent à des températures suffisamment élevées pour affecter les caractéristiques du renfort. La résine époxy bis A est une résine qui se polymérise à une température relativement basse (80°C dans une étuve pendant 8 heures ou bien à température ambiante pendant 17 jours) [7].

#### I.4.1. Composition chimique





### Polymérisation

Un durcisseur ou un catalyseur est ajouté (deuxième composant) permettant la formation d'une molécule tridimensionnelle (s'étendant dans les trois dimensions de l'espace) par création de ponts intermédiaires entre les chaînes linéaires.

La réunion des 2 produits forme un monomère le diglycidyléther du bisphénol A (DGEBA), Ce sont des résines thermodurcissables de degré de polycondensation peu élevé qu'il est nécessaire, sauf exception, d'associer à un durcisseur pour atteindre le stade thermo-rigide final, par formation de ponts entre les chaînes linéaires.

Le choix du durcisseur est fonction de l'application envisagée et des caractéristiques du produit fini. Les durcisseurs peuvent agir entre 15 et 200°C, suivant leur nature chimique.

On les classe habituellement en deux groupes :

- Durcisseurs acides
- Durcisseurs basiques

#### I.4.2. Propriétés mécaniques des résines époxy

Les principales caractéristiques physiques des résines époxy sont présentées dans le tableau ci-dessous :

matrice	E(Gpa)	$\alpha(10e(-10)/k)$	$\delta u$ (Mpa)	Densité	$\nu$	Tg(C°)	Références
résine époxy	3.2 – 3.55	1,5-1,8	70-75	1,27	0.35	118	[7]

**Tableau1.3** : Caractéristiques mécaniques de la matrice époxy (données à 25°C après cuisson de 8h à 80°C)



## I.5. Mise en forme de matériaux composites

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort.

Les différents procédés les plus importants de mise en forme des composites sont :

### I.5.1. Moulage au contact

Consiste à disposition successivement sur un moule Un agent de démoulage, Un gel coat, Une couche de résines thermodurcissable liquide (Figure 11).

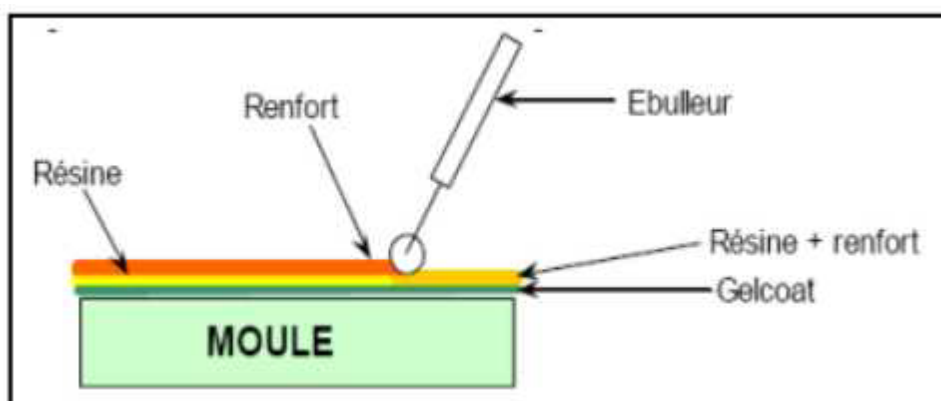


Figure I.11: Principe du moulage au contact.

### I.5.2. Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé (Figure 12).

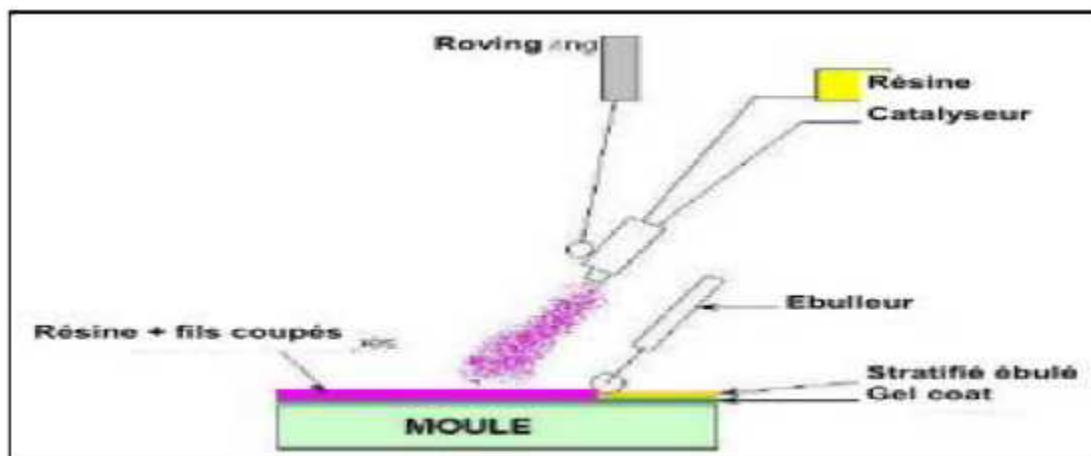


Figure I.12: Principe du moulage par projection simultanée.

### I.5.3. Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité. [13]

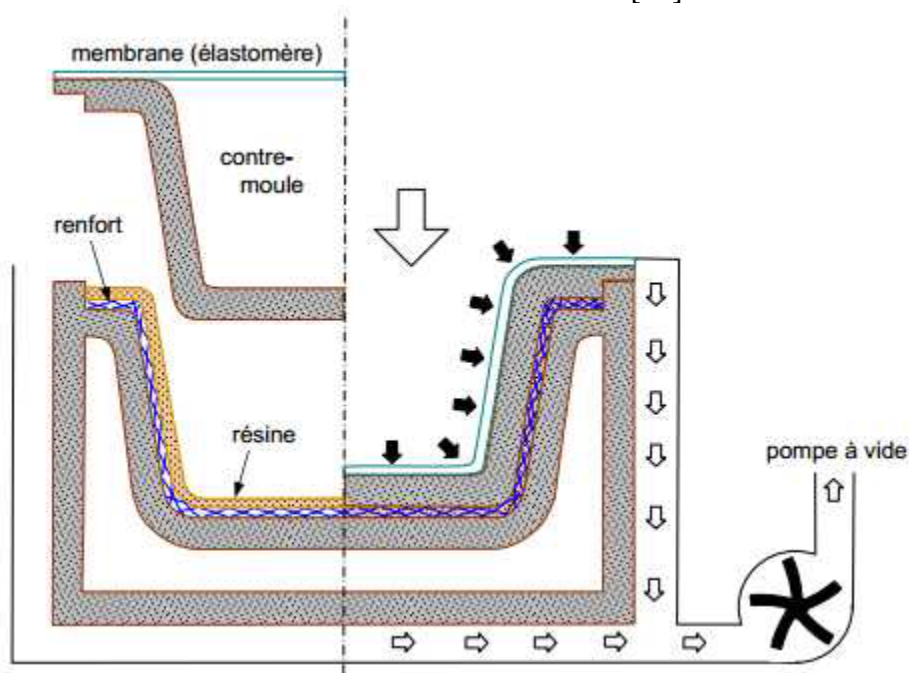


Figure I.13: Moulage sous vide.

### I.5.4. Moulage par injection de résine ou RTM

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

L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées (Figure 14).

L'injection de la résine se fait habituellement à de basse pression de l'ordre de 0,3 MPa.

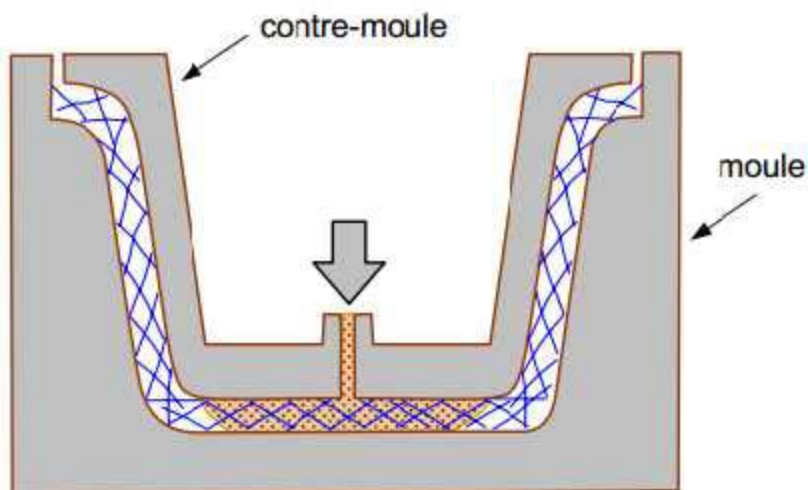


Figure I.14: Principe du moulage RTM. [13]

### I.5.5. Moulage par pultrusion

Dans cette technique, les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine (Figure 15).

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. [13]

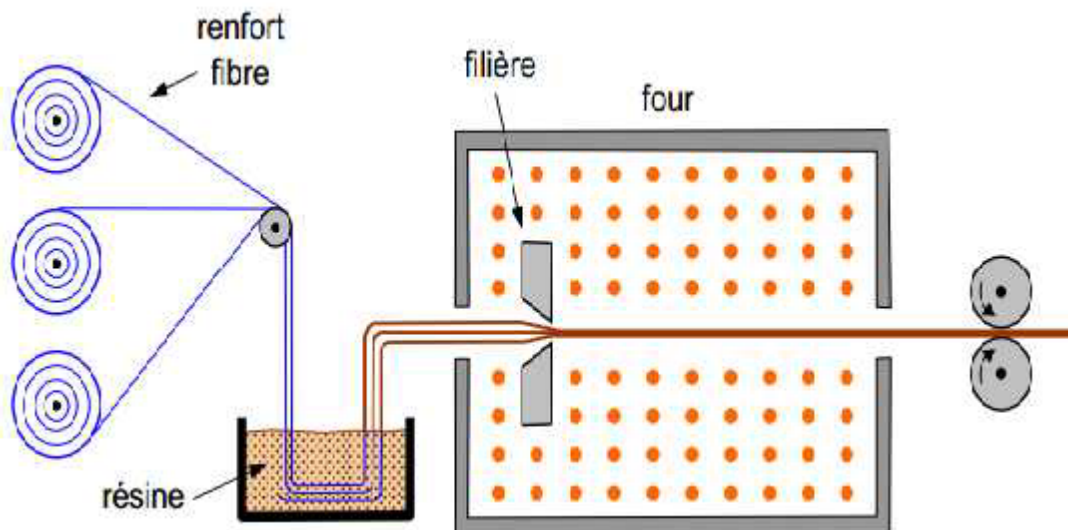


Figure I.15: Principe du moulage par pultrusion.

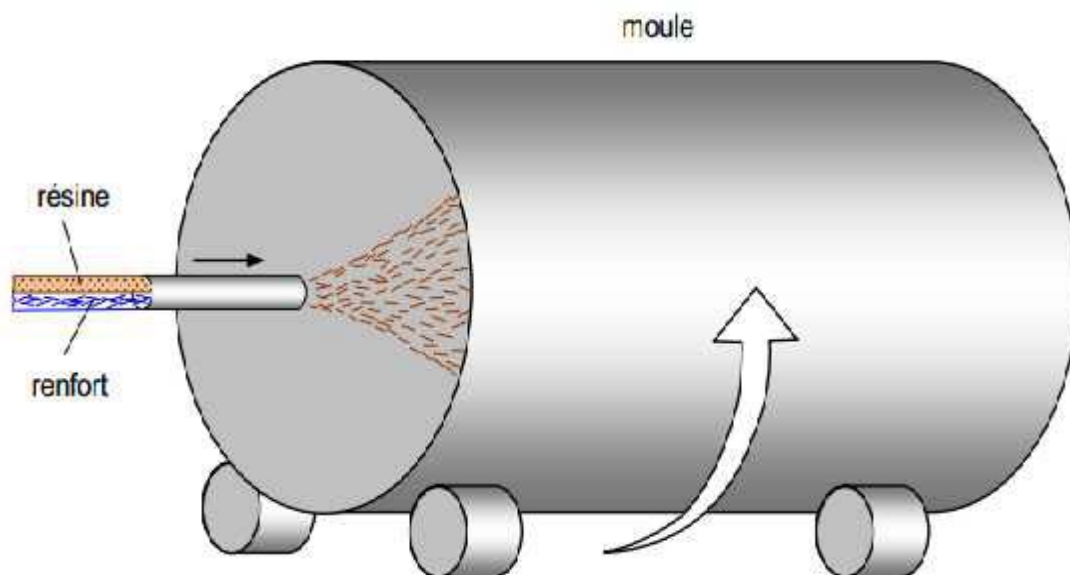
### I.5.6. Moulage par centrifugation

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

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

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

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.



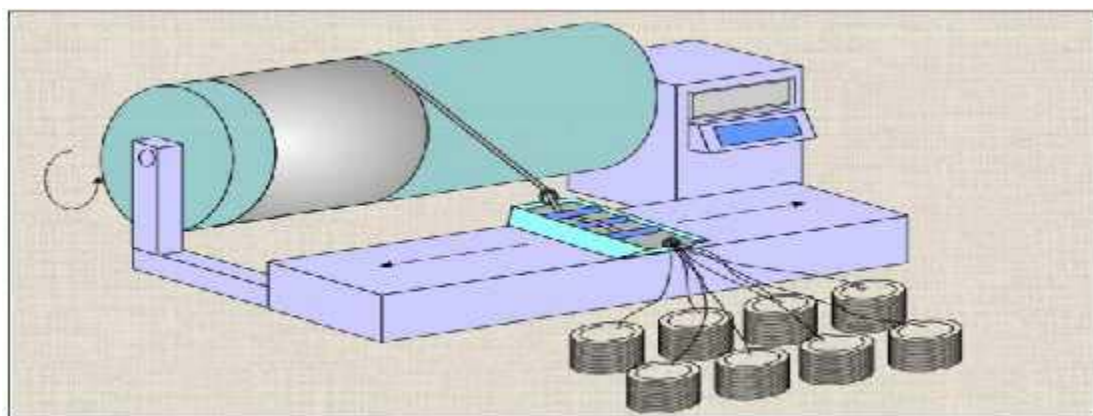
**Figure I.16:** Principe du moulage par centrifugation

### I.5.7. Enroulement filamentaire

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation (Figure 17).

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces.

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



**Figure I.17:** Principe de l'enroulement filamentaire.

### I.6. Domaine d'utilisation des matériaux composite

- L'industrie aéronautique.
- Le transport aérien, routier et ferroviaire.
- domaine militaire : Hélicoptère, Fusée, Avions ...etc.
- canalisation.
- Construction navales.
- Sports et loisirs. [14]

### I.7. Conclusion

La présente description nous permettra de donner une idée générale sur les matériaux composites et leurs procédés de mise en forme et parmi ces procédés, on a cité l'enroulement filamentaire.

Dans le chapitre qui suit, on va parler de ce procédé qui fera l'objet de notre étude.

CHAPITRE II  
ENROULEMENT  
FILAMENTAIRE

## II. L'enroulement filamentaire

### II.1.Introduction

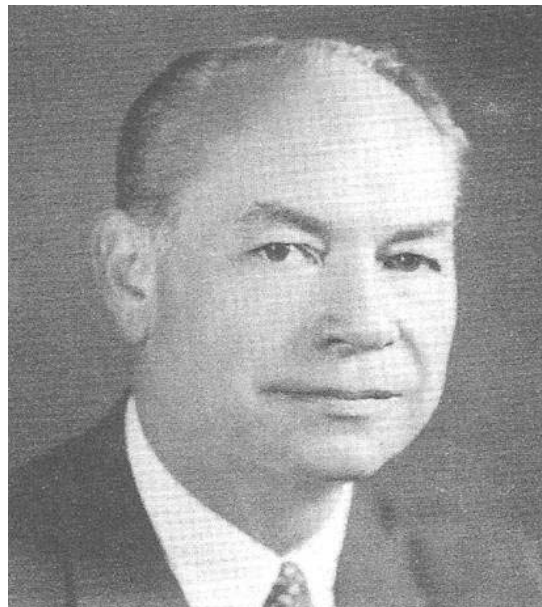
Parmi les processus de mise en œuvre des matériaux composites on s'intéresse à l'enroulement filamentaire. Ce type est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces.

### II.2.Historique

Richard E. Young a commencé ce qui pourrait être considéré comme l'enroulement filamentaire moderne dans le début des années 1940. Il a commencé par un simple enrouleur mécanique qui dépose une fibre de verre sur un mandrin en bois [15].

Après le processus d'enroulement a été complété, un pinceau a été utilisé pour postuler une résine époxy à l'extérieur de l'unité de la plaie. La partie enroulée a ensuite été insérée dans un four pour le durcissement.

Après le durcissement, le mandrin en bois a été retiré pour compléter la fabrication de pièces. Le processus de liquidation des filaments de Young a été le premier être présenté au gouvernement américain pour la fusée (applications technologiques).



**Figure II.1:** Richard E.Young, le fondateur de l'enroulement Filamentaire moderne [15]

La société Kellogg.W. M. a été la première qui a commencé à utiliser l'enroulement filamentaire pour fabriquer des petits moteurs de fusées. Cette technologie a été rachetée par Hercules.

L'enroulement filamentaire des récipients sous pression a évolué à partir d'un projet de démonstration Hercules Powder Corporation en 1948. En 1955, l'aviation nord-américaine (Rock et dyne) a engagé Hercules dans un autre projet de démonstration, enveloppant le carter du moteur avec la fibre de verre.

Au cours du milieu des années 1950 jusqu'au début des années 1960, la recherche était en cours avec les forces de l'air, la marine, les militaires et les laboratoires privés financés pour la recherche sur les armes. Le développement et les essais de matériaux composites ont été réalisés en collaboration avec la conception et la construction des récipients sous pression, les carter de moteurs des fusées, et les tubes de lancement. Ces développements ont été réalisés par les principaux sous-traitants industriels. Parmi eux, se trouvaient Brunswick Corp. Aerojet General Corp., Rock et dyne, Thiokol, Owens-Corning et beaucoup d'autres.

En 1961, les techniques d'enroulement pré-imprégné assisté par ordinateur sont introduites. En 1962, la nécessité d'une machine d'enroulement filamentaire de haute précision est devenue évidente pour Ashton L'ingénieur chez Hercules, qui a fondé une technologie du génie pour produire ces machines.

Finalement, grâce à des innovations techniques, les ingénieurs ont pu concevoir des machines de photo-optiques avec des systèmes hydrauliques. Pendant ce temps-là, la machine à enroulement filamentaire est devenue de plus en plus sophistiquée dans la conception ; l'addition d'un troisième axe de mouvement (ou chariot transversal radial d'alimentation), des rails profilés et des arbres à billes en combinaison avec des réducteurs conduit à une amélioration de l'enroulement filamentaire lisse et plus précis. En milieu des années 70, l'avancement de la technologie et l'introduction des servo-moteurs est entré dans le domaine de la conception de ces machines, utilisant des ordinateurs pour le traitement rapide des données résultant en un mouvement plus facile et une plus grande précision de placement de fibres. Les années 80 et 90 ont vu l'utilisation accrue de la technologie informatique. Les ordinateurs et les cartes de contrôle de mouvement sont devenus des pièces essentielles de matériel qui ont été incluses dans presque chaque machine. Le contrôle de la vitesse de la machine a été grandement amélioré, un certain nombre d'entreprises ont commencé d'utiliser le développement de logiciels, et produire des configurations plus complexes, comme les arbres coniques, des pièces non-axisymétriques par l'enroulement filamentaire.



### II.3. Procédés d'Enroulement filamentaire

Le procédé d'enroulement filamentaire permet d'obtenir des pièces en matériau composite, par enroulement de fibres sur un mandrin (pièce). Il consiste à enrouler, par l'intermédiaire d'un guide-fil, des fibres imprégnées de résine sur le mandrin et à faire polymériser la structure. Ce procédé permet de donner des pièces de très bonne caractéristique mécanique.

En procédé d'enroulement filamentaire, selon la coordination entre le mouvement de rotation et le mouvement axial, trois types de configurations d'enroulement peuvent être obtenues : polaire, hélicoïdale, et le circonférentielle. Le choix est basé sur la forme de la pièce et les orientations de renforcement nécessaires.

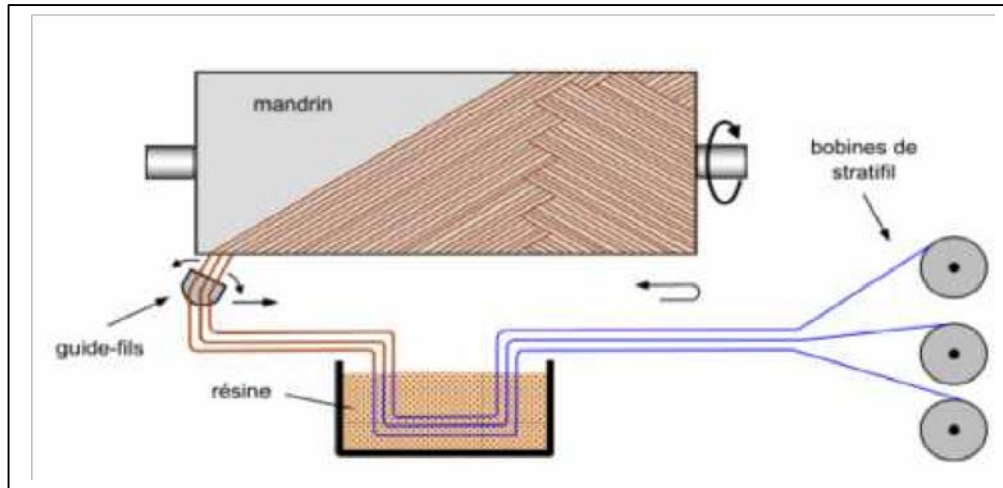
#### II.3.1.Enroulement hélicoïdal

##### a. Enroulement discontinu

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fil par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fil parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

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

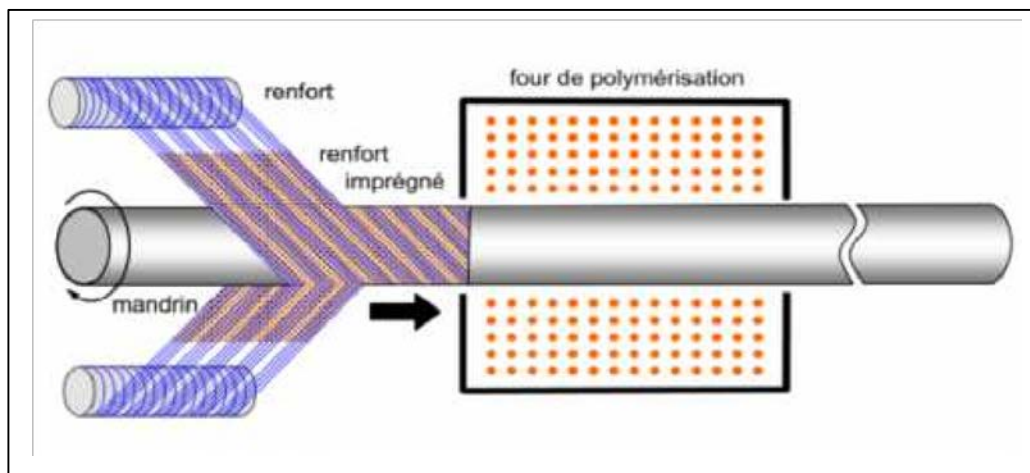
La figure II.2 illustre le principe du modèle d'enroulement hélicoïdal.



**Figure.II.2** : Principe d'enroulement hélicoïdal. [13]

### b. Enroulement continu

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs. La figure II.3 montre ce type d'enroulement :



**Figure.II.3** : Enroulement hélicoïdal continu. [13]

Dans l'enroulement hélicoïdal, l'angle  $\alpha$  est de  $5^\circ$  à  $80^\circ$  par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la figure II.4.

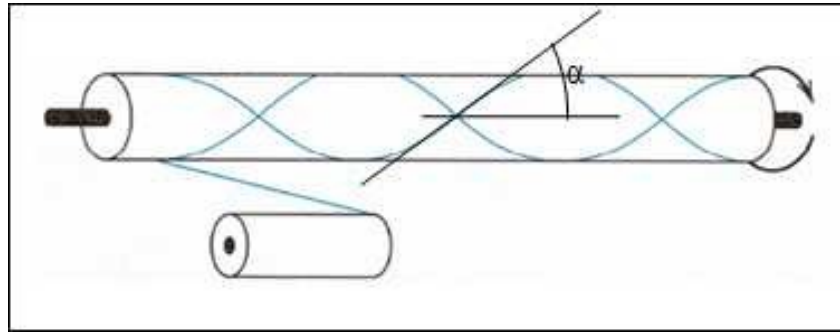


Figure.II.4: enroulement hélicoïdal

### II.3.2. Enroulement circonférentiel

Le bobinage est effectué à  $90^\circ$  par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin. Ce type d'enroulement est assez peu utilisé. La figure II.5 illustre le principe de l'enroulement circonférentiel.

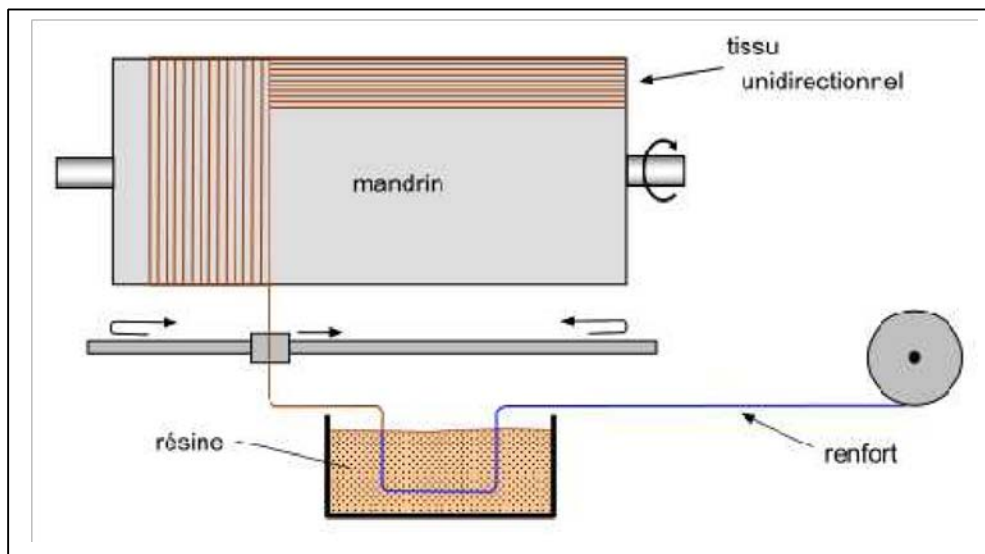
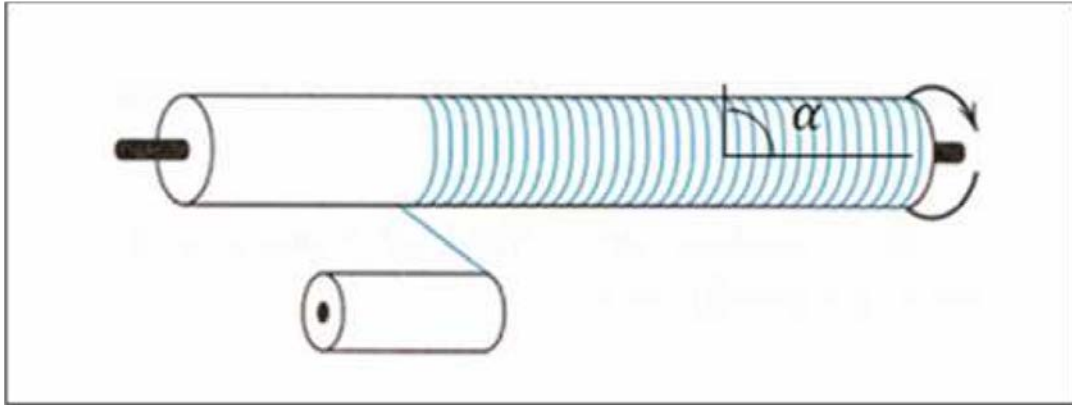


Figure.II.5: Principe d'enroulement circonférentiel. [13]

Il est connu comme la sangle ou d'enroulement cerceau, c'est une forme particulière d'enroulement hélicoïdal et est utilisé pour déposer des fibres proches de  $90^\circ$  par rapport l'axe longitudinal. Chaque rotation complète du mandrin avance la livraison de la bande par une bande passante complète comme le montre la figure II.6.



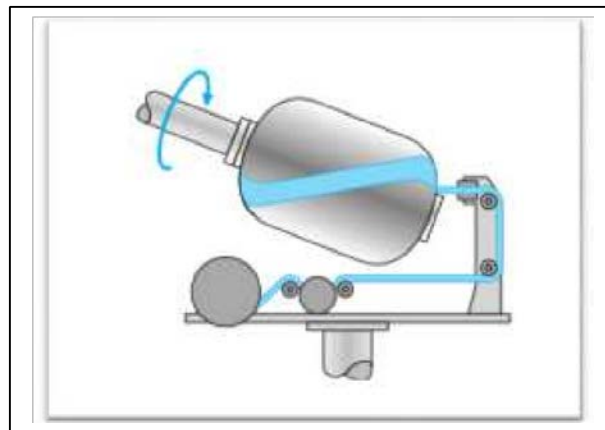
**Figure.II.6 :** Enroulement circonférentielle

### II.3.3.Enroulement Polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à l'extrémité sphérique sans discontinuité de l'enroulement. Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation.

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

La figure II.7 illustre le principe d'enroulement polaire.



**Figure.II.7 :** Principe d'enroulement polaire [16].

Dans l'enroulement polaire, la fibre passe tangentiellement à l'ouverture polaire à une proximité ou autour des pôles de mandrin, change de direction, et passe tangentiellement à la face opposée de l'ouverture polaire à l'autre extrémité. En d'autres termes, les fibres sont enroulées de pôle à pôle. Dans cet enroulement, l'angle est moins de  $5^\circ$  par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la figure II.8.

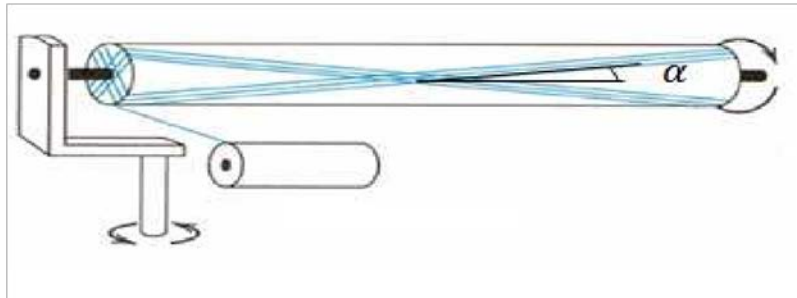


Figure II.8 : L'enroulement polaire [17].

#### II.4. Matériels

Les propriétés mécaniques des fibres contribuent d'une façon dominante sur les propriétés mécaniques globales des composites fibres-résine. La contribution des fibres dépend de quatre facteurs principaux :

- Propriétés mécaniques de la fibre de base ;
- Quantité de fibres dans le composite (fraction volumique de fibres) ;
- Orientation des fibres dans le composite ;
- Interaction de la surface de la fibre et de la résine (en fonction du degré de liaison entre les deux).

Cette liaison interrassiale est fortement influencée par le type de traitement de la surface des fibres. De plus, le dimensionnement minimise les dommages causés par la manipulation.

Le choix de dimensionnement dépend des performances souhaitées du composite, du type de fibre et de la façon dont les fibres vont être traitées. La quantité de fibres dans un composite détermine la résistance et la rigidité. En règle générale, la résistance et la rigidité d'un stratifié augmentent proportionnellement à la quantité de fibres. Cependant, au-dessus de 60 à 70% de fraction volumique de fibres, la rigidité à la traction augmente encore, alors que la force de stratifié atteint un pic et diminue lentement. Dans cette situation, la résine est trop peu présente et ne peut tenir suffisamment les fibres entre elles. L'orientation des fibres dans un composite contribue grandement à la résistance globale. Les fibres de renforcement sont conçues pour être chargées sur toute leur longueur, ce qui signifie que les propriétés du composite sont hautement spécifiques de direction. En plaçant les fibres dans les directions de sollicitation, la quantité de matériau mis dans des directions où il ya peu ou pas de charge peut être réduite au minimum [18].

Les matières fibreuses les plus couramment utilisées sont des fibres de carbone, fibres de verre, fibres aramide et fibres naturelle. Par rapport à d'autres fibres, les fibres de carbone présentent de nombreux avantages en offrant d'excellentes propriétés mécaniques, par exemple : faible densité, module de traction et résistance élevés, bonne résistance à la fatigue,

coefficient de frottement et expansion thermique faibles, bonne résistance électrique et thermique, et absorption d'humidité réduite [19].

Ils sont utilisés comme ultra-haute résistance des composants et des renforts de structure aérospatiales et des réservoirs d'air comprimé à haute pression, par exemple fuselages et ailes d'avions, plates-formes satellitaires et aubes de turbines à vent.

Les fibres d'aramide, qui sont disponibles dans le commerce depuis les années 1960, ont également trouvé un large champ d'applications. Leurs propriétés thermiques facilitent leur utilisation en tant que substitut pour l'amiante. Les fibres d'aramide montrent un bon amortissement des vibrations, une forte absorption d'énergie, des propriétés balistiques favorables, sont utilisées pour les applications de résistance aux chocs.

Les fibres de verre peuvent être divisées en plusieurs groupes en fonction de leur composition chimique : A-verre, C-verre, S-verre, E-verre, etc. Seulement E-verre est largement utilisé dans les applications aérospatiales. Les fibres de verre sont produites à partir de verre fondu qui est produit directement ou par fusion des billes de verre. Le verre fondu est versé dans un réservoir et maintenu à une température constante pour maintenir une viscosité constante.

La tendance actuelle s'oriente vers l'utilisation des fibres naturelles ou organiques car ce sont les fibres les plus disponibles. Les principaux avantages des fibres naturelles sont leur coût, leur légèreté, leur disponibilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées.

Grace à un compromis idéal rigidité/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels contenant des charges ou fibres minérales.

La matrice de résine comprend une partie importante de tout composite. C'est essentiellement la colle qui maintient les fibres ensemble. Une résine doit avoir de bonnes propriétés mécaniques, une bonne adhérence et des propriétés de ténacité et de bonnes propriétés environnementales. Pour les propriétés mécaniques, cela signifie qu'une résine idéale doit être initialement rigide mais pourrait ne pas subir une rupture fragile. Afin d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques de la fibre, la résine doit se déformer au moins la même que la fibre se détend.

La bonne adhérence entre les fibres de renforcement et la résine exige que les charges soient transférées efficacement pour éviter les fissures et le décollement. La résistance à la propagation des fissures est une mesure de la ténacité du matériau [20]. Il est important de faire correspondre la dureté à l'allongement à la rupture de la fibre. L'environnement dans lequel le composite est utilisé peut être dur. La résine doit avoir une bonne résistance à l'environnement, en particulier, l'eau et d'autres substances agressives. En outre, la résine doit être capable de résister à des cycles de contrainte constante.

### II.4.1.Mandrins

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage.

Ils peuvent être :

- En métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables ;
- En matériau à bas point de fusion ;
- En matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans un liant soluble dans l'eau ;
- En élastomère gonflable.

#### II.4.1.1.Doublure mandrin

Invariablement, tous les appareils à pression ou des tubes en matériaux composites ont une doublure. La fonction de la chemise est de sceller le liquide ou gaz à l'intérieur du récipient ou tube. Normalement, les fibres fournissent la résistance et la rigidité de la structure. Dans les cas où il y a des fissures dans la matrice, ces fissures ne peuvent pas provoquer une rupture dans le récipient ou le tuyau, mais le fluide à l'intérieur peut fuir sur le conteneur. En cas de fluide inflammable, cela peut être dangereux, même si le réseau de fibre est suffisant pour contenir la pression. Pour assurer l'étanchéité du fluide, une poche souple est généralement appliquée. Une doublure peut être en caoutchouc, une couche molle de matière thermoplastique telle que le PVC, ou une mince couche de métal (acier, alliage d'aluminium, alliage de titane). Lorsque le revêtement est suffisamment rigide, il peut être utilisé comme un mandrin de la surtension de la fibre et de la résine. Dans une situation où le revêtement n'est pas suffisamment rigide pour résister à la compression due à la force d'enroulement, les stratégies pour mandrins doivent être développées. Il existe de nombreuses exigences à considérer pour les mandrins.

Les considérations importantes sont :

- le mandrin doit être suffisamment rigide pour résister à la compression imposée par la force d'enroulement ;
- la résine ne doit pas coller à la surface du mandrin ;
- l'agent de démoulage doit être appliqué ;
- le mandrin doit être extrait de la partie après durcissement.

Les mandrins peuvent être classés selon les catégories suivantes :

- Mandrins extractibles.
- Mandrins pliables.
- Mandrins cassables.
- Mandrins solubles.

### II.4.2.Applications

L'enroulement filamentaire est surtout utilisé pour fabriquer des pièces ayant une symétrie de révolution :

- Tube ;
- Réservoirs ;
- Bouteilles de gaz ;
- Enveloppes cylindriques (fusée ou missile) ;
- Pales d'hélicoptères et de turbines ;
- Cannes à pêche ;
- Bâtons de golf ;
- Fuselage des avions ;
- Canalisation.

Des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. Les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée.

L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

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

Aujourd'hui, les applications de l'enroulement filamentaire sont élargies à d'autres secteurs tels que les produits complexes de l'ingénierie de composites non- sphériques et non cylindriques avec l'utilisation des machines et des logiciels sophistiqués [21].

### II.4.3. Avantages et Inconvénients

#### Avantage

- Procédé adapté pour traiter des pièces nécessitant des tolérances précises.
- Technique fiable et assez rapide.
- Automatisable et utilisable pour les séries.
- Orientation de fibres dans une direction spécifique possible dans ce processus.
- De très bonnes caractéristiques mécaniques en termes de la résistance et de la rigidité.



**Inconvénients**

- Investissement de capitaux relativement élevé.
- Contrôle très précis sur le mécanisme nécessaire pour la distribution et l'orientation des fibres uniformes.
- Direction des fibres ne pouvant pas être modifiée dans une couche de l'enroulement.
- Pour certaines applications, un mandrin peut être coûteux.
- Ne permet pas de mouler des pièces avec contre-dépouille.

**II.4. Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu l'historique de l'enroulement filamentaire, ce procédé existe donc depuis 1950. On trouve leur application dans différents domaines : génie chimique, marine, aéronautique, mécanique ...etc.

L'étude et la présentation de la machine feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III  
MACHINE D'ENROULEMENT  
FILAMENTAIRE

### III. Machine d'enroulement filamenteuse

#### III.1.Introduction

L'enroulement filamenteuse est un procédé de mise en forme rapide et automatisable. Il est parfaitement adapté pour réaliser des pièces à géométrie de révolution comme les tubes cylindriques, autres. Ou de forme complexe (section évolutive ou axe de révolution courbe par exemple) [22].

Durant ce chapitre, on va parler dans un premier temps sur la machine d'enroulement filamenteuse avec laquelle nous allons élaborer nous échantillons qui sont sous forme de tubes.

On a conçu ces tubes dans le but de faire une caractérisation, pour cela nous avons confectionné 6 catégories de tubes, avec des angles différents.

Plusieurs fils sont placés les uns à côté des autres et sont bobinés autour d'un mandrin dont la forme prédétermine déjà celle de la structure à réaliser. Les principaux paramètres pilotant le procédé sont l'angle d'enroulement et les vitesses de rotation du mandrin et de translation du fil. L'angle d'enroulement est défini comme l'angle entre l'axe de révolution de la pièce et la direction des fils.

Plus celui-ci est faible, plus le comportement mécanique attendu de la structure devrait être résistant en traction. Inversement si l'angle d'enroulement est proche de  $90^\circ$ , le comportement mécanique de la pièce devrait être amélioré vis-à-vis d'une sollicitation de type pression interne.

#### III.2.Présentation de la machine

La machine permet d'obtenir des pièces en matériaux composites (tubes, pièces ...etc.) par enroulement des fibres sur un mandrin. Elle consiste à enrouler, par l'intermédiaire d'un guide-fil, des fibres (verre, carbone, aramide ...etc.) imprégnées de résine sur un mandrin et à faire polymériser la structure. L'emploi d'une bande pré-imprégné (roving) apporte une grande facilité de mise en œuvre pour cette fabrication.

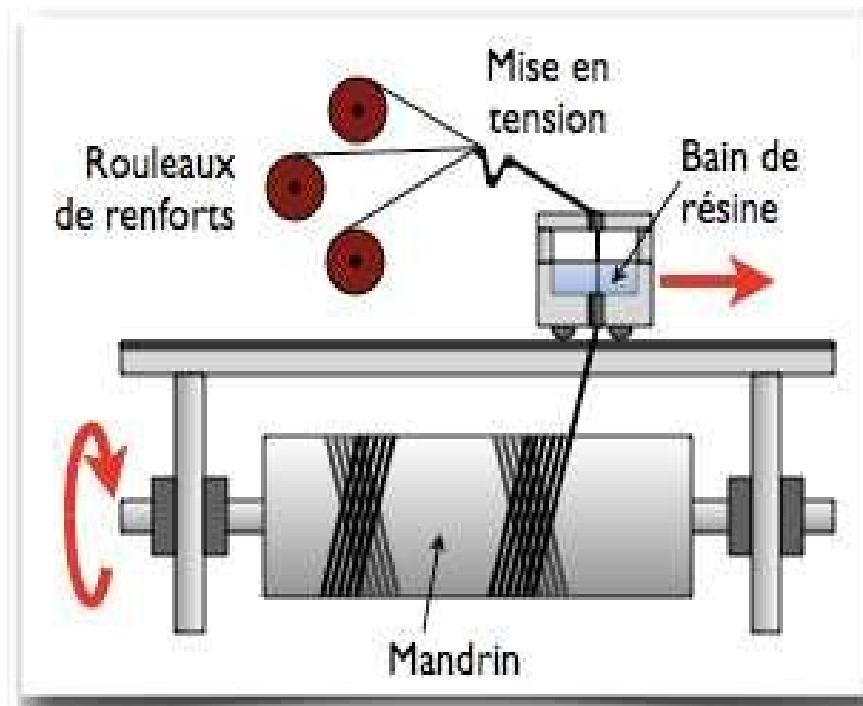
La machine filamenteuse est étudiée pour un cylindre d'enroulement de diamètre 400 mm et de longueur 1480 mm (données pouvant correspondre à une machine industrielle). La longueur de la barre doit être alors supérieure à 1480 mm. En prenant en compte la longueur des outils de fixation et les dimensions des roulements...etc., la longueur de la barre peut aller jusqu'à 2160 mm Son diamètre sera déterminé à partir d'une étude de résistance et de rigidité à la flexion et à la torsion.

De même cette machine est complètement automatique programmée par un automate siemens type LOGO d'une nouvelle génération muni d'un écran LOGO TD pour faciliter les différentes fonctions de la machine : visualisation des entrées et les sorties de la machine.

### III.2.1. Chaîne cinématique de la machine

La documentation concernant la machine d'enroulement filamentaire fournit la sous-chaîne cinématique. On y trouve deux systèmes :

- Système de rotation de la barre liée au cylindre d'enroulement
- Système de translation du dispositif d'enroulement.



**Figure III.1:** Sous-chaîne cinématique. [23]

Dans la littérature, on ne trouve pas la chaîne cinématique complète de la machine filamentaire, c'est-à-dire, les éléments qui la composent (moteurs, éléments de transmission de puissance ; etc...). Nous proposons alors la chaîne cinématique suivante :

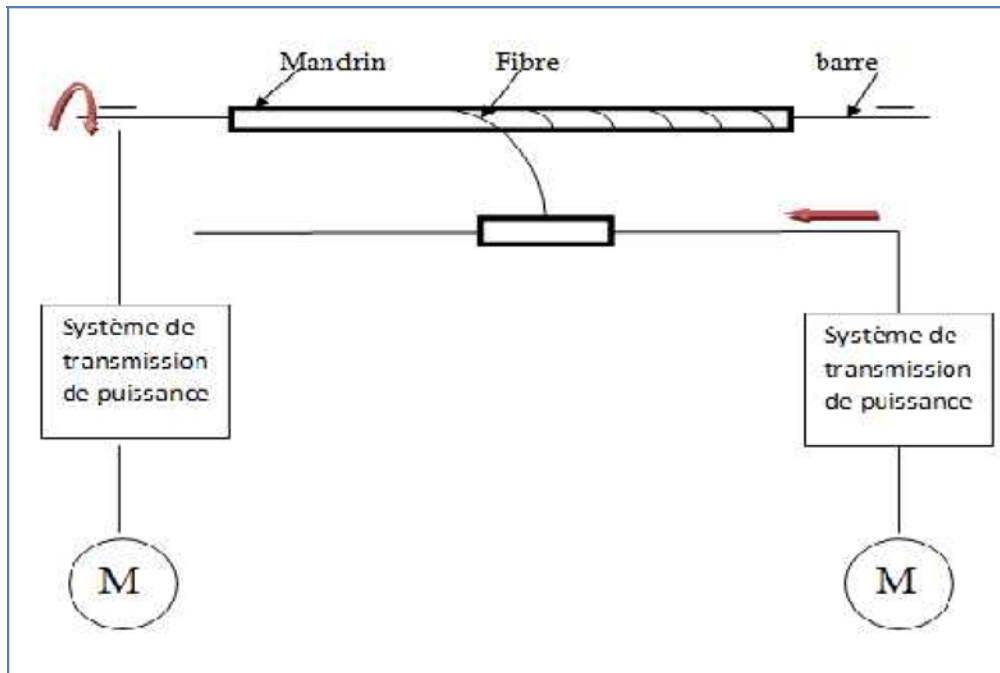


Figure III.2: Chaîne cinématique proposée.

### III.2.2. Schéma descriptif de la machine

La figure suivante illustre une description du système :

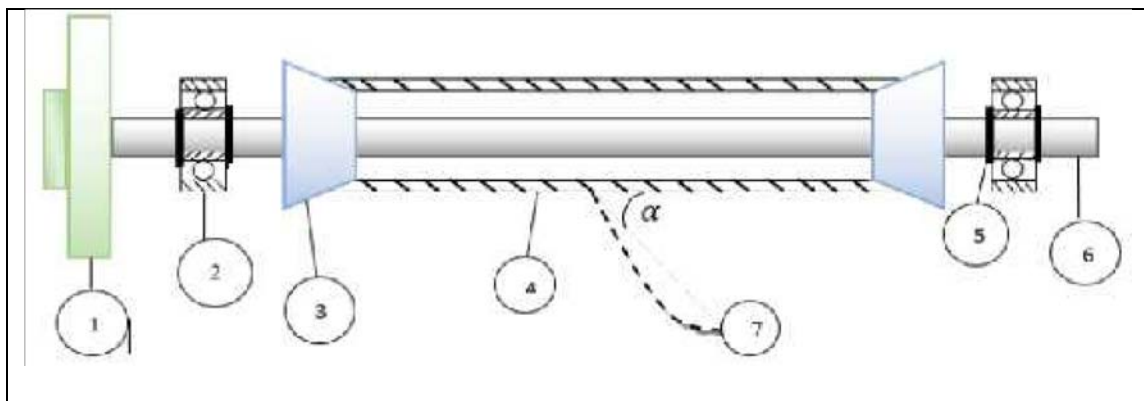


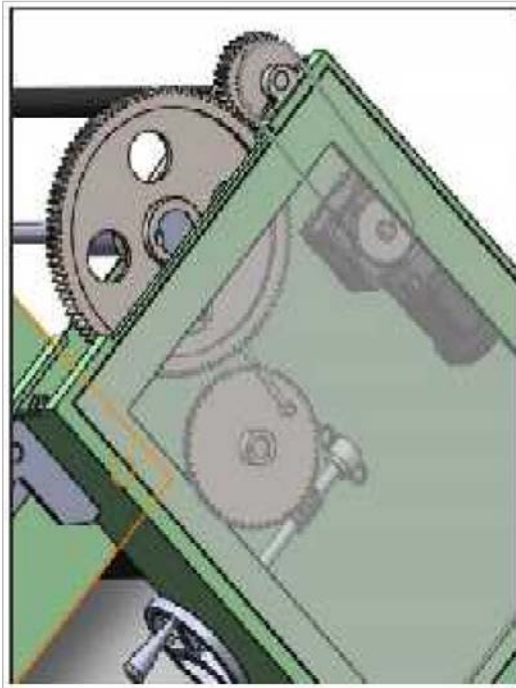
Figure III.3 : Schéma descriptif de la machine.

Légende :

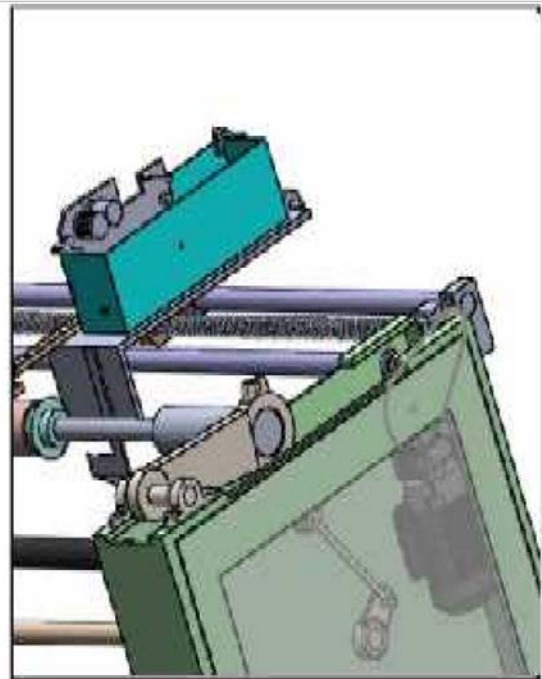
- |                                    |                        |                       |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 : Roue d'engrenage               | 2 : Roulement à billes | 3 : Outil de fixation |
| 4 : Cylindre d'enroulement (moule) | 5 : Circlips           | 6 : Barre             |

### III.2.3. Les différentes parties mécaniques de la machine

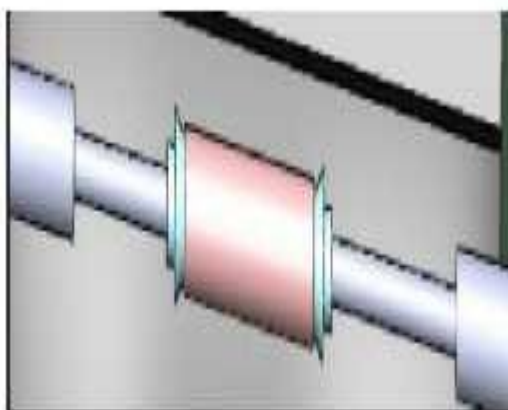
Les figures suivantes représentent les différentes parties mécaniques de la machine à l'aide du logiciel solide Works :



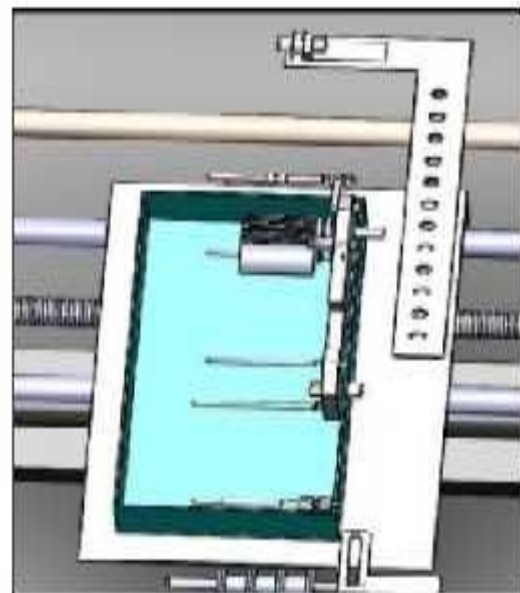
**Figure III.4:** Mécanisme de rotation.



**Figure III.5:** Mécanisme de translation.

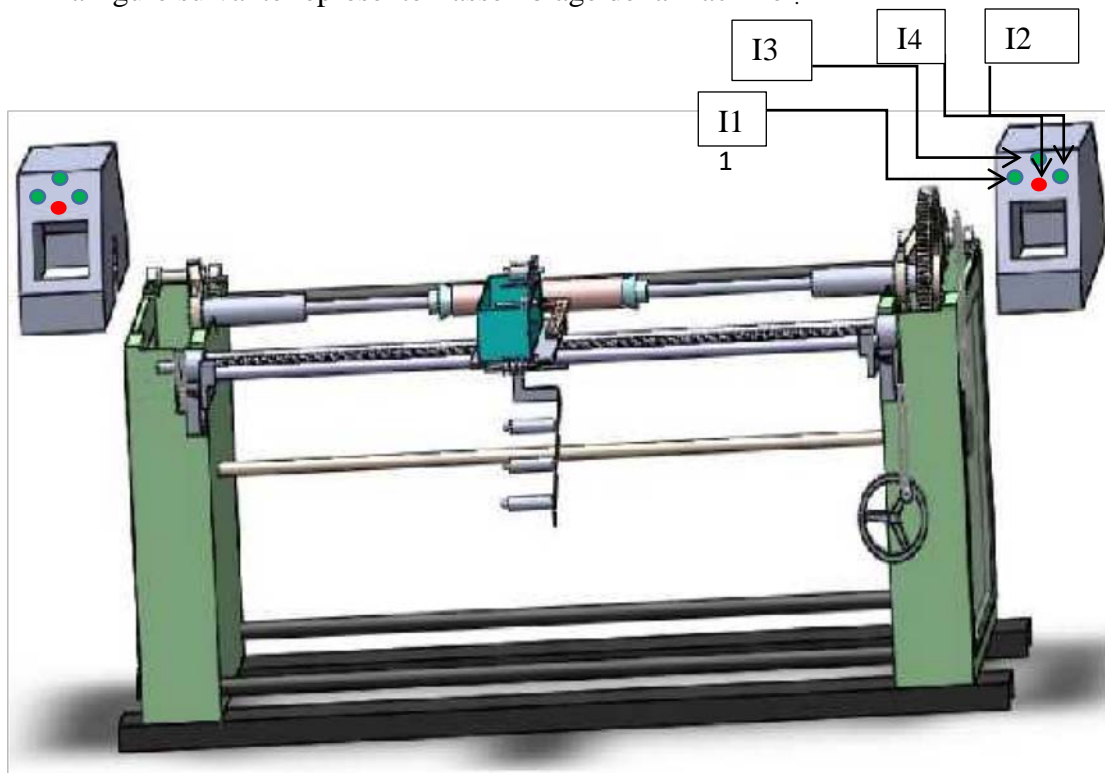


**Figure III.6:** Le mandrin avec le moule.



**Figure III.7:** Bain de résine.

La figure suivante représente l'assemblage de la machine :



**Figure III.8:** Assemblage de la machine avec « solidworks ». [24]

### III.2.4.Fonctionnement de la machine

Avant de démarrer la machine il faut :

- Mettre la machine sous tension.
- Vérifier l'état des capteurs et leurs emplacements.
- Placer le moule dans le mandrin.
- Placer les bobines de la fibre à leur emplacement.
- Faire des tests on mode manuel afin de connaitre le bon fonctionnement du système.
- Cliquer sur le bouton poussoir « réinitialisation » la partie opérative se rend à sa position initiale.
- Vérifier sur l'écran le message d'accueil qui indique que la machine est prête.
- Faire passer les fils des fibres sur l'ensemble des rouleaux du bain jusqu'au moule.
- Vérifier que le bain de résine est rempli.

Au début on doit choisir entre le mode manuel et automatique, l'automate vérifie que les mesures de sécurité sont en mode « off » si non, un message va être affiché sur l'écran de l'automate Bloque l'exécution du programme.

Quand on met le commutateur en mode automatique, un message est envoyé de l'automate vers l'écran indique qu'il faut valider ce mode en appuyant sur le bouton poussoir marche à ce moment l'automate commence l'exécution du programme qui donne le fonctionnement de la machine.

Alors l'automate commence à exécuter le programme, deux contacts « Q1 et Q3 » sont fermés, ils permettent d'actionner les variateurs de fréquence en mode démarrage « RUN », les moteurs asynchrones font démarrer les mécanismes de translation et de la rotation en même temps donnent une rotation de mandrin avec un déplacement du bain de résine.

Dès qu'un capteur fin de course est placé à droite ,il détecte le bain de résine, donne un signal +24V à la septième entrée « I7 » , arrête le déplacement et actionne la deuxième sortie de l'automate « Q2 » et change le sens de rotation du moteur à l'aide de variateur en mode inverse « REV » , donc le bain de résine change le sens du déplacement vers la gauche jusqu'au capteur placé à gauche « I6 » , ce dernier arrête le déplacement et change le sens vers l'autre .

A ce moment le compteur dans le programme incrémente un cycle, jusqu'à la valeur programmée, l'automate arrête la manipulation et rend la partie opérative à sa position initiale.

Si on met le commutateur en mode manuel, un message est envoyé de l'automate vers l'écran indiquant qu'il faut valider ce mode en appuyant sur le bouton poussoir marche, à ce moment l'automate commence l'exécution du programme qui donne le fonctionnement manuel de la machine. Une fois ce mode est activé, le mode automatique sera désactivé On peut sélectionner les mécanismes que nous voulons faire marcher.

Quand on appuie sur les boutons poussoirs du pupitre manuel, des signaux de +24 VDC seront envoyés aux entrées de l'extension de l'automate à partir de I1 jusqu'à I4.

- Le bouton poussoir qui est relié à l'entrée I1 tourne le mandrin à droite.
- Le bouton poussoir qui est relié à l'entrée I2 tourne le mandrin à gauche.
- Le bouton poussoir qui est relié à l'entrée I3 déplace le bain à droite jusqu'au capteur D.
- Le bouton poussoir qui est relié à l'entrée I4 déplace le bain à gauche jusqu'au capteur G [24].



### Remarque

Au cours du fonctionnement de la machine si une sécurité est déclenchée, la machine va s'arrêter automatiquement et un message sera affiché sur l'écran qui nous indiquera la localisation du problème.

### III.2.5. Angle d'enroulement

Le choix de l'angle d'enroulement dans les applications (tube, réservoir, etc.) est nécessaire, elle influence sur : les performances mécaniques, la pression, la corrosion, ...etc.

L'angle d'enroulement dépend de la direction du stratifié par rapport à l'axe du mandrin, suivant la variation de cet angle on distingue trois modes d'enroulement :

- **Enroulement hélicoïdal** l'angle est entre  $5^\circ$  à  $80^\circ$ . On trouve ce mode dans la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs, dans la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tube de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

- **Enroulement circonférentiel** l'angle est voisin de  $90^\circ$ . Ce type d'enroulement est assez peu utilisé ;

- **Enroulement polaire** l'angle est moins de  $5^\circ$ . Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fil par rapport à la rotation du mandrin.

Dans la machine filamenteuse utilisée la vitesse de rotation du mandrin et la vitesse de rotation de la vis varie en fonction des fréquences entrées pour obtenir la vitesse qui correspond à l'angle choisi. Pour que l'angle soit variable on utilise des variateurs de fréquence placé avant les moteurs :

- Un variateur de fréquence pour la variation de la vitesse de rotation du mandrin.
- Un variateur de fréquence pour la variation de la vitesse de rotation de la vis.

### III.2.5. Relation entre les différents paramètres (angle, vitesse de rotation du mandrin, vitesse de rotation de la vis)

La variation de l'angle d'enroulement dépend de la vitesse de rotation de la vis et du mandrin, l'équation de l'angle d'enroulement :  $2\pi r N_m$

$$\tan(\alpha) = 2\pi r N_m / L N_s$$

Tel que :

$N_s$  : vitesse de rotation de la vis ;

$N_m$  : vitesse de rotation du mandrin ;

$\alpha$  : Angle d'enroulement ;

$L$  : Déplacement de l'écrou en mm/tr (le pas) ;

$r$  : Rayon du mandrin (dépend du mandrin choisi).

Equation de 3 inconnus :

- Rayon  $r$  est varié en fonction du rayon du cylindre d'enroulement choisi ;
- De rotation du mandrin est variable ; – vitesse de rotation de la vis est variable.

Le déplacement de l'écrou est :  $L = 6 \text{ mm/tr}$

La fixation de ces paramètres dépend du constructeur.

### III.3. Conclusion

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par l'asservissement entre le mouvement de translation du guide-fil et la rotation du cylindre d'enroulement.

L'angle d'enroulement filamenteuse dépend de la vitesse de rotation du mandrin, ainsi de la vitesse de rotation de la vis.

CHAPITRE IV  
ELABORATION ET CARECTERISATION  
DES TUBES

## IV. Elaboration et caractérisation des tubes

### IV.1.Introduction

Durant ce chapitre, on va citer la méthode suivie pour l'élaboration des tubes en 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 6 catégories de tubes, chaque un avec un angle d'empilement différent, 5 de ces tubes ont 3 couches (1<sup>er</sup> et la 3<sup>ème</sup> à 90° par rapport à l'axe de rotation et la 2<sup>ème</sup> prend différents angles 50°, 55°, 60°, 65°, 75°) et le 6<sup>ème</sup> tube a 8 couches (90° par rapport à l'axe de rotation)

Le tableau suivant nous explique l'architecture et la composition de chaque tube :

Nbre de couche	Angle	Architecture	Renfort	Matrice
03	50°	1 couche primaire de 90° + 1 couche ± 50° + 1 couche de finition 90°	Fibre de Jute	Résine Epoxy
	55°	1 couche primaire de 90° + 1 couche ± 55° + 1 couche de finition 90°		
	60°	1 couche primaire de 90° + 1 couche ± 60° + 1 couche de finition 90°		
	65°	1 couche primaire de 90° + 1 couche ± 65° + 1 couche de finition 90°		
	75°	1 couche primaire de 90° + 1 couche ± 75° + 1 couche de finition 90°		
08	30°	08 couches de 90°	Fibre de Jute	Résine Epoxy

**Tableau IV.1 :** Architecture des différents tubes réalisés .

### IV.2.caractérisation des fibres et de la résine

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.

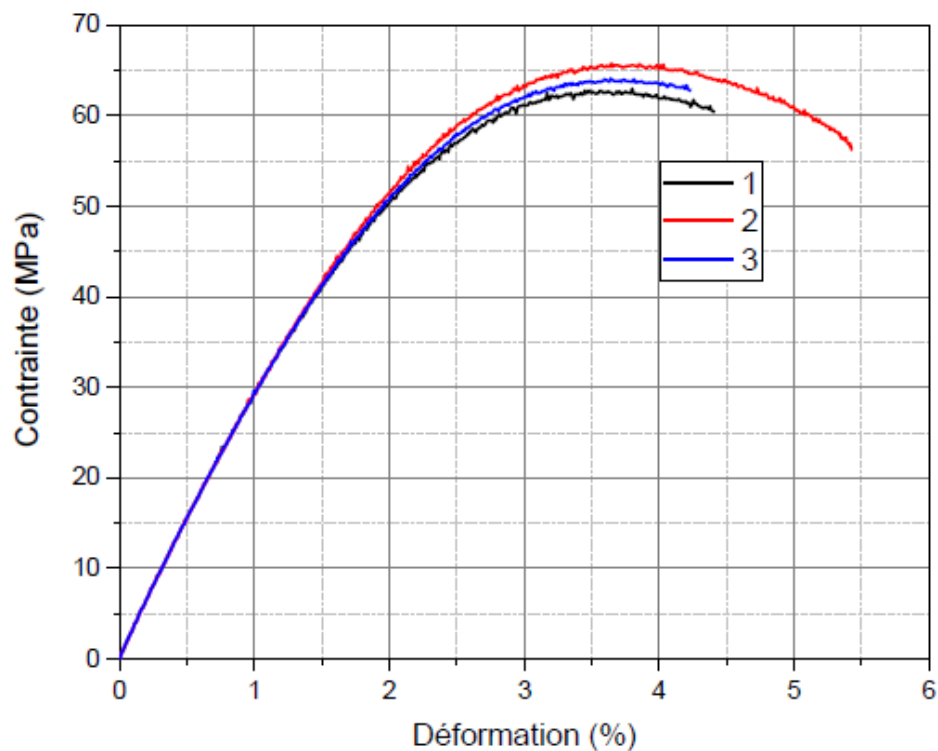
Caractéristiques de la résine :

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 %

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques de la résine.

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 ci-après



**Figure IV.1:** *Comportement* de résine G 35 en traction.

Les propriétés élastiques sont présentées dans le tableau ci-après

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

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques de la résine.

Caractéristique du renfort :

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

Tableau IV.4 : Caractéristiques des fibres.

### IV.3. Élaboration des tubes

#### IV.3.1. Préparation du moule

- Créer une entaille le long du moule à fin de surdimensionné le diamètre du tub on insérant une tige en cuivre le long de cette entaille. Ce surdimensionnement sert a facilité l'extraction de notre éprouvette.
- Utilisation du papier vert pour plisser le tube.
- Utilisation d'un lubrifiant est nécessaire pour diminuer l'adhérence entre l'éprouvette et le moule.

#### IV.3.2. Préparation de la résine

- Préparer un mélange de 45% durcisseur et 55% de la résine époxy (% pondéral).
- Homogénéisé le mélange.

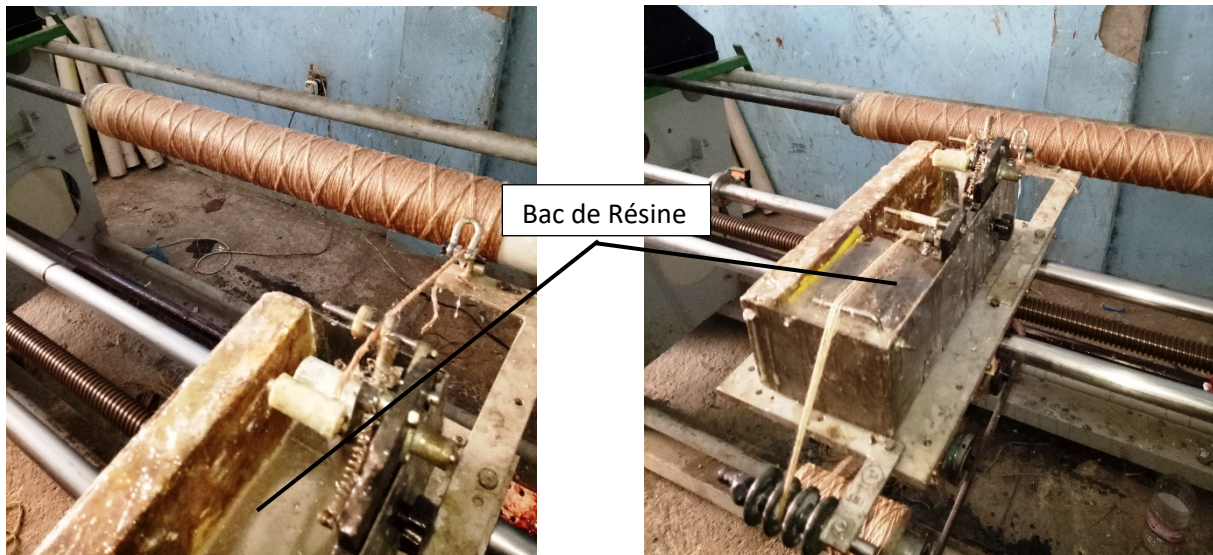


Figure IV.2 : Bac d'imprégnation.

#### IV.3.3. Préparation et calcul des paramètres de la machine

- Choisir la bonne fréquence du mandrin.

- choisir la bonne vitesse d'avancement du chariot

(Ces deux paramètres vont définir l'angle entre l'horizontal de tube et la direction du fil)

- Remplir le réservoir avec de la résine
- monter le fil sur les guide-fils et sur le moule.
- Activer le mode automatique.



**Figure IV.3:** Réglage des fréquences de translation et de rotation.



**Figure IV.4:** Fibres passant dans le bain de résine.



**Figure IV.5:** La machine en état de marche.

### IV.3.3. Angles et paramètres adéquats

Après calcul et plusieurs essais on calcule les fréquences adéquate du mandrin et de chariot pour chaque angle et on obtient le tableau suivant :

L'angle	Vitesse de rotation du mandrin (tr/min)	Vitesse de translation de chariot (tr/min)
50°	43	73
55°	40	60
60°	56	60
65°	80	60
75°	50	50
90°	150	5.5

**Tableau IV.5 :** Vitesse de rotation du mandrin et de chariot pour chaque angle.

### IV.3.4. Découpages et préparation des échantillons pour les tests :

Pour chaque catégorie des tubes on doit découper 3 échantillons de 20 mm pour les essais de traction circonférentiel et un autre de 200 mm pour un essai de compression.



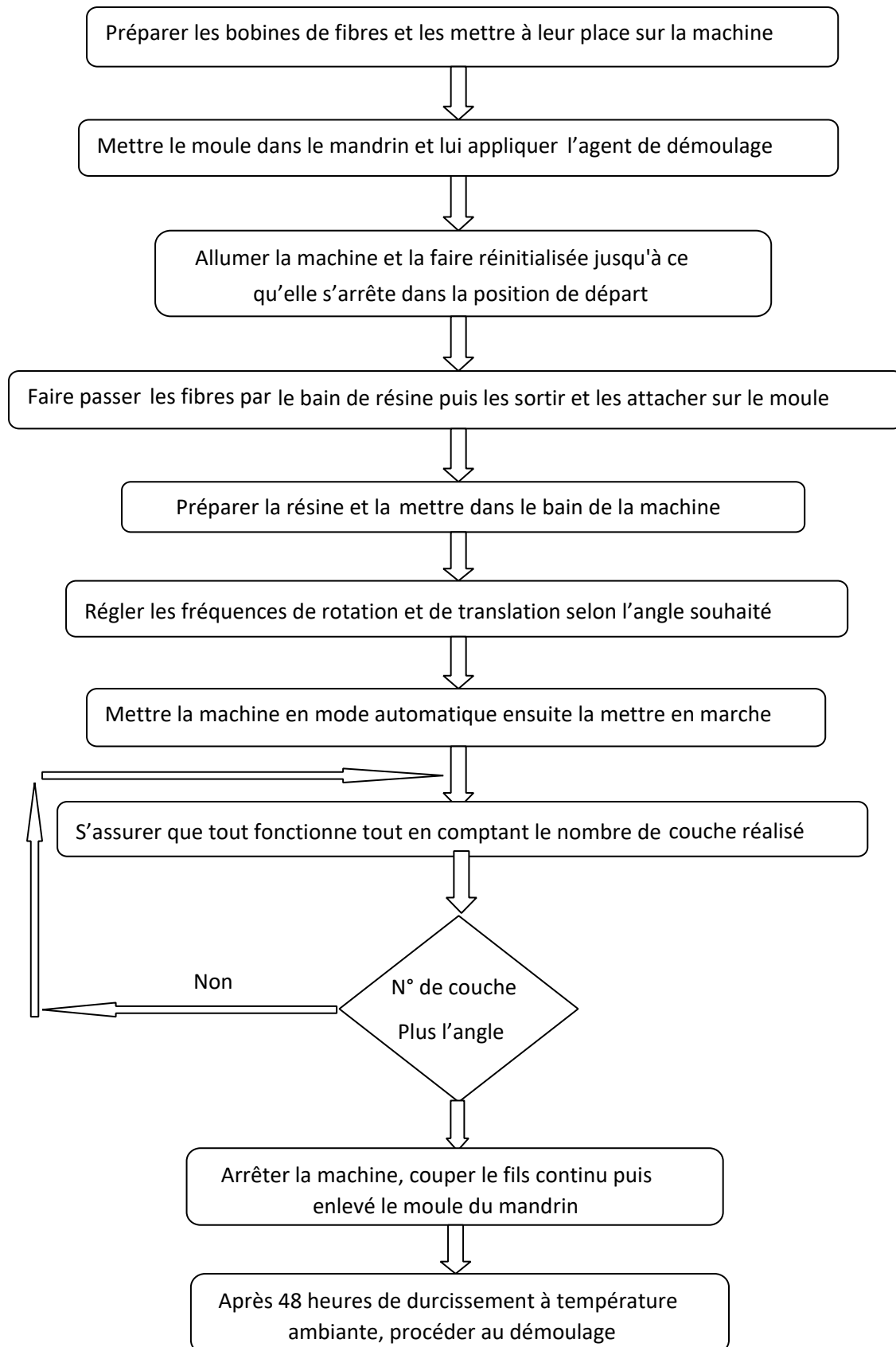


**Figure IV.6:**Découpage et préparation des échantillons pour les tests.



**Figure IV.7:** les échantillons prêts pour les essais.

Schéma descriptif de la méthode d'élaboration des tubes en fibre de jute/époxy par l'enroulement filamentaire



## IV.4.Caracterisation

### IV.4.1.Essai de traction circonférentiel

- L'essai de traction circonférentiel est fait selon la norme NF EN 14364 :

L= 25 mm (La longueur de l'anneau)

D= 91 mm (diamètre de l'anneau)

V<sub>d</sub>= 2.5 mm/s (vitesse de déplacement)

- Le module de Young circonférentiel :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

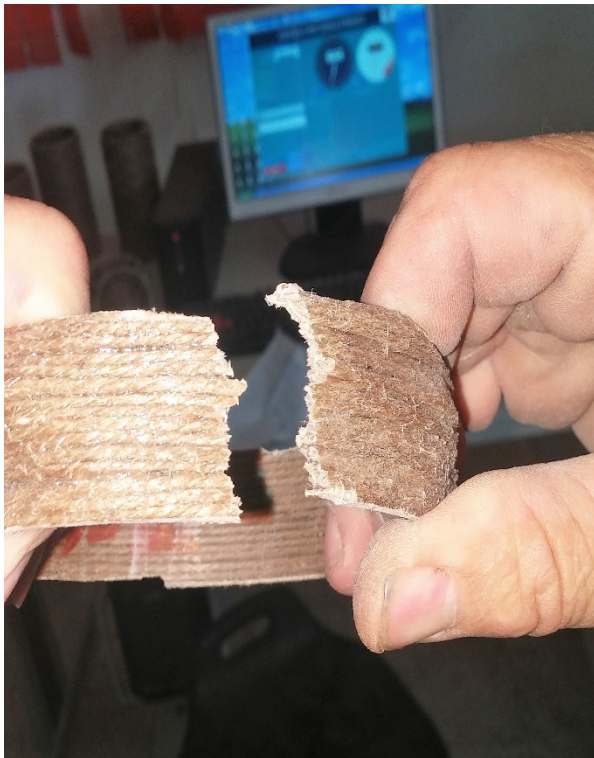
$\sigma$  est la contrainte appliqué.

$\varepsilon$  est la déformation circonférentiel

$$\varepsilon = \frac{S - S_0}{S_0}$$

S est le périmètre après déformation.

S<sub>0</sub> est le périmètre initial.



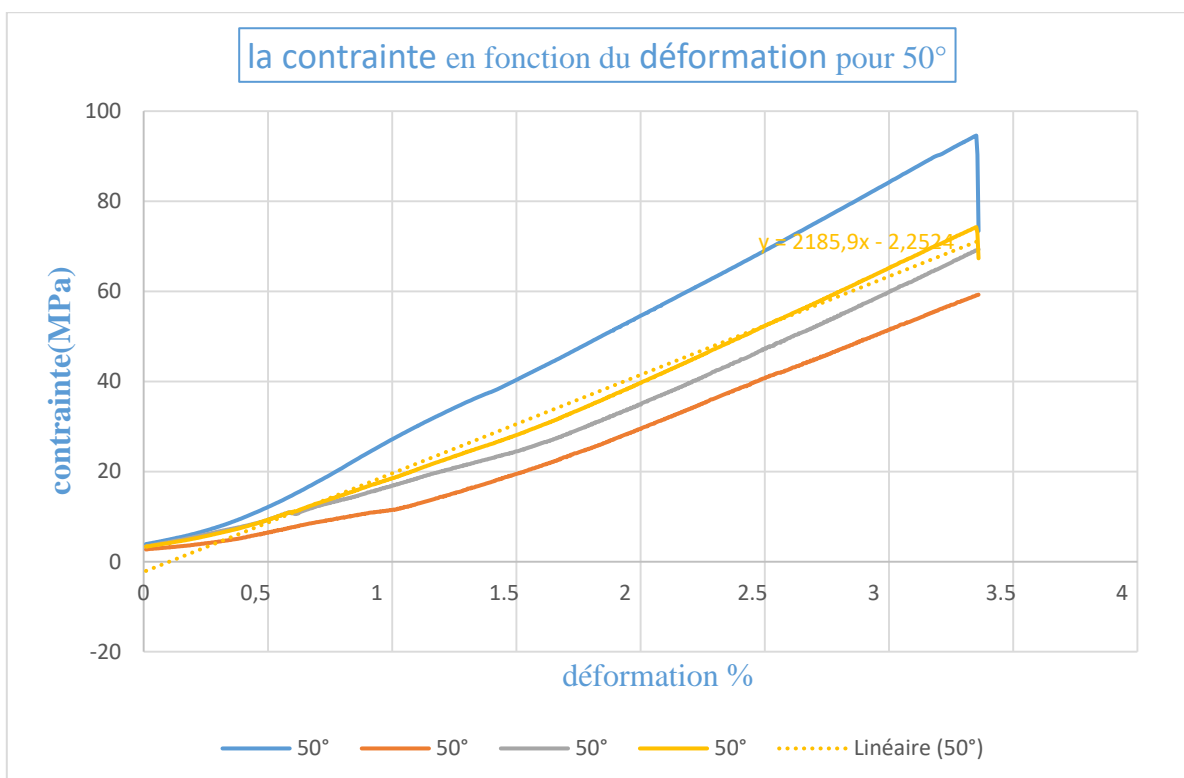
**Figure IV.8:** Essai de traction circonférentiel.

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

La partie linéaire de la courbe traduit la partie élastique, caractérisée par la linéarité de la courbe (contrainte– déformation), qui tend vers une droite d'équation  $y = A.x + B$ . Par analogie à la loi de Hook, nous pouvons déterminer le module de Young, la contrainte et l'allongement à la rupture. Ses paramètres sont présentés dans des tableaux.

#### IV.4.1.1. Tracer du graphe moyen pour les 3 essais de traction circonférentielle de chaque tube et détermination de ces paramètres

- Tube 50°



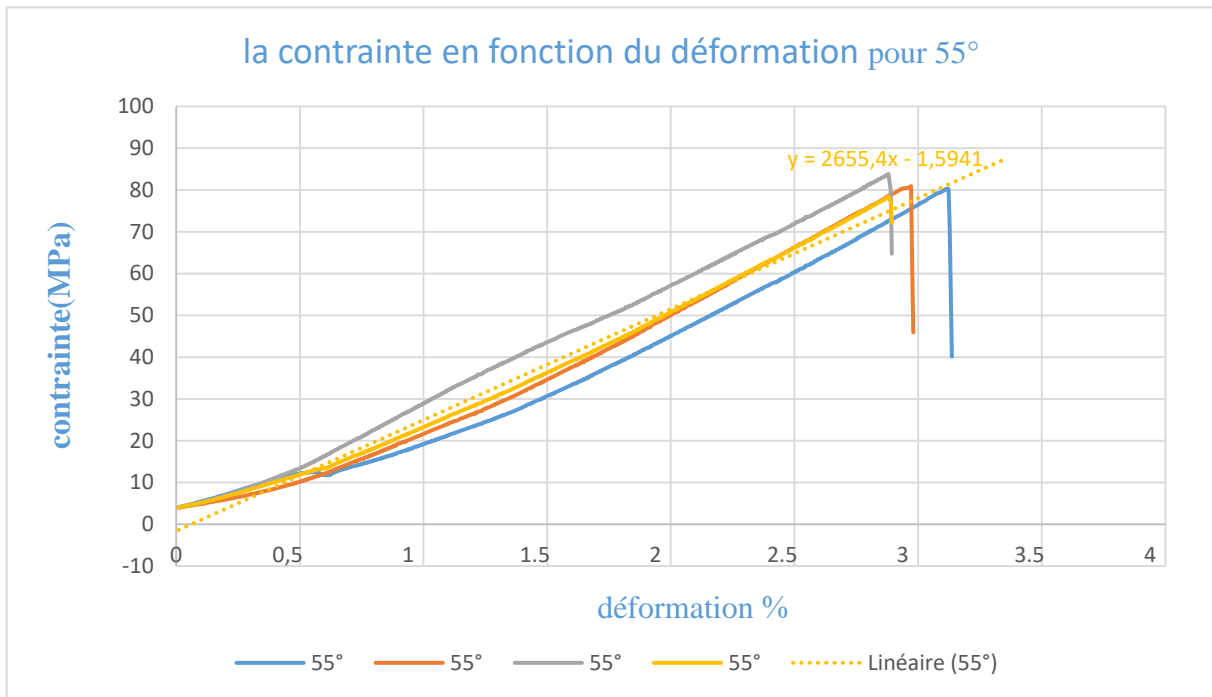
**Figure IV.9:** Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxylute (50°).

Echantillon	force maximale (N)	contrainte de cisaillement circonférentiel (N/mm)	contrainte de scissaillement (Mpa)
1er	12467	249	95
2eme	11175	219	60
3eme	11557	235	77
Moy 50°	11733	234,3333333	77,33333333

**Tableau IV.6 :** Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (50°).

La valeur du module de YOUNG circonférentiel pour le tube 50° est : 2,185 GPa

- **Tube 55°**



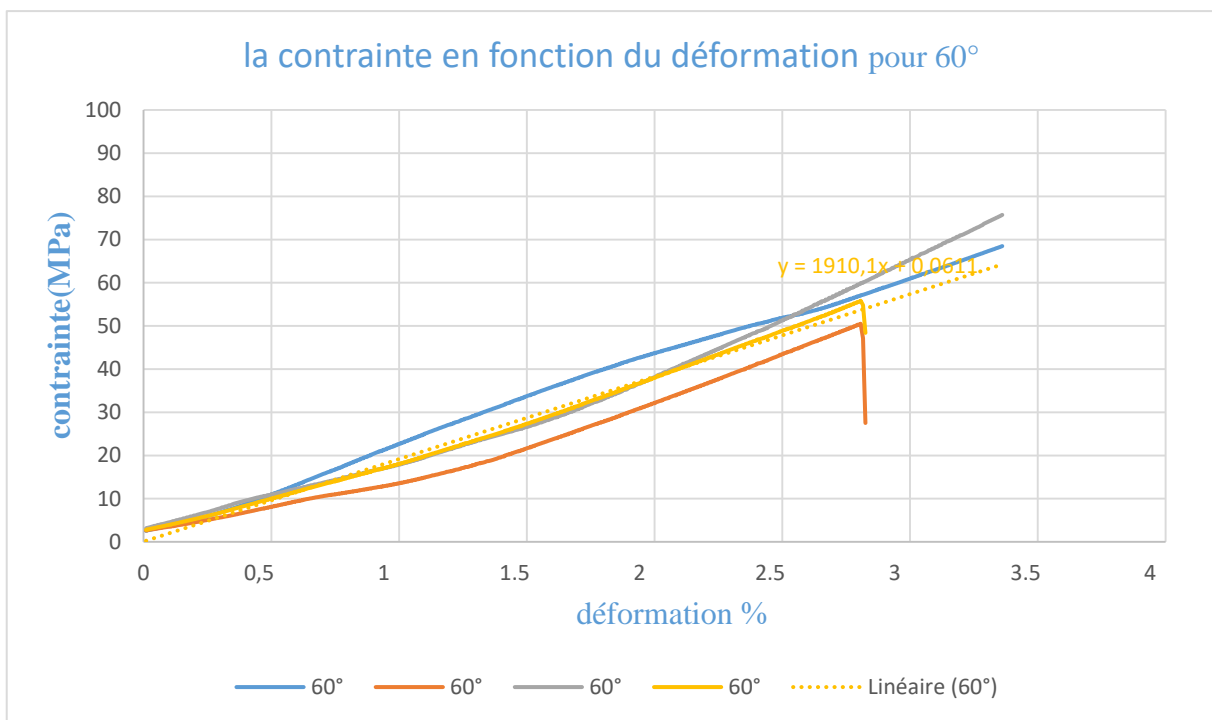
**Figure IV.10:** Comportement à la traction circonférentiel d'un tube epoxy/Jute (55°).

Echantillon	force maximale (N)	contrainte de cisaillement circonférentiel (N/mm)	contrainte de scissaillement (Mpa)
1er	10042	200	80
2eme	10432	229	81
3eme	10451	212	84
Moy 55°	10308,33333	213,6666667	81,66666667

**Tableau IV.7 :** Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (55°).

La valeur du module de YOUNG circonférentiel pour le tube 55° est : 2,655 GPa.

- **Tube 60°**



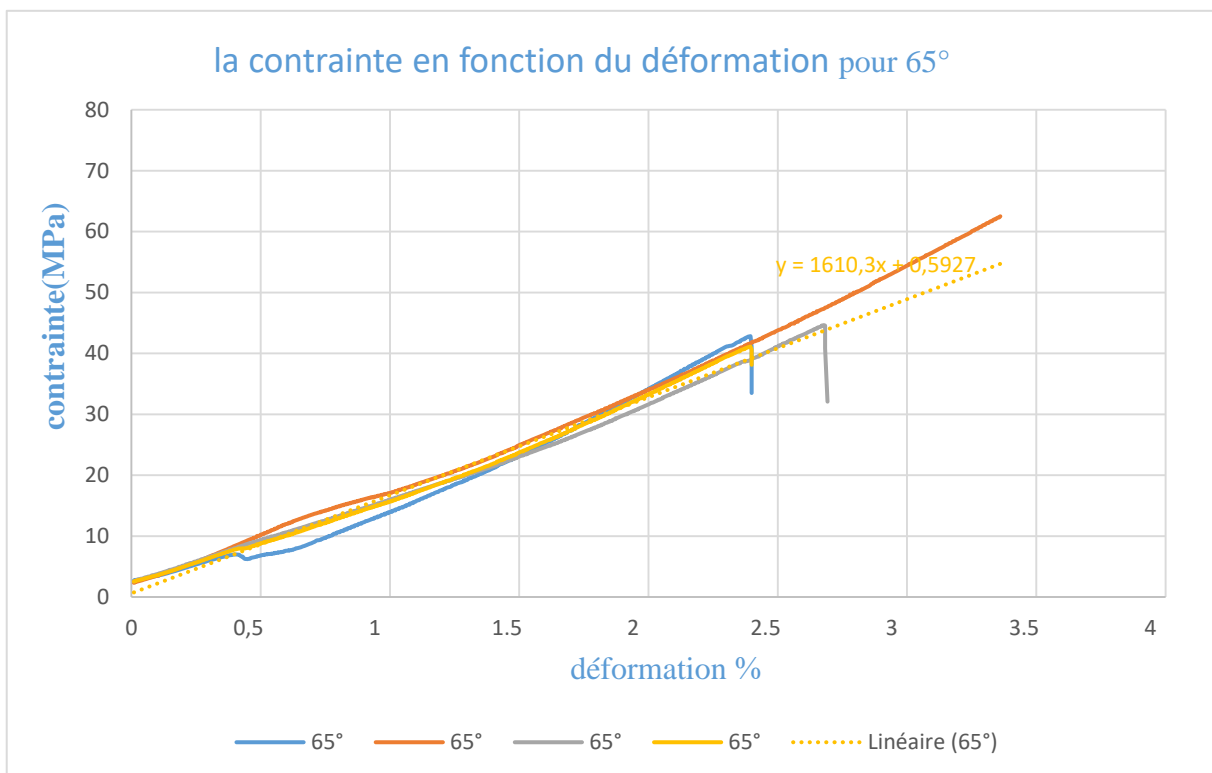
**Figure IV.11:** Comportement à la traction circonférentiel d'un tube epoxy/Jute (60°).

Echantillon	force maximale (N)	contrainte de cisaillement circonférentiel (N/mm)	contrainte de scissaillement (Mpa)
1er	15665	306	79
2eme	15392	324	72
3eme	14200	279	87
Moy 60°	15085,66667	303	79,33333333

**Tableau IV.8 :** Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (60°).

La valeur du module de YOUNG circonférentiel pour le tube 60° est : 1,910GPa.

- **Tube 65°**



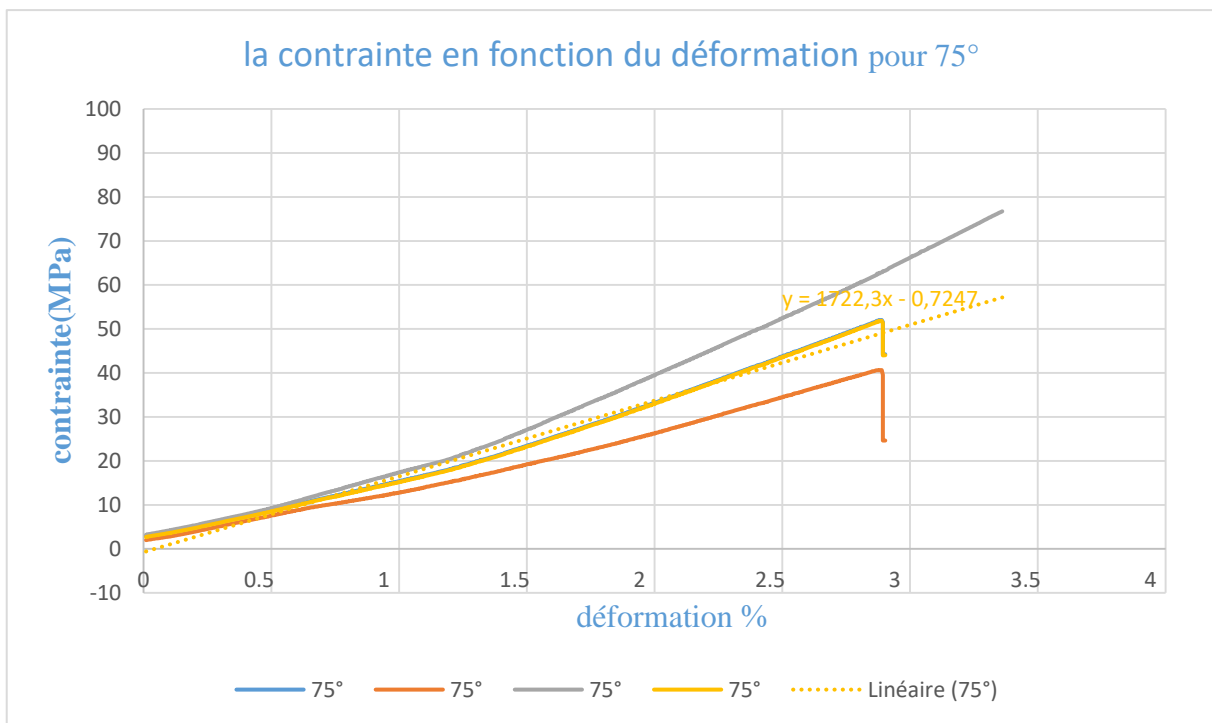
**Figure IV.12:** Comportement à la traction circonférentiel d'un tube époxy/Jute (65°).

Echantillon	force maximale (N)	contrainte de cisaillement circonférentiel (N/mm)	contrainte de scissaillement (Mpa)
1er	7940	165	43
2eme	9678	198	51
3eme	9046	195	45
Moy 65°	8888	186	46,33333333

**Tableau IV.9 :** Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (65°).

La valeur du module de YOUNG circonférentiel pour le tube 65° est : 1,610 GPa.

- **Tube 75°**



**Figure IV.13:** Comportement à la traction circonférentiel d'un tube epoxy/Jute (75°).

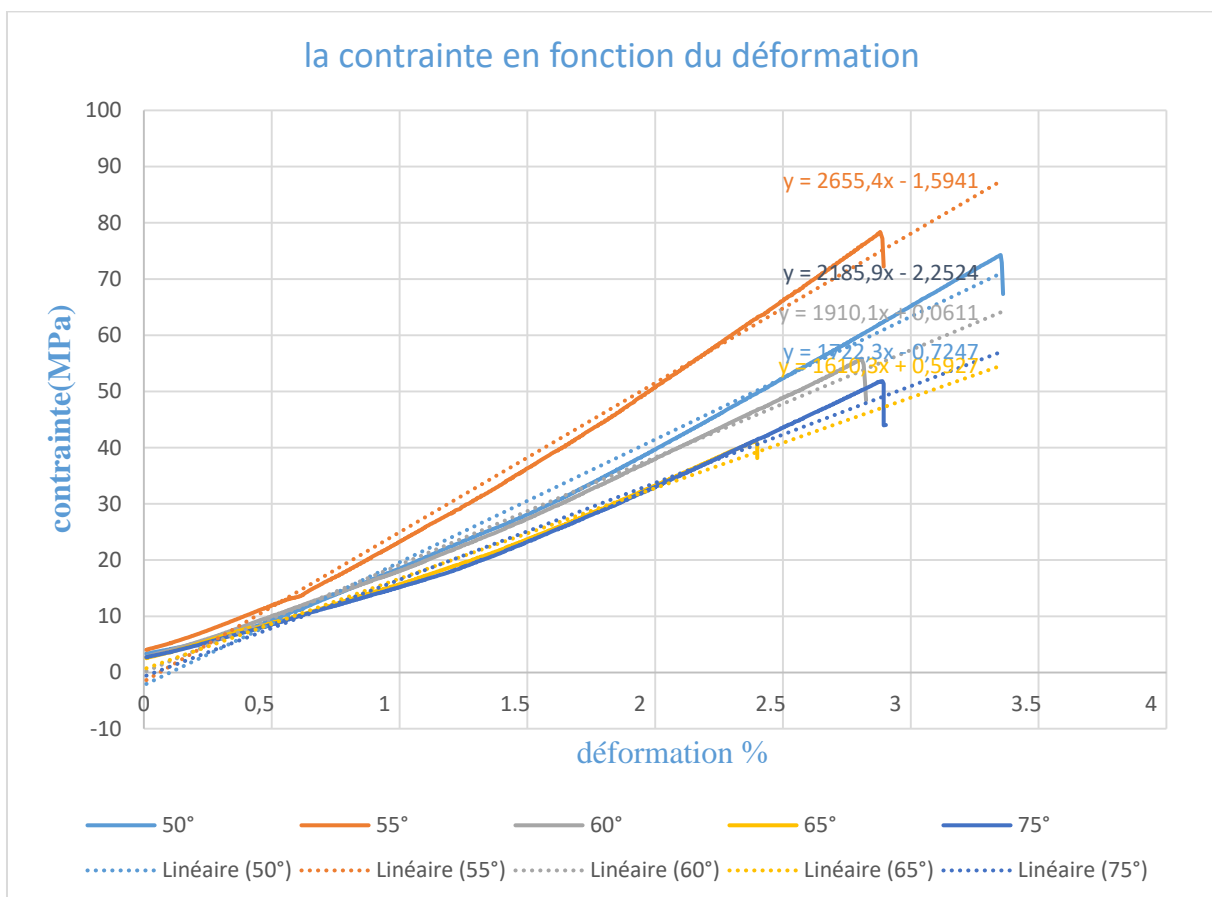


Echantillon	force maximale (N)	contrainte de cisaillement circonférentiel (N/mm)	contrainte de scissaillement (Mpa)
1er	13125	263	57
2eme	10258	195	41
3eme	13487	287	86
Moy 75°	12290	248,3333333	61,33333333

**Tableau IV.10 :** Paramètres des essais de traction circonférentiel des tubes (75°).

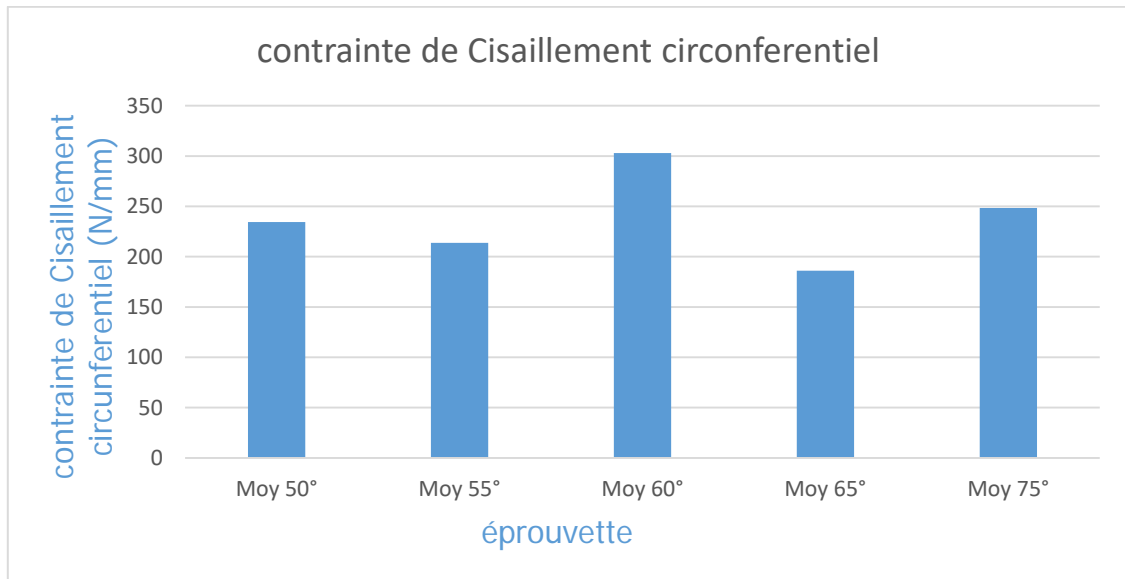
La valeur du module de YOUNG circonférentiel pour le tube 75° est : 1,722GPa

- Tracé les différents résultats dans les même graphes :

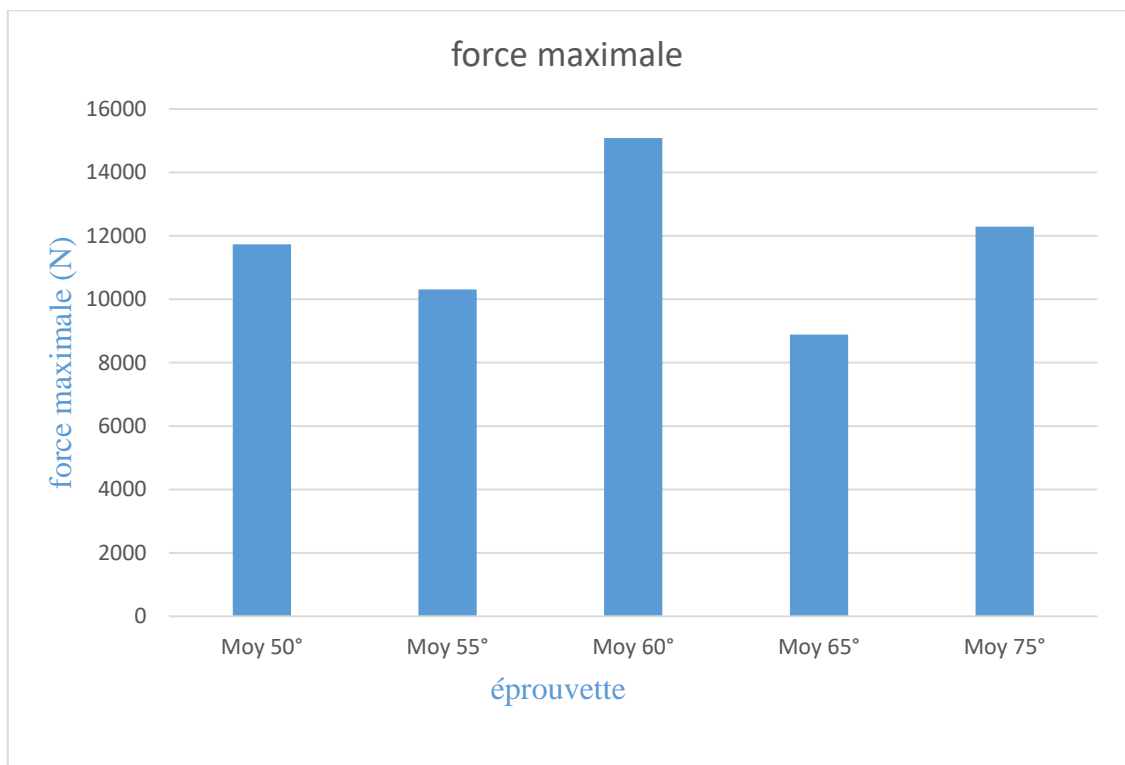


**Figure IV.14:** Comportement à la traction circonférentiel des tubes epoxy/Jute.

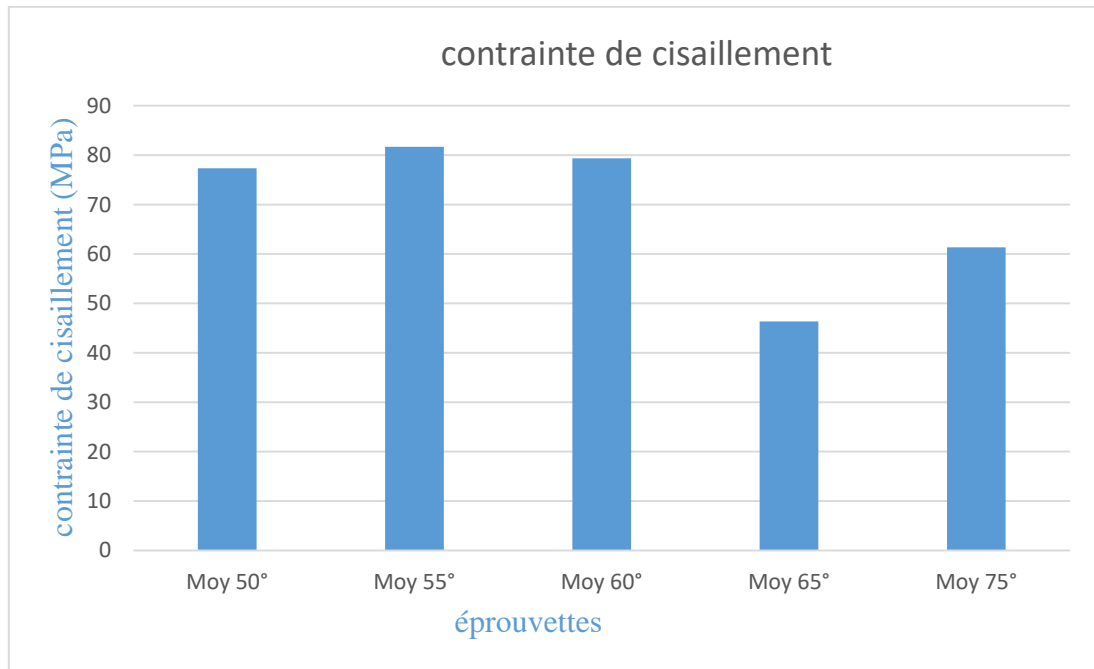
**Remarque :** les courbes sont linéaires. Ce phénomène est dû au fait que toutes les déformations produites sont élastique.



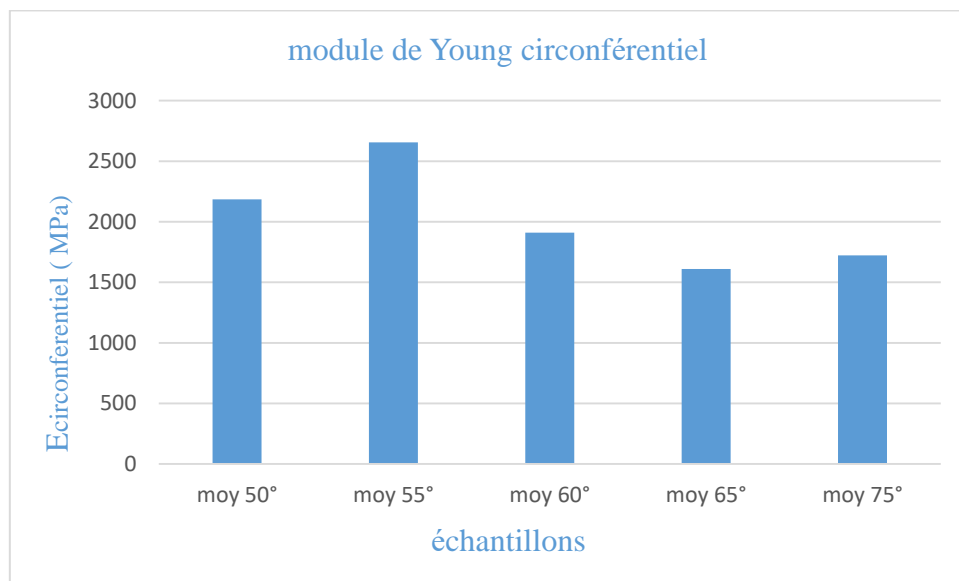
**Figure IV.15:** Contrainte de Cisaillement (rupture) circonferentielle des éprouvettes époxy/Jute.



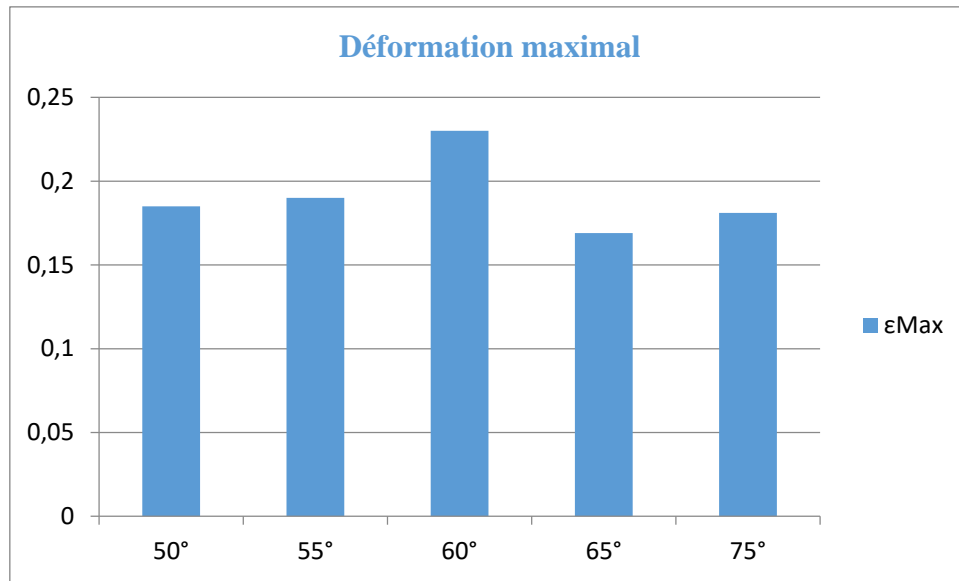
**Figure IV.16:** Force maximale des éprouvettes époxy/Jute.



**Figure IV.17:** Contrainte de cisaillement (rupture) des éprouvettes époxy/Jute.



**Figure IV.18:** Module de Young circonférentiel des éprouvettes époxy/Jute.



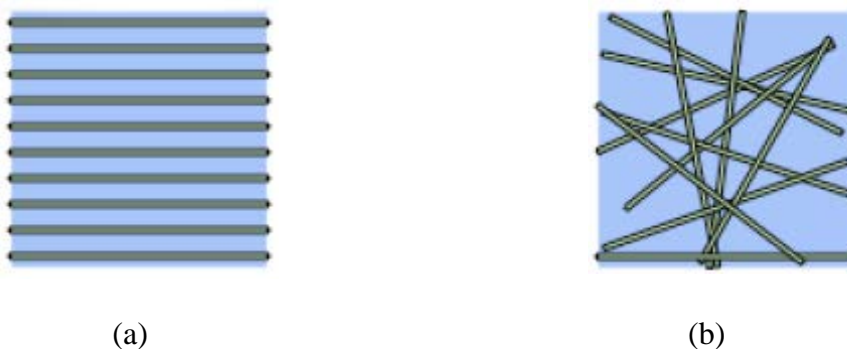
**Figure IV.19:** Déformation maximal des éprouvettes époxy/Jute.

Les histogrammes des figures 15, 16, 17, 18 et 19 présentent les modules de Young, les contraintes et les déformations maximal calculées en fonction d'angle d'enroulement, on constate que les valeurs maximums sont marquées pour un angle compris entre 55° et 60°,

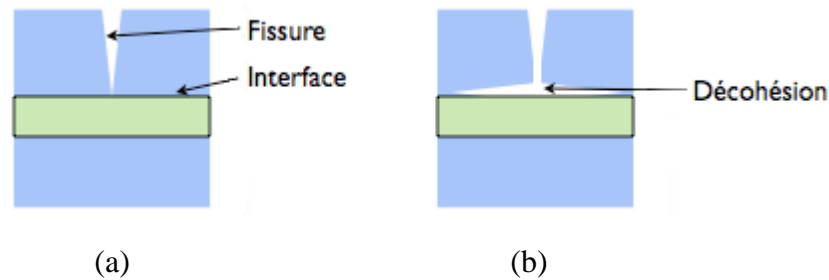
Cela est expliqué par une bonne réparation des contraintes appliquées sur le composite dans cette orientation (55°-60°).

À chaque fois que le renfort tend à être unidirectionnel des sections de très faibles densités de fibre de jute se créent dans le tube, ce qui favorise la fissuration de la matrice dans ces sections ensuite la rupture des fibres.

De la figure IV.15 et figure IV.17 on constate que notre matériaux offre une meilleure résistance à la rupture dans le cas des contraintes de cisaillement circonférentiels que celles en traction et cela confirme notre choix d'enroulement hélicoïdal qui offre une bonne résistance transversal que longitudinal.



**Figure IV.20 :** (a) Fibres unidirectionnelle, (b) Fibres en tissu.



**Figure IV.21** : Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites : lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b). Au lieu d'une rupture brutale, on observe donc une décohésion progressive des constituants.

#### IV.4.2.Essai de rigidité

##### IV.4.2.1.Rigidité annulaire spécifique S

Caractéristique physique du tube exprimée en newtons par mètre carré (N/m<sup>2</sup>). C'est une mesure de la résistance à la déformation annulaire par mètre de longueur sous charge externe, définie par la Formule (1) :

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} \dots (1)$$

E est le module apparent d'élasticité, calculé à partir du résultat de l'essai de rigidité annulaire, c'est-à-dire l'ISO 7685, exprimé en newtons par mètre carré (N/m<sup>2</sup>).

dm est le diamètre moyen du tube, en mètres (m).

I est le second moment d'aire de la section du tube dans le sens longitudinal par mètre de longueur, en mètres à la puissance quatre par mètre (m<sup>4</sup>/m), [voir la Formule (2)].

$$I = \frac{e^3}{12} \dots (2)$$

Où e est l'épaisseur de la paroi, en mètres (m)



**Figure IV.22:**Machine d'essai de compression (rigidité).

#### IV.4.2.2. Tracer du graphe pour essais de rigidité de chaque tube et détermination de ces paramètres

##### Tube 50°

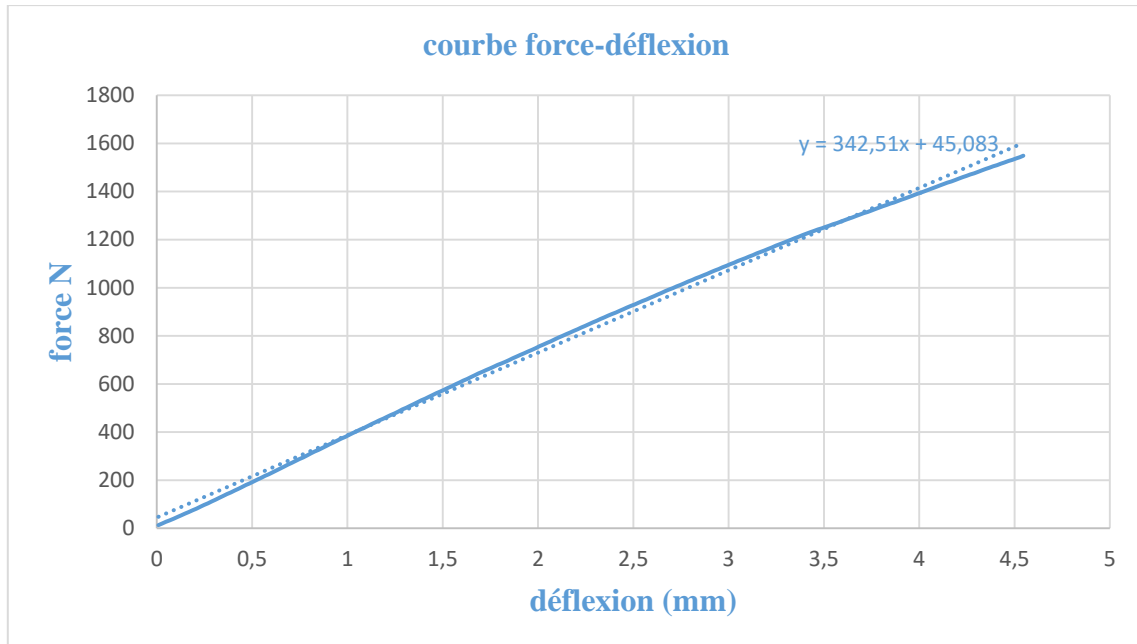


Figure IV.23: Essai de rigidité d'un tube epoxy/Jute (50°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	1555,00
rigidité	N/m <sup>2</sup>	34262
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	13007
Epaisseur	m	0,00297

Tableau IV.11 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (50°).

- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.00297)^3}{12} = 2.183 \cdot 10^{-9}$$

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} = \frac{34262 * 2.183 * 10^{-9}}{0.091^2} = 0.09$$

$$S = 0.09 \text{ N/m}^2$$

## Tube 55°

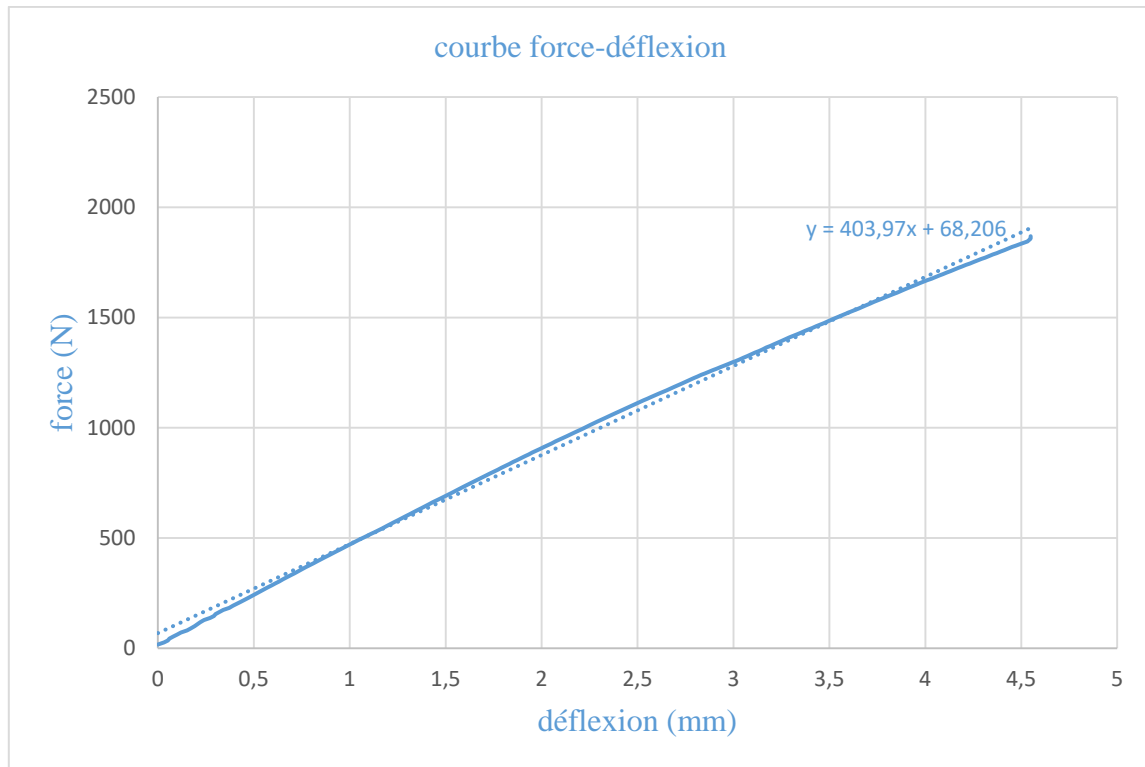


Figure IV.24: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (55°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	1873
rigidité	N/m <sup>2</sup>	41280
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	12452
Epaisseur	m	0,00322

Tableau IV.12 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (55°).

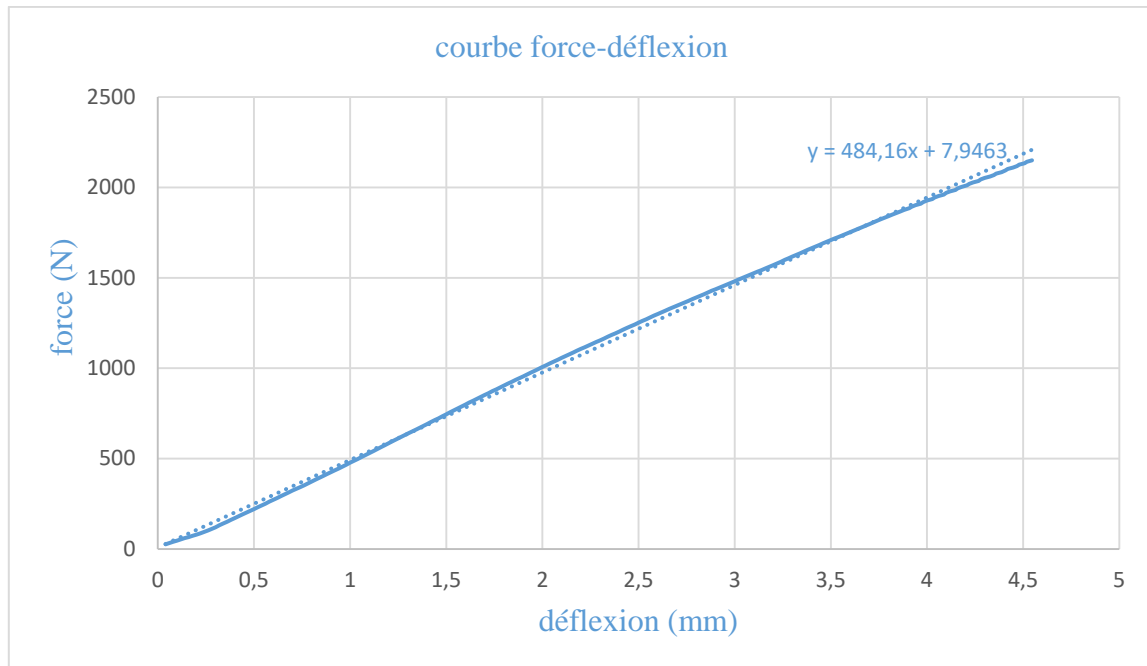
- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.00322)^3}{12} = 2.782 \cdot 10^{-9}$$

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} = \frac{41280 * 2.782 * 10^{-9}}{0.091^2} = 0.013$$

$$S = 0.013 \text{ N/m}^2$$



**Tube 60°****Figure IV.25:** Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (60°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	2158
rigidité	N/m <sup>2</sup>	47726
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	10116
Epaisseur	m	0,00363

**Tableau IV.13 :** Paramètres de l'essai rigidité du tube (60°).

- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.00363)^3}{12} = 3.986 \cdot 10^{-9}$$

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} = \frac{47726 * 3.986 * 10^{-9}}{0.091^2} = 0.022$$

$$S=0.022 \text{ N/m}^2$$

## Tube 65°

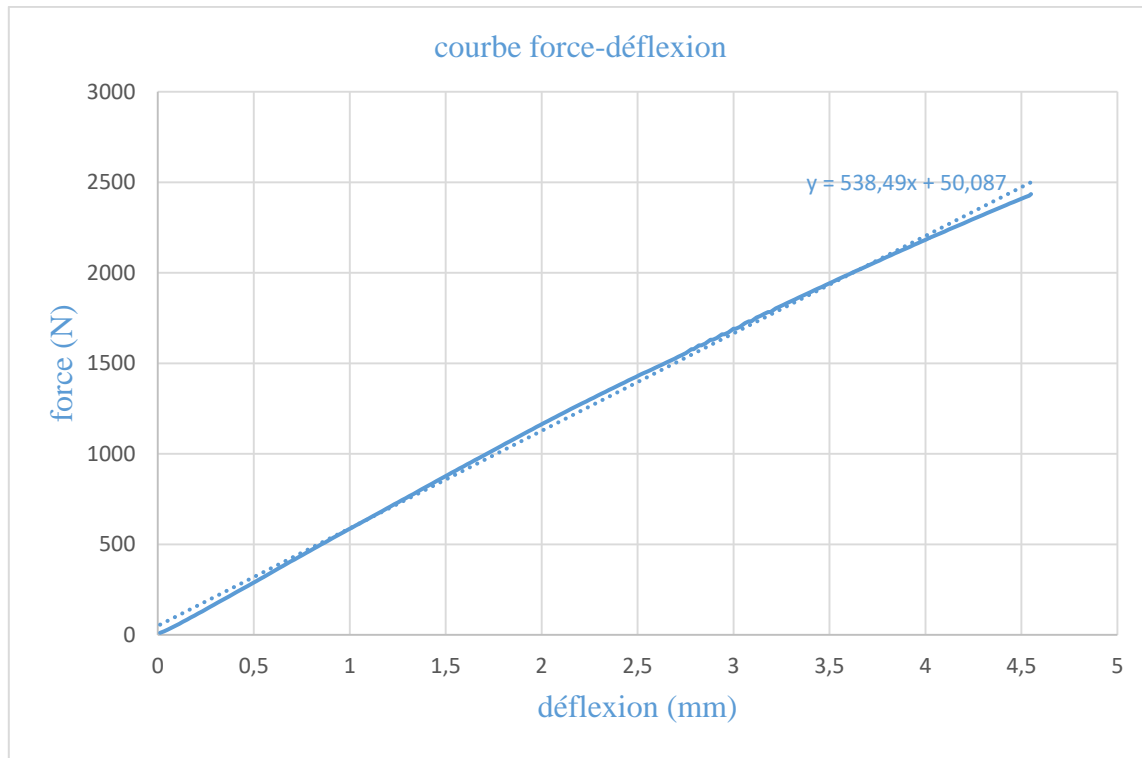


Figure IV.26: Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (65°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	2987
rigidité	N/m <sup>2</sup>	54352
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	10587
Epaisseur	m	0,004

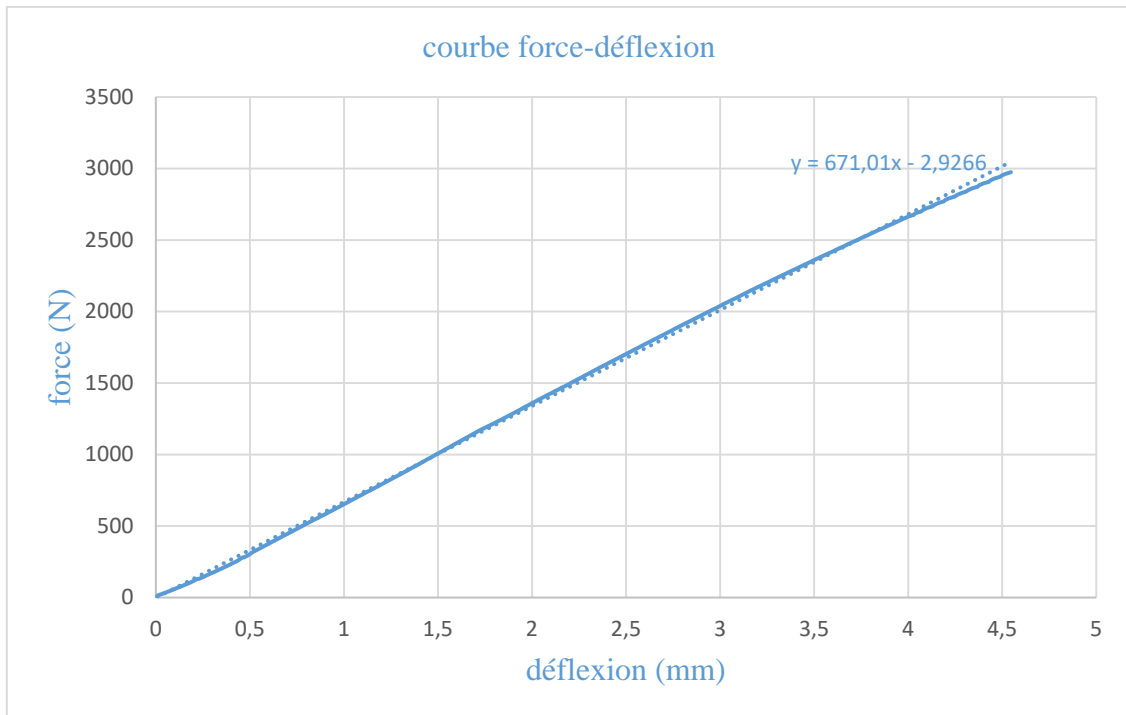
Tableau IV.14 : Paramètres de l'essai rigidité du tube (65°).

- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.004)^3}{12} = 5.333 \cdot 10^{-9}$$

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} = \frac{65737 * 5.333 * 10^{-9}}{0.091^2} = 0.042$$

$$S = 0.042 \text{ N/m}^2$$

**Tube 75°****Figure IV.27:** Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (75°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	2436
rigidité	N/m <sup>2</sup>	65737
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	11566
Epaisseur	m	0,00363

**Tableau IV.15 :** Paramètres de l'essai rigidité du tube (75°).

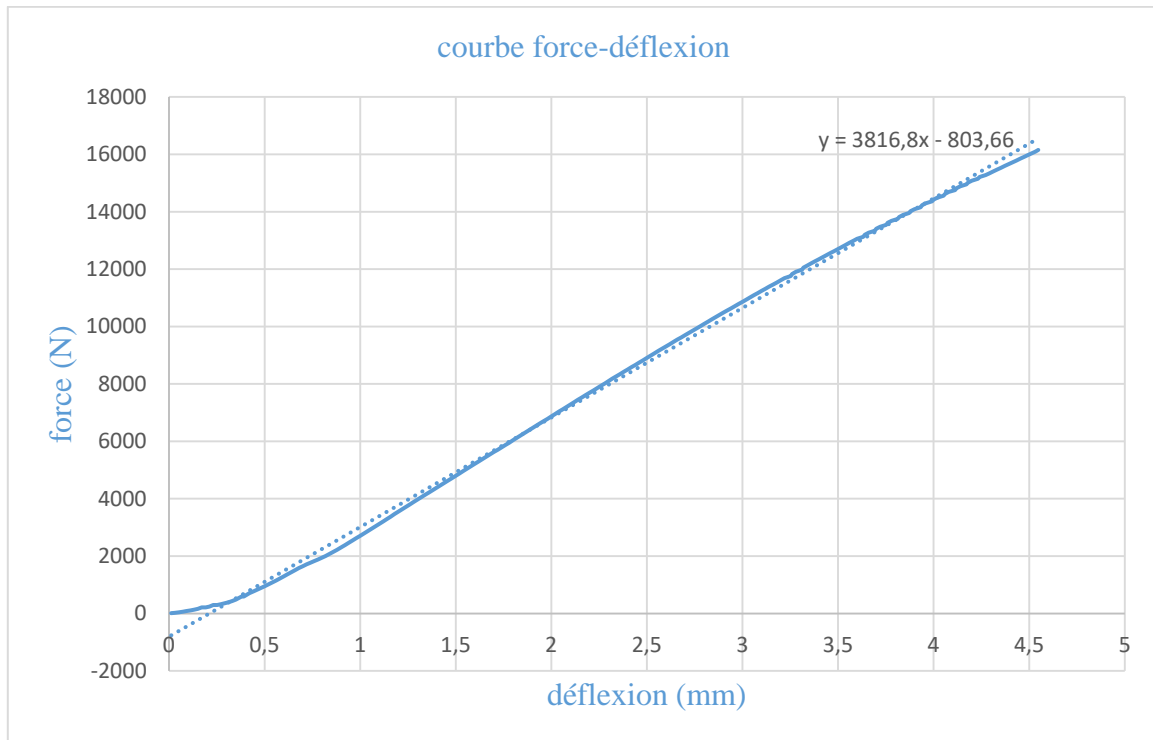
- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.00363)^3}{12} = 3.986 \cdot 10^{-9}$$

$$S = \frac{E * I}{d_m^2} = \frac{54352 * 3.986 * 10^{-9}}{0.091^2} = 0.026$$

$$S = 0.026 \text{ N/m}^2$$

**Tube 90°**



**Figure IV.28:** Essai de rigidité d'un tube époxy/Jute (90°).

Déflexion	mm	4,55
Force à la Déflexion	N	16215
rigidité	N/m <sup>2</sup>	158606
EHF (**)	N/mm <sup>2</sup>	7226
Epaisseur	m	0,00834

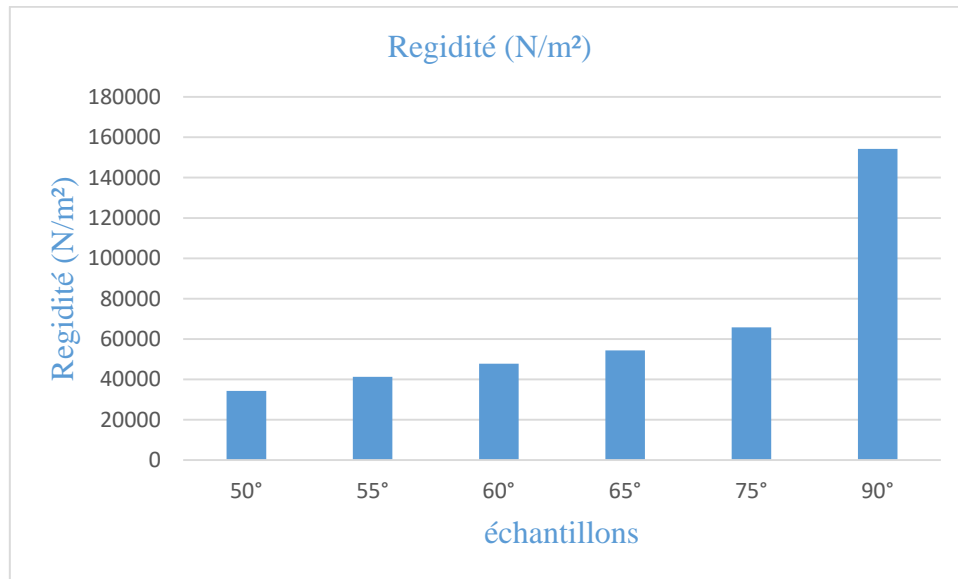
**Tableau IV.16 :** Paramètres de l'essai rigidité du tube (90°).

- Rigidité annulaire spécifique S :

$$I = \frac{e^3}{12} = \frac{(0.00834)^3}{12} = 4.834 \cdot 10^{-8}$$

$$S = \frac{E \cdot I}{d_m^2} = \frac{356606 \cdot 4.834 \cdot 10^{-8}}{0.091^2} = 2.08$$

$$S = 2.08 \text{ N/m}^2$$



**Figure IV.29:** Rigidité des éprouvettes époxy/Jute.

L'histogramme de la figure IV.29 présente les rigidités en fonction d'angle d'enroulement, on constate que les valeurs maximums sont marquées pour l'angle de 90°, suivie par les angles 75 et 65° respectivement cela est expliquée par l'angle entre l'axe des efforts appliqués et l'axe des angles d'enroulement, dans le cas d'angle 90° l'axe des efforts est perpendiculaire sur l'angle d'enroulement.

#### IV.4.3. Essai de traction

Préparation des éprouvettes :

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



**Figure IV.30:** Préparation des éprouvettes.

Les essais de traction longitudinal sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type Zwick/Roell Z250 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE,

dotée d'un capteur de force de capacité 250 KN et d'un extensiomètre. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 9.0.

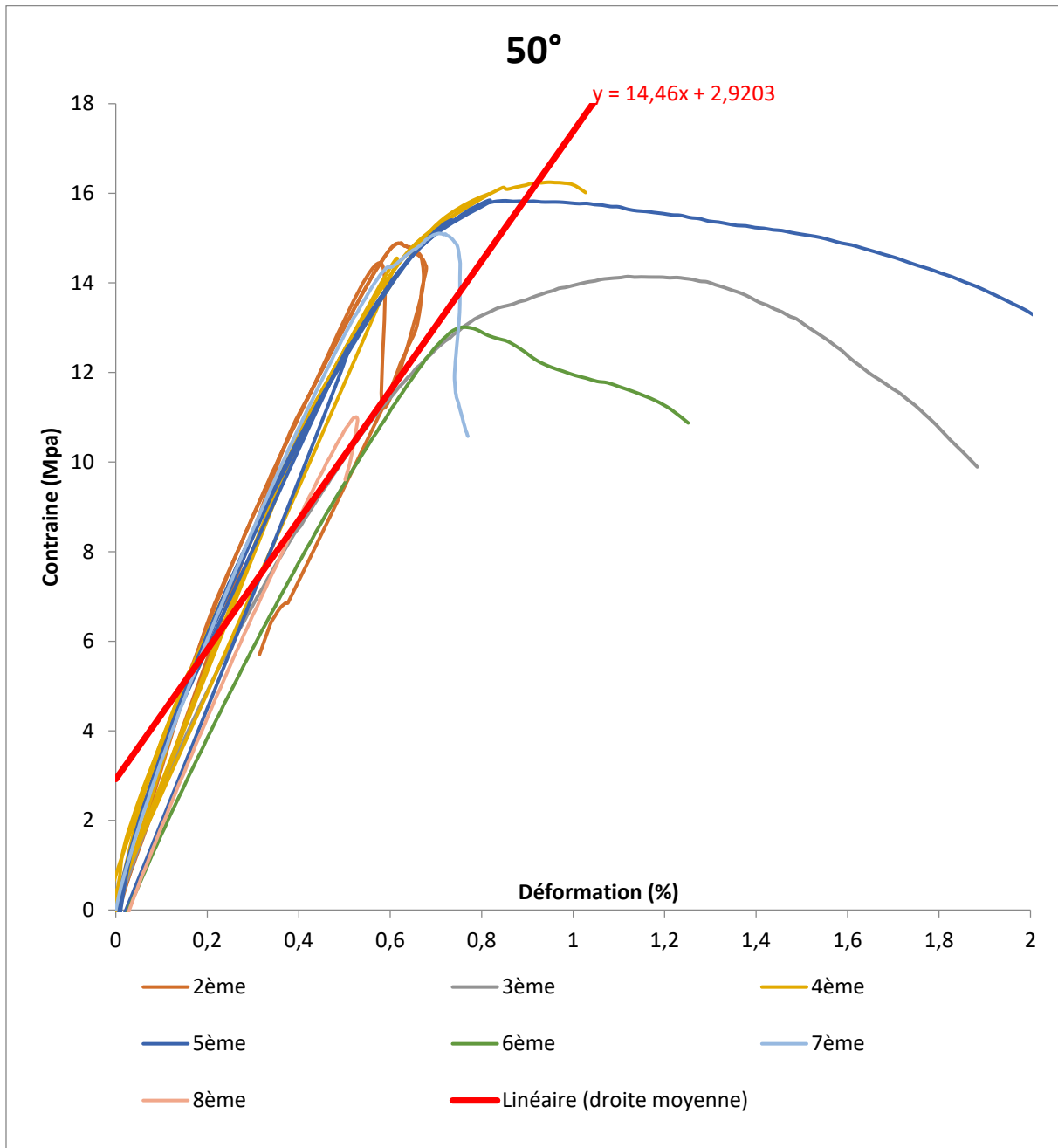


**Figure IV.31:** Machine de traction Zwick/Roell.

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.

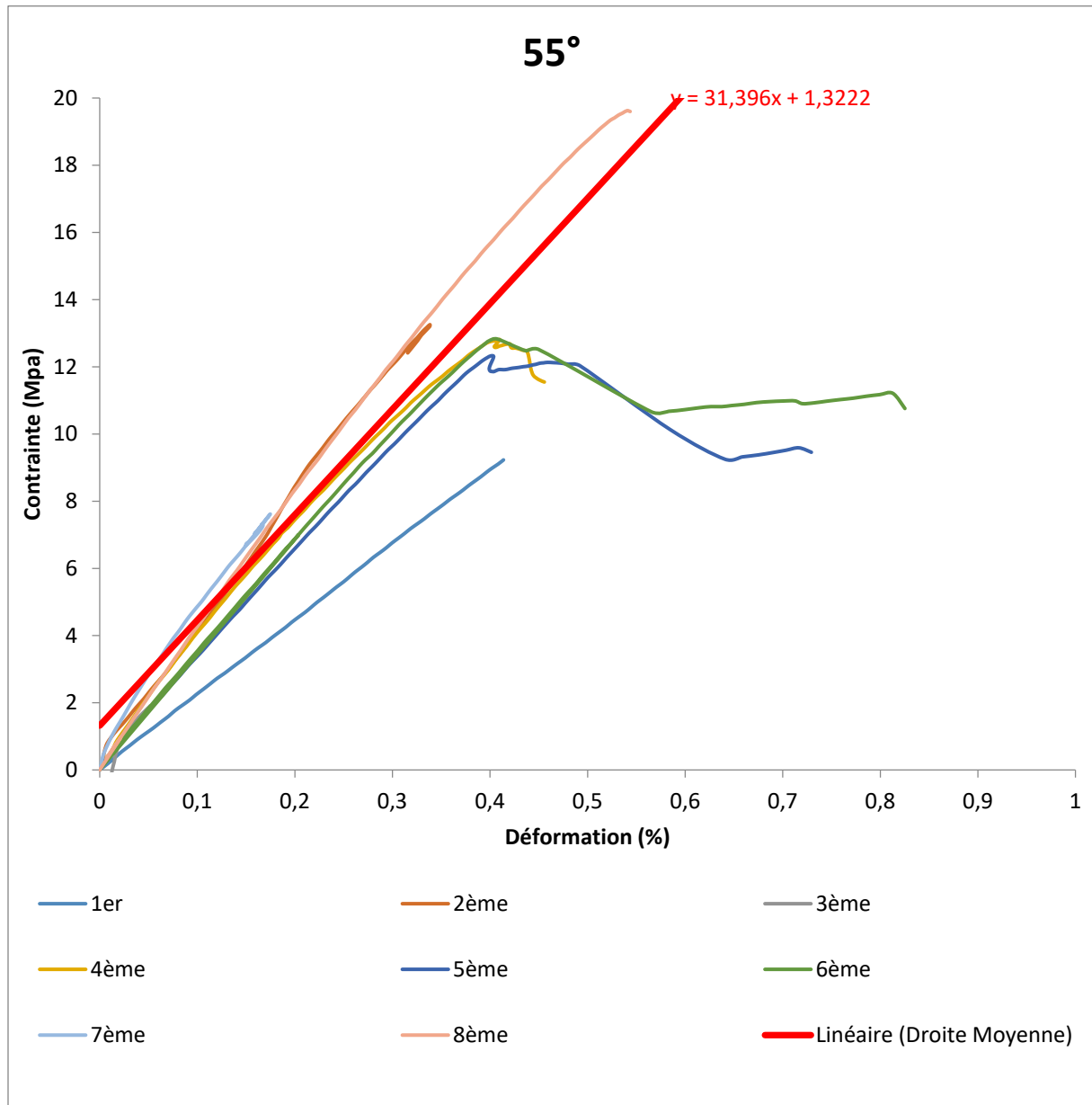
Graphe représentant la droite moyenne des courbes des 8 essais effectués sur des éprouvettes avec un angle 50°.



**Figure IV.32:** Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°).

La valeur du module de YOUNG de traction pour le tube 50° est : 1,446GPa

Graphe représentant la droite moyenne des courbes des 8 essais effectués sur des éprouvettes avec un angle  $55^\circ$ .

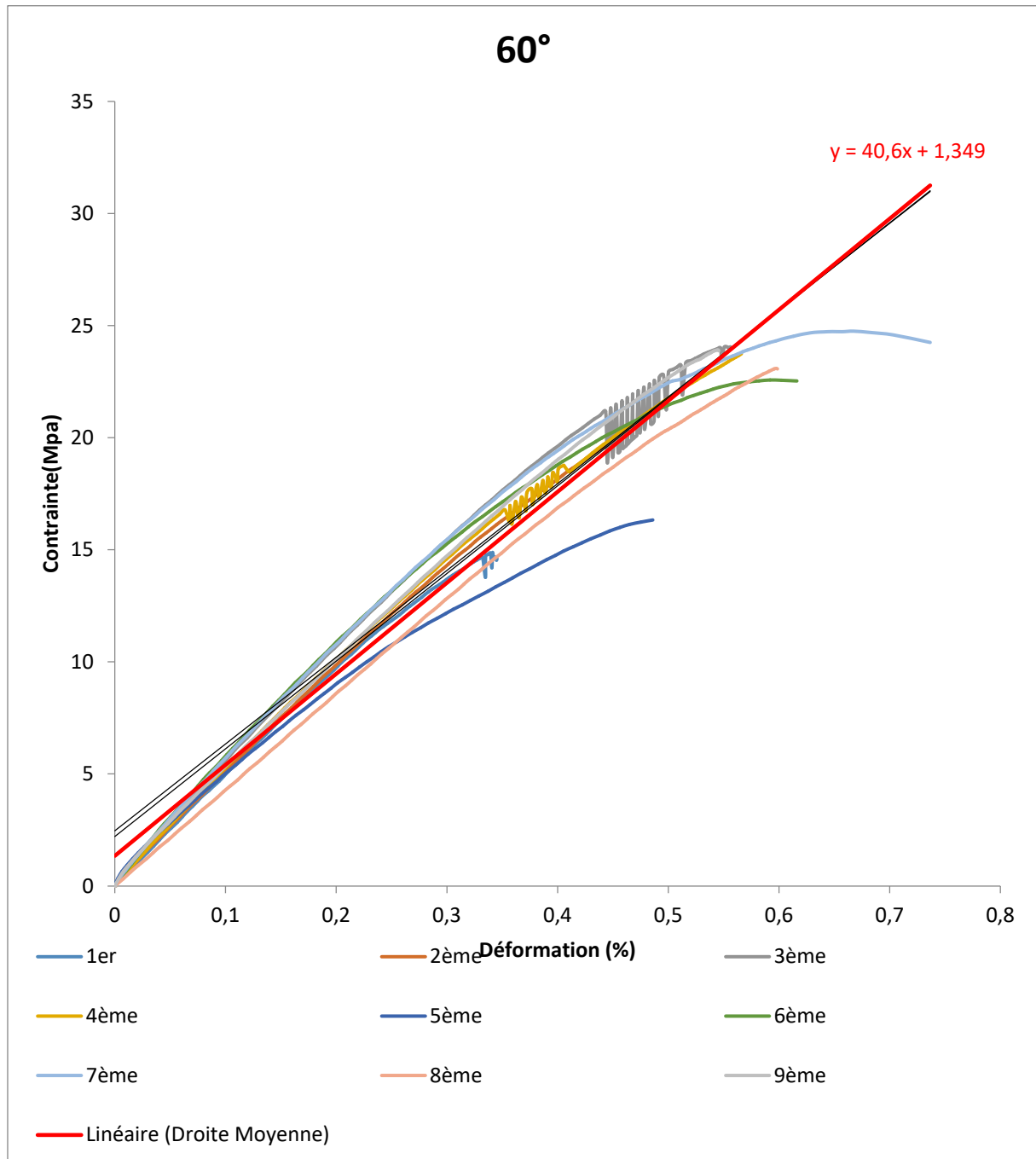


**Figure IV.33:** Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute ( $55^\circ$ ).

La valeur du module de YOUNG de traction pour le tube  $50^\circ$  est : 3,1396GPa



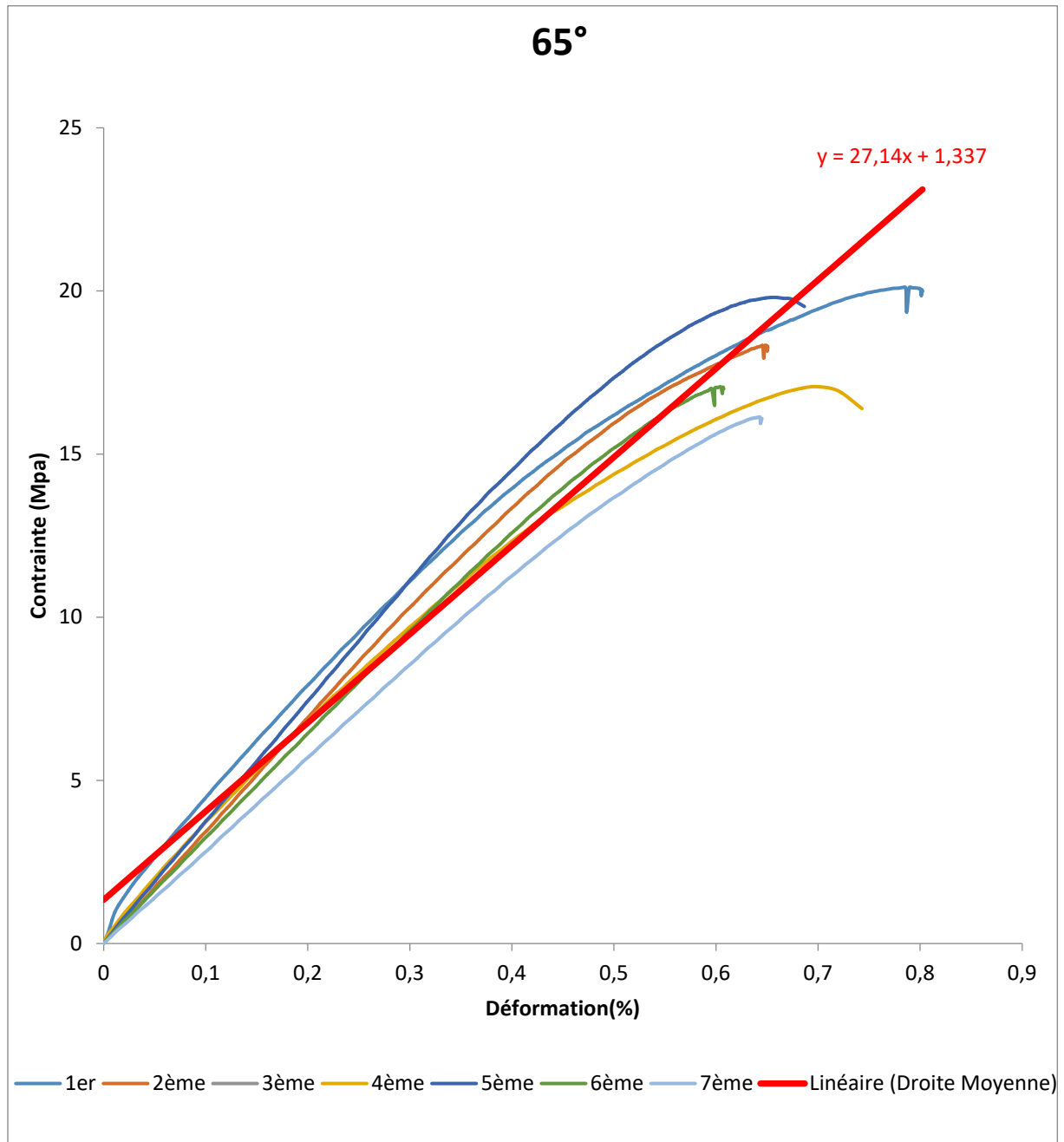
Graphe représentant la droite moyenne des courbes des 9 essais effectués sur des éprouvettes avec un angle 60°.



**Figure IV.34:** Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (60°).

La valeur du module de YOUNG de traction pour le tube 50° est : 4,06GPa

Graphe représentant la droite moyenne des courbes des 7 essais effectués sur des éprouvettes avec un angle  $65^\circ$ .

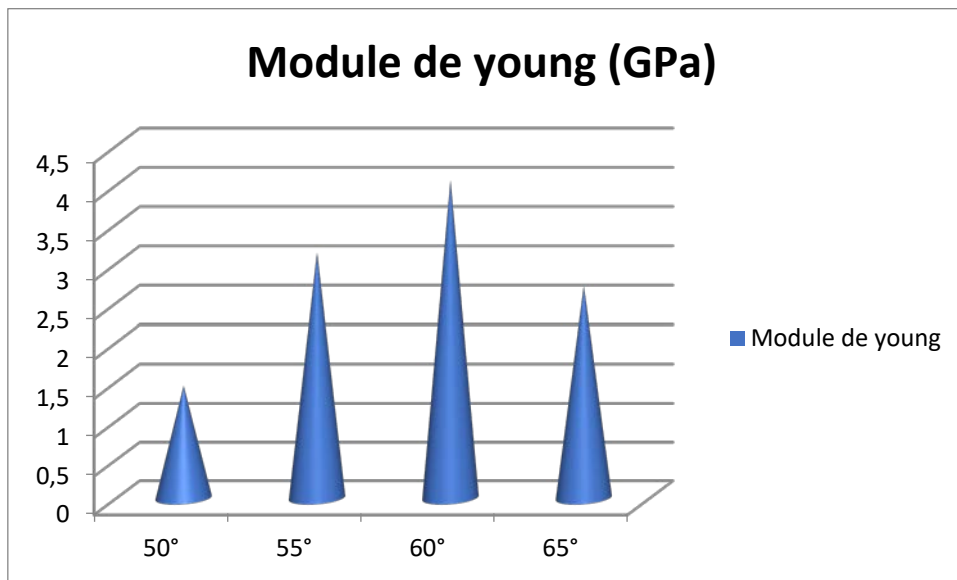


**Figure IV.35:** Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute ( $65^\circ$ ).

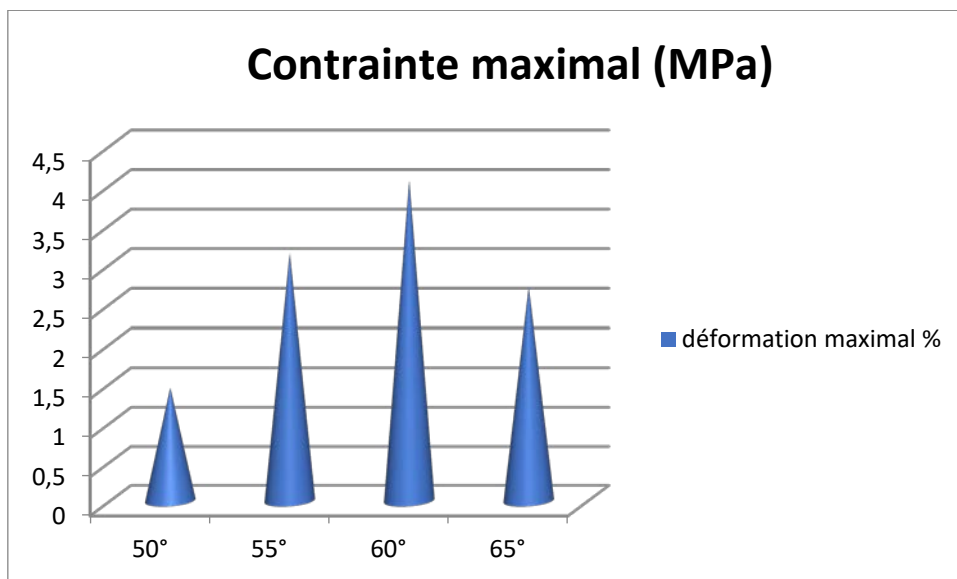
La valeur du module de YOUNG de traction pour le tube  $50^\circ$  est : 2,714GPa

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

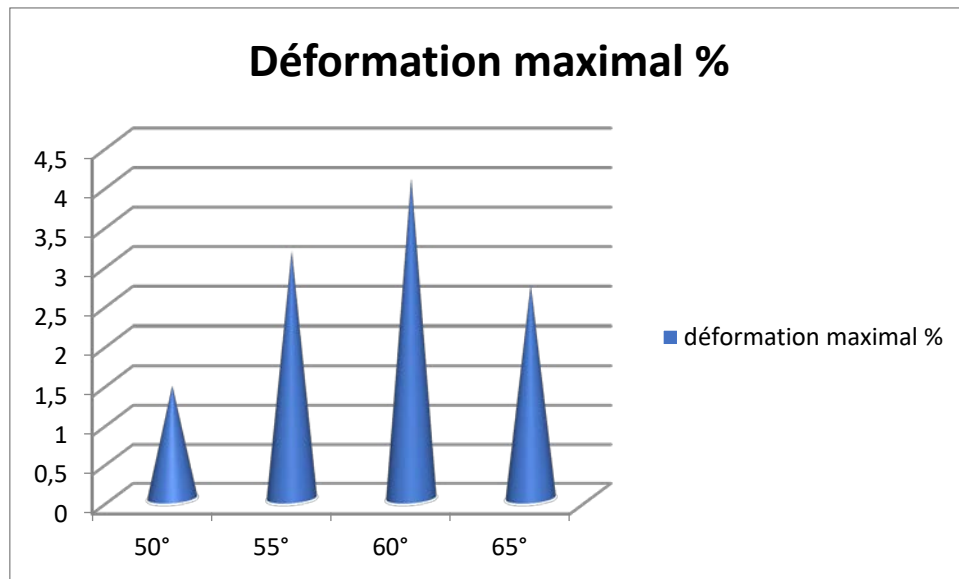
**Tableau IV.17 :** Paramètres des essais de traction des tubes.



**Figure IV.36:** comparaison du module de Young des 4 catégories des tubes à différents degrés.



**Figure IV.37:** Comparaison des contraintes maximal des 4 catégories des tubes à différents degrés.



**Figure IV.38:** Comparaison des déformations maximal des 4 catégories des tubes à différents degrés.

L'histogramme de la figure IV.38 présente les modules de Young, déformation maximale et les contraintes maximales en fonction de l'angle d'enroulement, on constate que les valeurs maximales sont marquées aux angles 55° et 60°.

Ces résultats confirment le fait d'existence des sections à faible densité de fibre (fibres unidirectionnelles) qui causent la diminution des caractéristiques du matériau.

#### IV.5. Conclusion

Ces essais montrent que l'angle d'enroulement est très important lors de l'élaboration des matériaux composites et pour le cas jute/époxy l'angle 60° donne de meilleurs résultats.

Le matériau composite a des caractéristiques meilleures que les deux matériaux qui le constituent si on les prend séparément donc la définition des matériaux composites est belle et bien vérifiée.

D'après nos résultats on déduit que l'angle d'enroulement est choisi selon la fonction de la pièce par exemple pour des usages en compression on choisit l'angle 90° si non pour d'autres fonctionnalités on choisit les angles entre 55° et 60°.

## Conclusion générale

Le domaine des composites est très vaste et demande beaucoup d'effort, le travail que nous avons réalisé nous a permis de connaître quelque difficulté que rencontre le fabricant de Pipe en composites; cet expérience nous a permis de se faire connaissance a cette activité.

La fabrication des canalisations en PRV (Pipe Résine Verre) est une industrie nouvelle en Algérie utilisant le procédés d'enroulement filamentaire. Notre idée basée sur l'exploitation de cette technique pour l'élaboration des matériaux dites biocomposites, en remplaçant les fibres de verre par des fibres de jute, dans ce cadre une machine à été fabriqués l'année passée à Haizer wilaya de Bouira par monsieur Kari djamal eddine docteur a l'UMBB, pour la fabrication des tuyaux de différentes diamètre ,dans notre cas nous avons utilisé un diamètre nominale de 91 mm avec différentes angles d'enroulement, on changeant les vitesses du mandrin ainsi que les vitesses du système de translation. Le pas de l'enroulement utilisé dans cette machine est de 3 fils.

Les essais de contrôle et de caractérisation sont réalisés au niveau de l'UR-MPE, les résultats trouvés permettent de tiré la conclusion suivante :

- Pour un angle d'enroulement compris entre  $55^\circ$  et  $60^\circ$ , les performances des tubes obtenues en fibre naturel sont les plus élevé.

Recommandations :

Ce travail n'est qu'une ébauche et constitue une introduction dans le domaine de la mise en œuvre des matériaux composites par enroulement filamentaire. Nous souhaitons que d'autres initiatives continuent à développer ce projet par l'augmentation du pas d'enroulement et son influence sur le comportement en pression hydrostatique des tubes.

Le travail qu'on propose de réaliser permet de voir la sensibilité de l'angle et du pas d'enroulement, pour mieux comprendre ce dernier paramètre, on propose de réalisée des études qui traite les conséquences du changement du pas sur le comportement et les caractéristiques des tuyaux de différentes angles.

- [1] : **N.kechoude** « Matériaux non métalliques » cours ENP.
- [2] : **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.
- [3] : **Fasano E.** Tecnica Italiana, n° 126 (5/70) pp 1/16 (1970).
- [4] : **R.G. Weatherhead** (1980). FRP Technology. Fibre Reinforced Resin Systems. Applied Science Publishers, Londres.
- [5] : **A. Mir, Hachemane B, Bezzazi B.** Eco conception & matériaux composites à base de renforts naturels. International Symposium on Composites and Aircraft Materials: damage and fatigue diagnostics. ACMA2007 May 22-24,2007 Agadir, Morocco.
- [6] : **Mohamed El Hadi BOURAHLI**, thèse doctorat 'Caractérisation d'un composite verre / époxy', p 17, Université FERHAT ABBAS-Setif 1.
- [7] : **Abdallah MIR**, thèse doctorat 'Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy, p37, Université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES –.
- [8] : **Gowda T.M., Naidu A.C.B., Chhaya R.**, Composite part A. n°30, 1999, pp 277.
- [9] : **J. Gassan, I. Mildner, and A. K. Bledzki**, Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites. Mechanics of Composite Materials, Vol. 35, No. 5, 1999.
- [10] : **J. Gassan, N. Kunststoffe.** Korrelation zwischen Struktur und Eigenschafflen der Fasom und deren Composites. Dissertation at Institut fur Werkstofftechnik of University Kassel, Kassel (1997).

- [11] : **Stocchi A., Lauke B., Va'zquez A., BernalC.** A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates. *Composites: Part A* 38 (2007) 1337–1343.
- [12] : **C.K. Hong, I. Hwang, N. Kim, D.H. Park, B.S. Hwang, C. Nah.** Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 14 (2008) 71–76.
- [13] : **Jean-Marie Berthelot**, « Mécanique des matériaux et structure composites ». Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, le Mans, France.
- [14] : **I.K. Partridge** (éd.) (1989). *Advanced Composites*. Elsevier Applied Science, Londres et New York.
- [15] : **S.T. Peters**. “COMPOSITE FILAMENT WINDING”, ASM International, September 2011.
- [16] : **Philippe COGNARD**, « cor502 Applications des composites anticorrosion dans l'industrie ». *Techniques de l'ingénieur*, 10/06/2005, France.
- [17] : thesis: « Design and optimization of filament wound composite pressure vessels». Master of Science in Engineering Mechanics Xi'an University of Technology, 2012, china.
- [18] : **R.D.S.G. Campilho**, « Natural Fiber Composites », 2016 by Taylor & Francis Group, LLC
- [19] : **JANG-KYO KIM et YIU-WING MAI**, « ENGINEERED INTERFACES IN FIBER REINFORCED COMPOSITES », ELSEVIER SCIENCE Ltd The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB, U.K.2006.
- [20] : **Seyed Mohammad SEYEDI** « FORMATION, PROPAGATION ET COALESCENCE DANS UN RESEAU DE FISSURES EN FATIGUE THERMIQUE». Thèse Doctorat, 16 février 2004.

[21] : **Vijay Kumar Thakur**, « Green Composites from Natural Resources », 2014 by Taylor & Francis Group, LLC..

[22] : **Ryszard M. Kozłowski**, « Handbook of natural fibres », Woodhead Publishing Limited, 2012.

[23] : **Fiche Pratiques ABC Plastique**, « 0985 Préimprégnés phénoliques (PSMC, PBMC) : transformation, façonnage, recyclage ». Techniques de l'ingénieur, France.

[24] : **O. Hanan**, conception et réalisation d'une machine d'enroulement filamenteuse, mémoire de master, ENP. 2015.