

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie des Matériaux

Option : Contrôle Qualité des Matériaux

TITRE DU MEMOIRE

ELABORATION ET CARACTERISATION DE
TUBES COMPOSITES PAR ENROULEMENT
FILAMENTAIRE

Présenté par :

MEZALI AMINE

TALAHARI RABAH

Encadré par :

Prof. A. BENMOUNAH

Dr. Dj. KARI

Année Universitaire 2015/2016

Remerciements

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

C'est pour 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 mon promoteur, le Professeur Benmounah Abdelbaki de l'université de Boumerdès, trouve ici ma profonde gratitude pour ses précieux conseils, aide, orientation et disponibilité.

Je voudrais exprimer mes remerciements ainsi que ma profonde gratitude à mon co-promoteur, le doctorant « 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.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur « Aribi Chouaib » enseignant à l'université de bouira pour avoir accepté d'assurer la continuité de ce travail. Sa rigueur scientifique, ses encouragements incessants m'ont été d'une aide précieuse. Ses conseils avisés, ses critiques pertinentes et ses qualités humaines m'ont été d'une très grande utilité pour mener à terme ce travail.

Dédicace

*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.*

AMINE

Dédicace

Ni les larmes versées, ni le temps passé ne pouvant faire oublier ta beauté, ta gentillesse ta grandeur et ta simplicité, chaque jours qui passe me éprouve une terrible envie de t'avoir parmi nous et surtout le jour de ma soutenance, ton petit fils Rabah n'arrête pas de penser à vous votre souvenir et permanent.

Pour votre mémoire je dédiee ce modeste travail que dieu l'accueil son immense paradis in chalah.

Et pour ma chère mère pour mes frères ALI ,ABDELNOUR,AMAR

Mes sœurs Soumicha ,Bahia,FATMAZOUHRA et HANANE

Pour mes belle sœur Nadia,Amina, Khadîdja,ROKIA

Et mes beau frères Mohamed,Reda et fouad

Pour mes amies oussama,wahab,mounir,

hichem,salah,sidali et badis

Et mes collègues lilia et dalila

À tous mes enseignants.

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

ET Spécialement a mon binôme AMINE et sa famille.

RABAH

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 راتنجات الايبوكسي مع زاوية لف مختلفة من الألياف.
النتائج المتحصل عليها في تجربة الضغط تبين أن معامل يونغ يتناسب مع زاوية الألياف وسمك الأنبوب.
في اختبار الشد الأنابيب ذات السمك الأصغر لها أعلى معامل يونغ. نستنتج أيضا أن الأنابيب المصنوعة من زاوية 50-60 هي الأكثر فعالية بالمقارنة مع غيرها.
وتظهر المقارنة بين الأنابيب القائمة على ألياف الجوت و الأنابيب القائمة على ألياف الزجاج. أن الأنابيب القائمة على ألياف الجوت هي الأكثر كفاءة وجها لوجه مع جهود السهم الخارجي.
كلمات مفتاحية: راتنجات الايبوكسي, ألياف الجوت, الألياف الزجاجية, زاوية اللف, خطوة اللف, معامل يونغ.

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.

Les résultats obtenus en compression montrent que le module de Young est proportionnel avec l'angle des fibres et l'épaisseur du tube.

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 50-60 sont les plus performants par rapport aux autres.

Une comparaison entre les tubes à base de fibre de jute et les tube à base de fibre de verre montre que les tubes en fibre de jute sont plus performant vis-à-vis les efforts des flèches extérieurs.

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

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.

The results obtained by compression show that the Young's modulus is proportional to the angle of fibers and the tube thickness.

In traction, small thickness pipes have the highest Young's modulus. We also deduce that the pipes elaborated with angles 50°-60° are the most performant compared to others.

A comparison between jute fiber's pipes and fiberglass pipes show that jute fiber's pipes are more performant.

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

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

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

INTRODUCTION

I.1. MATRICE.....	03
I.1.1. Résines thermodurcissables.....	03
I.1.1.1. Résines polyesters.....	03
I.1.1.2. Résines de condensation.....	04
I.1.1.3. Les résines époxydes.....	06
I.1.2. Résines thermoplastiques.....	06
I.1.3. Résines thermostables.....	07
I .2. CHARGES ET ADDITIFS.....	08
I .2.1. Charges.....	08
I .2.2. Additifs.....	08
I .3 RENFORTS.....	09
I .3.1. Formes linéiques.....	10
I .3.2. Formes surfaciques.....	10
I .3.2.1.Mats	10
I .3.2.2.Tissus et rubans.....	10
I .3.3. Différents types de fibres.....	12
I 3.3.1. Fibres de verre.....	12
I 3.3.2. Fibres de carbone.....	14
I 3.3.3. Fibres d'aramide	15
I 3.3.4. Fibres naturelle.....	16
I 3.3.4.1 Classification des fibres naturelles.....	17
I 3.3.4.2 Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles.....	19
I 3.3.4.3 Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres.....	19
I 3.3.4.4 Avantages et inconvénients.....	20
I .4.MISE EN FORME DES MATERIAUX COMPOSITES.....	20
I .4.1. Moulage au contact.....	21
I .4.2. Moulage par projection simultanée.....	21
I .4.3. Moulage sous vide.....	21
I .4.4. Moulage par injection de résine ou RTM.....	22
I .4.5. Moulage par pultrusion.....	23
I .4.6. Moulage par centrifugation.....	24
I .4.7. Enroulement filamentaire.....	25
I .5.ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES.....	26
I 5.1. Stratifiés.....	26

SOMMAIRE

I. 5.1.1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels.....	26
I. 5.1.2. Structure générale d'un stratifié.....	27
I. 5.2. Composites sandwiches.....	28
I. 6. DOMAINE D'UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES	30
CONCLUSION	

Chapitre II : *Enroulement filamentaire*

INTRODUCTION

II .1. HISTORIQUE.....	31
II .2. ENROULEMENT FILAMENTAIRE.....	32
II .2.1. Enroulement hélicoïdal.....	32
II .2.1.A. Enroulement discontinu.....	32
II.2.1.B. Enroulement continu.....	33
II .2.2. Enroulement circonférentiel.....	34
II .2.3. Enroulement Polaire.....	35
II .3. MATERIELS.....	36
II .4. MANDRINS.....	38
II .5. DOUBLE MANDRINS.....	38
II .6. APPLICATIONS.....	39
II .7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS	39
II .7.1. Avantages.....	39
II .7.2. Inconvénients.....	40

CONCLUSION

Chapitre III : *Machine d'enroulement filamentaire*

INTRODUCTION

III .1. DESCRIPTION DE LA MACHINE.....	41
III .1.1. Chaîne cinématique de la machine.....	41
III .1.2. Schéma descriptif de la machine.....	43

SOMMAIRE

III .2. LES DIFFERENTES PARTIES MECANQUES DE LA MACHINE.....	43
III .3. FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE.....	45
III .4. ANGLE D'ENROULEMENT.....	46
III .4.1. Relation entre les différents paramètres.....	47
III .4. 2. Exemple de calcul avec quelques angles.....	48
CONCLUSION :	

<i>Chapitre IV :</i>	<i>Elaboration & caractérisation</i>
-----------------------------	---

INTRODUCTION

IV.1.ELABORATION DES TUBES.....	53
IV.2.CARACTERISATION DES TUBES.....	59
IV.2.1. Essai de compression	59
IV.2.2. Essai de traction	73
IV.2.3. Essai de traction circonférentielle	81

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE	91
---------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	92
----------------------------------	----

ANNEXE-A

ANNEXE-B

LISTE DES FIGURES

Figure chapitre I

Fig .1. Principaux procédés.....	02
Fig .I.1. les trois types de renfort.....	09
Fig .I.2. Monofilaments réunis en mèches.....	10
Fig .I.3. Chaîne et trame d'un tissu.....	11
Fig .I.4. Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus.....	12
Fig .I.5. Fibre de verre.....	13
Fig .I.6. Fibre de carbone.....	14
Fig .I.7. Fibre d'aramide.....	16
Fig .I.8. Classification des fibres naturelles.....	18
Fig .I.9. Principe du moulage au contact.....	21
Fig .I.10. Principe du moulage par projection simultanée.....	22
Fig .I.11. Moulage sous vide.....	22
Fig .I.12. Principe du moulage RTM.....	23
Fig .I.13. Principe du moulage par pultrusion.....	24
Fig .I.14. Principe du moulage par centrifugation.....	25
Fig .I.15. Principe de l'enroulement filamentaire.....	25
Fig .I.16. Constitution d'un stratifié.....	26
Fig .I.17. Désignation d'un stratifié.....	27
Fig .I.18. Matériaux sandwiches a âmes pleines.....	29
Fig .I.19. Matériaux sandwiches a âmes creuses.....	30

Figure chapitre II

Fig .II.1. Principe d'enroulement hélicoïdal.....	34
Fig .II.2. Enroulement hélicoïdal continu.....	34
Fig .II.3. Enroulement hélicoïdal.....	35
Fig .II.4. Principe d'enroulement circonférentiel.....	35
Fig .II.5. Enroulement circonférentielle.....	36

LISTE DES FIGURES

Fig .II.6. Principe d'enroulement polaire.....	36
Fig .II.7. Enroulement polaire.....	37

Figure chapitre III

Fig .III.1. Sous-chaîne cinématique.....	43
Fig .III.2. Chaîne cinématique proposée.....	43
Fig .III.3. Schéma descriptif de la machine.....	44
Fig .III.4. Mécanisme de rotation.....	44
Fig .III.5. Mécanisme de translation.....	44
Fig .III.6. Le mandrin avec le moule.....	45
Fig .III.7. Bain de résine.....	45
Fig .III.8. Assemblage de la machine avec « solidworks ».....	45

Figure chapitre IV

Fig.IV.1. Comportement de résine G 35 en traction.....	54
Fig .IV.2. Bobine de fibre dans leur place à la machine.....	57
Fig .IV.3. Fibres passant dans le bain de résine.....	57
Fig .IV.4. Réglage des fréquences de translation et de rotation.....	58
Fig .IV.5. La machine en état de marche.....	58
Fig .IV.6. Tubes composites jute/époxy et verre/époxy.....	59
Fig .IV.7. Deux éprouvettes différentes.....	60
Fig .IV.8. Eprouvtes prêtes pour l'essai.....	60
Fig .IV.9. Machine de compression Zwick/Roell.....	61
Fig .IV.10. Déroulement de l'essai d'un tube jute/époxy.....	61
Fig .IV.11. Déroulement de l'essai d'un tube verre/époxy.....	62
Fig .IV.12. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (30°).....	62
Fig .IV.13. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (50°).....	63
Fig .IV.14. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (55°).....	63
Fig .IV.15. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (60°).....	64

LISTE DES FIGURES

Fig .IV.16. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (75°).....	64
Fig .IV.17. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (90°)	65
Fig .IV.18. Histogramme de module de Yong en fonction d'angle d'enroulement	65
Fig .IV.19. Histogramme de contrainte max en fonction d'angle d'enroulement.....	66
Fig .IV.20. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (30°).....	66
Fig .IV.21. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (50°).....	67
Fig .IV.22. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (55°).....	67
Fig .IV.23. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (60°).....	68
Fig .IV.24. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (75°).....	68
Fig .IV.25. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (90°).....	69
Fig .IV.26. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches.....	70
Fig .IV.27. Comportement à la compression d'un tube époxy/verre (55°).....	70
Fig .IV.28. Comportement à la compression d'un tube époxy/verre (90°).....	71.
Fig .IV.29. Histogramme de comparaison entre les paramètres de compression des tubes époxy/jute et époxy/verre (55°).....	71
Fig .IV.30. Histogramme de comparaison entre les paramètres de compression des tubes époxy/jute et époxy/verre (90°).....	72
Fig .IV.31. Machine de traction Zwick/Roell.....	73
Fig .IV.32. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (30°).....	74
Fig .IV.33. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°).....	74
Fig .IV.34. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°).....	75
Fig .IV.35. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (90°).....	75
Fig .IV.36. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (30°).....	76
Fig .IV.37. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°).....	76
Fig .IV.38. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°).....	77
Fig .IV.39. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (90°).....	77
Fig .IV.40. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches.....	78
Fig .IV.41. Comportement à la traction d'un tube époxy/verre (55°).....	79
Fig .IV.42. Comportement à la traction d'un tube époxy/verre (90°).....	79

LISTE DES FIGURES

Fig .IV.43. Histogramme de comparaison du Module de Young des tubes époxy/jute et époxy/verre.....	80
Fig .IV.44. Epreuve de traction circonférentielle.....	81
Fig .IV.45. Epreuve dans le dispositif conçu pour cet essai.....	81
Fig .IV.46. Réalisation de l'essai de traction circonférentielle.....	82
Fig .IV.47. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (30°).....	83
Fig .IV.48. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (50°).....	83
Fig .IV.49. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (55°).....	84
Fig .IV.50. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (60°).....	84
Fig .IV.51. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (75°).....	85
Fig .IV.52. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (90°).....	85
Fig .IV.53. Rupture des éprouvettes par traction circonférentielle.....	86
Fig .IV.54. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (30°).....	87
Fig .IV.55. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (50°).....	87
Fig .IV.56. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (55°).....	88
Fig .IV.57. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (60°).....	88
Fig .IV.58. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (75°).....	89
Fig .IV.59. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (90°).....	89
Fig .IV.60. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches.....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux Chapitre I

Tableau.I.1.Caractéristique des résines thermoplastiques.....	07
Tableau.I.2. Différents types de verres filables.....	13
Tableau.I.3. Caractéristiques des fibres de carbone, comparées aux fibres de verre E.....	15
Tableau.I.4. Caractéristiques mécaniques de monofilaments aramides.....	16
Tableau.I.5. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de différentes fibres.....	20

Tableaux Chapitre III

Tableau .III.1. Vitesse de rotation du mandrin en fonction de la fréquence.....	49
Tableau.III.2. Vitesse de rotation de la vis pour D=70 mm.....	50
Tableau.III.3. Fréquence de la vis pour D=70 mm.....	50
Tableau.III.4. Vitesse de rotation de la vis pour D= 90 mm.....	51
Tableau.III.5. Fréquence de la vis pour D=90 mm.....	51
Tableau.III.6. Vitesse de rotation de la vis pour D= 104 mm.....	52
Tableau.III.7. Fréquence de la vis pour D=104 mm.....	52
Tableau.III.8. Vitesse de rotation de la vis pour D= 165 mm.....	53
Tableau.III.9. Fréquence de la vis pour D=165 mm.....	53

Tableaux Chapitre IV

TableauIV.1. Caractéristiques de la résine.....	53
TableauIV.2. Caractéristiques de la résine.....	54
TableauIV.3. Caractéristiques des fibres.....	54
TableauIV.4. Architecture des différents tubes réalisés.....	55
TableauIV.5.Paramètres des essais de compression des tubes (8 couches).....	65
TableauIV.6.Paramètres des essais de compression des tubes (10 couches).....	69
TableauIV.7.Paramètres des essais de compression des tubes époxy/verre.....	71
TableauIV.8. Paramètres des essais de traction des tubes (8 couches).....	75
TableauIV.9. Paramètres des essais de traction des tubes (10 couches).....	77

LISTE DES TABLEAUX

TableauIV.10. Paramètres des essais de traction des tubes époxy/verre.....	79
TableauIV.11. Paramètres des essais de traction circonférentielle des tubes (8 couches).....	86
Tableau IV.12. Paramètres des essais de traction circonférentielle des tubes (10 couches)....	90

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 nouveau produit 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 œuvre 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 terme de matériaux composites. Ce procédé apporte même une solution, en effet, il permet de réaliser des pièces en composite à partir de fibres enroulés 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 de tubes composites par le procédé d'enroulement filamentaire.

L'importance du procédé d'enroulement filamentaire par rapport aux autres procédés de mise en œuvre des matériaux composite 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.

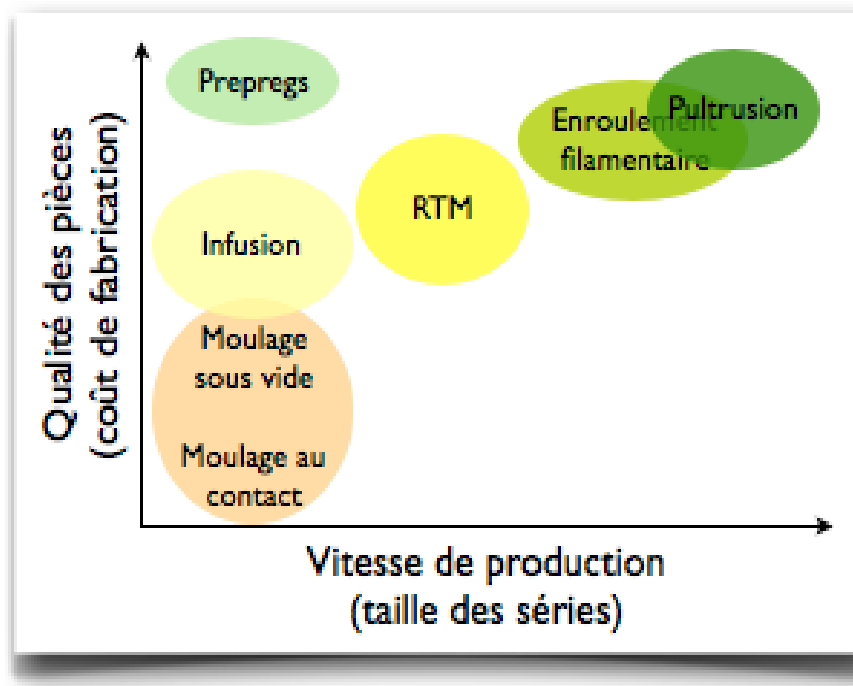


Fig. Principaux procédés.

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 constitutifs, 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.

INTRODUCTION :

Dans un sens large, le mot “composite” signifie “constitué de deux ou plusieurs parties différentes”. En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort.

I.1. MATRICE :

La matrice est composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

- Divers types de résines :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. [1]

I.1.1. Résines thermodurcissables :

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :

- ✓ Les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.,
- ✓ Les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc...,
- ✓ Les résines époxydes.

I.1.1.1 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 polyester 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/m³
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge	60 à 100 °C

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

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

Parmi les inconvénients, nous noterons :

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

I .1.1.2. Résines de condensation :

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

1. Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Masse volumique	1200 Kg/m³
Module d'élasticité en flexion	3 GPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %
Résistance à la compression	250 MPa
Température de fléchissement sous charge	120°C

Parmi les avantages, nous citerons :

- ✓ Une excellente stabilité dimensionnelle ;
- ✓ Une bonne tenue à la chaleur ;
- ✓ Une bonne résistance aux agents chimiques ;
- ✓ De bonnes caractéristiques mécaniques ;
- ✓ Un faible coût ;

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- ✓ Une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
 - ✓ Les couleurs foncées des résines,
 - ✓ Une non adaptation à des utilisations alimentaires
2. Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques
3. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :
- ✓ La possibilité d'utilisations alimentaires
 - ✓ La possibilité de colorer les résines
4. Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages :
- ✓ Un durcissement plus rapide que les résines phénoliques
 - ✓ Une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

I .1.1.3. Les résines époxydes

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. 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 époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Masse volumique **1100 à 1500 Kg/m³**

Module d'élasticité en traction **3 à 5 GPa**

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 époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées.

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- ✓ 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

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- ✓ 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 .1.2. 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 technopolymères).

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.

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (Kg/m³)	900	1140
Contrainte à la rupture (MPa)	20-35	60-85
Module d'élasticité (GPa)	1,1-1,4	1,2-2,5
Température de fléchissement sous charge (°C)	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.1.3. Résines thermostables :

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200 °C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

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

Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200 °C.

Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.

Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à hautes résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistances supérieures, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium. [2]

I.2 – CHARGES ET ADDITIFS :

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :

- ✓ Quelques dizaines de % dans le cas de charges
- ✓ à quelques % et moins dans le cas d'additif

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre. Nous donnons dans ce paragraphe des exemples de charges et d'additifs.

I.2.1. Charges :

I .2.1.1.Charges renforçantes : l'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine.

I .2.1.2. 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.2.2. Additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- ✓ Lubrification et agents de démoulage
 - ✓ Pigments et colorants
 - ✓ Agents anti-retrait
 - ✓ Agents anti-ultraviolets
- **Lubrification et agents de démoulage :** ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.
 - **Pigments et colorants :** les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. À partir de ces pigments, il est possible d'obtenir des pâtes colorantes constituées de dispersions de pigments dans une pâte, pour une utilisation aisée. Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté.
 - **agents anti-retrait et agents de fluage :** la polymérisation des résines conduit à une diminution des distances interatomiques du monomère initial. Il s'ensuit un retrait de la résine polymérisée, qui peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement

ou à des microfissuration des pièces moulées. Bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait, il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti-retrait, qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

▪ **Agents anti-ultraviolets**

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines de l'action des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et d'éviter ainsi une détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation. [2]

I.3 – RENFORTS :

Les matériaux de renfort 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 de feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilité de mise en œuvre, un faible coût, etc.

La figure suivante représente différents types de renforts (figure1) :



Fig.I. 1.les trois types de renfort. [3]

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. 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.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 monofilament. Les monofilaments sont ensuite réunis en fils ou mèches (Figure 2). Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique. Cette masse linéique dépend du diamètre et du nombre de monofilaments.

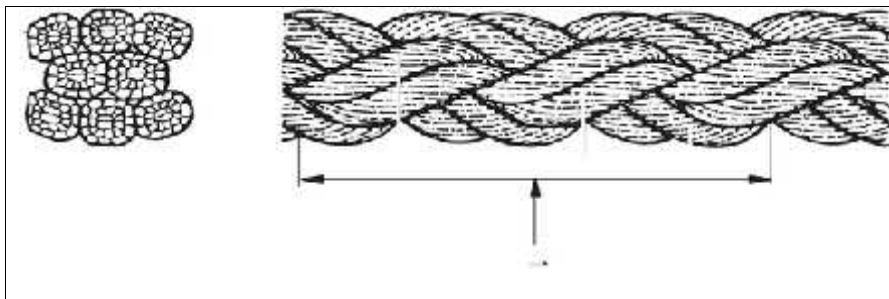


Fig.I.2. Monofilaments réunis en mèches. [3]

I.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.

I.3.2.1. 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.

I.3.2.2. 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 3).

- ✓ 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.

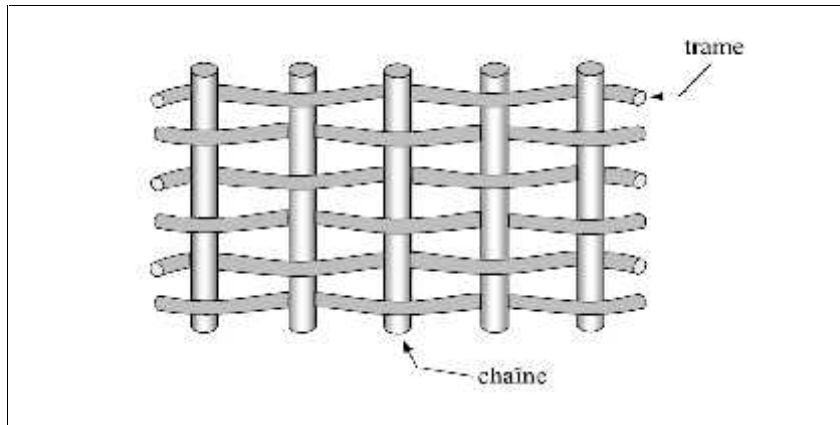


Fig.I.3 : chaîne et trame d'un tissu.

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 1.4 illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin, armure croisée, armure unidirectionnelle.

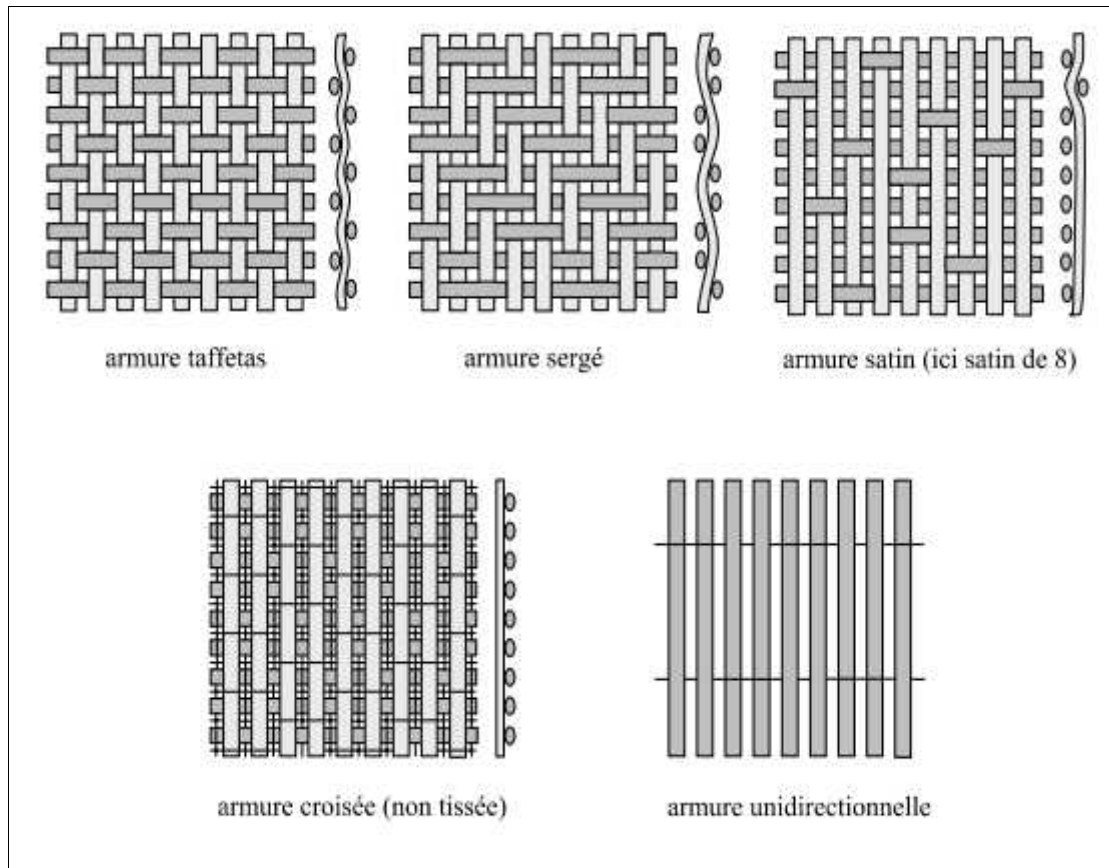


Fig .I.4. Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus. [3]

I .3.3. Différents types de fibres :

I .3.3.1. Fibres de verre :

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètre), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice ; alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites.

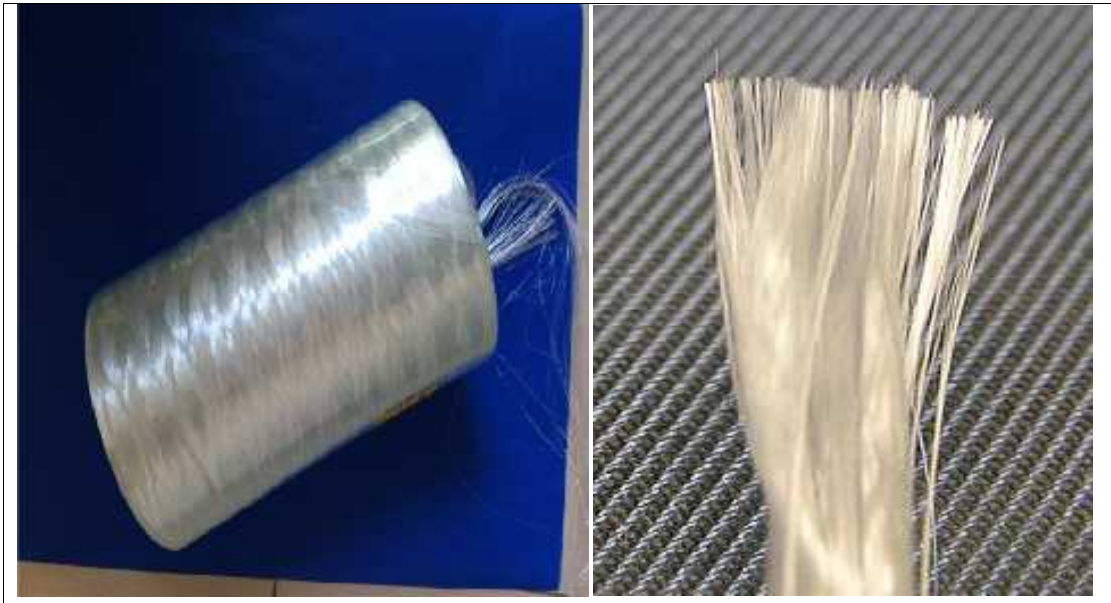


Fig.I.5. Fibre de verre.

Suivant leurs compositions, différents types de verres filables peuvent être obtenus (tableau 2). Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1%) sont réservés à des applications spécifiques :

- ✓ Le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications.
- ✓ Le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique.
- ✓ Les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

Type	Caractéristiques générales
E	A usage général ; bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Haute résistance mécanique

Tableau. I.2 : Différents types de verres filables.

I.3.3.2. Fibres de carbone :

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000 Kg/m^3). Le tableau 3 compare les caractéristiques des fibres de carbone à celles des fibres de verre E. on outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ.

Cette propriété a conduit à développer des composites fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camion, avions), les éléments de fours, etc. ces matériaux, revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial : bords, tuiles, etc.



Fig.I.6. Fibre de carbone

Le produit de base est le fil contenu ou stratifil carbone, constitué de monofilaments de carbone (par exemple : 500, 1000, 3000, 6000, 10000, etc. filaments) assemblés sans torsion. Ces stratifils peuvent être utilisés directement pour les procédés de fabrication de composites par pultrusion ou par enroulement filamentaire. Les stratifils peuvent être également tissés pour obtenir des rubans, des tresses, des tissus unidirectionnels ou multidirectionnels, des tissus hybrides (verre- carbone, Kevlar- carbone) etc. Ces diverses formes peuvent éventuellement être pré imprégnées.

Caractéristiques	Verre	Carbone (Type1 : HR)	Carbone (Type 2)	Carbone (Type 3)	Carbone (Type 4)
Masse volumique ρ kg/m ³	2600	1750	1810	1950	2000
Diamètre (μ)	10 à 20	5 à 7	5 à 7	5 à 7	12
Module d'Young(GPa)	73	230	400	600	280
Contrainte à la rupture	3400	3000-4000	2800	2000	2000-2400
Prix de revient	1	10-15	30-50	200-400	50-100

Tableau. I.3.Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de verre E.

I .3.3.3. Fibres d'aramide :

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de “KEVLAR“, nom commerciale de la fibre.

Les fibres aramides sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques.

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau 4 pour des monofilaments. Sur fils multifilaments, les caractéristiques sont généralement plus faibles. Le tableau montre une contrainte spécifique à la rupture élevée, du même ordre de grandeur que les fibres de carbone haute résistance HR (tableau 3), toutefois avec un prix de revient 4 à 6 fois moindre. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides :

- Résistances faibles à la compression, à la flexion.
- Sensibilité au cisaillement

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice. Pour y remédier, des ensimages adaptés sont développés.

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Masse volumique ρ (kg/m ³)	1440	1450	1470	1440	1390
Diamètre (μ)	12	12	12	12	12
Module d'Young E_f (GPa)	60	120	160	60	90
Contrainte à la rupture σ (MPa)	3000	3000	2400	2600	2800
Allongement à la rupture (%)	3,6	1,9	1,5	3	4

Tableau. I.4.: caractéristiques mécaniques de monofilaments aramides.



Fig.I.7. Fibre d'aramide

I.3.3.4. Fibres naturelle :

Les fibres naturelles sont des fibres organiques d'origine animale ou bien végétales ou bien des fibres minérales.

Les fibres végétales sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Leur structure complexe est assimilable à celle des matériaux composites renforcés par des fibrilles de cellulose disposées en hélice. [11]

I.3.3.4.1 Classification des fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

- ✓ Les fibres végétales : qui comprennent les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ; les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- ✓ Les fibres animales : qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telle que la soie.
- ✓ Les fibres minérales : La fusion puis le fibrage de divers minéraux permet de produire des fibres ou des laines minérales plus ou moins denses et stables. Il existe deux types de fibres minérales : celles qui sont directement issues de roches (exemples : amiante, wollastonite, sépiolite) et celles qui sont artificiellement produites à partir de minéraux (exemples : fibre de verre ou laine de verre produites à partir de la silice, laine de roche, fibre céramique réfractaire, fibre d'alumine). Les minéraux recherchés pour produire des fibres le sont pour leurs qualités d'inertie chimique et/ou thermique, parfois pour leurs propriétés optiques ou piézoélectriques mais d'abord pour leurs propriétés vitrifiantes. [11]

Dans notre travail nous avons utilisés des fibres naturelles végétale appelé le jute qui est une plante des régions tropicales (genre corchorus) appartenant à la famille tiliacées.

La tige atteint une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3cm. Le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce. Il en existe deux variétés (une rouge et une blanche), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre ultime est très courte et très lignifiée. L'extraction de la fibre est obtenue par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau.

La figure suivante montre la classification des fibres naturelles (figure.I.8):

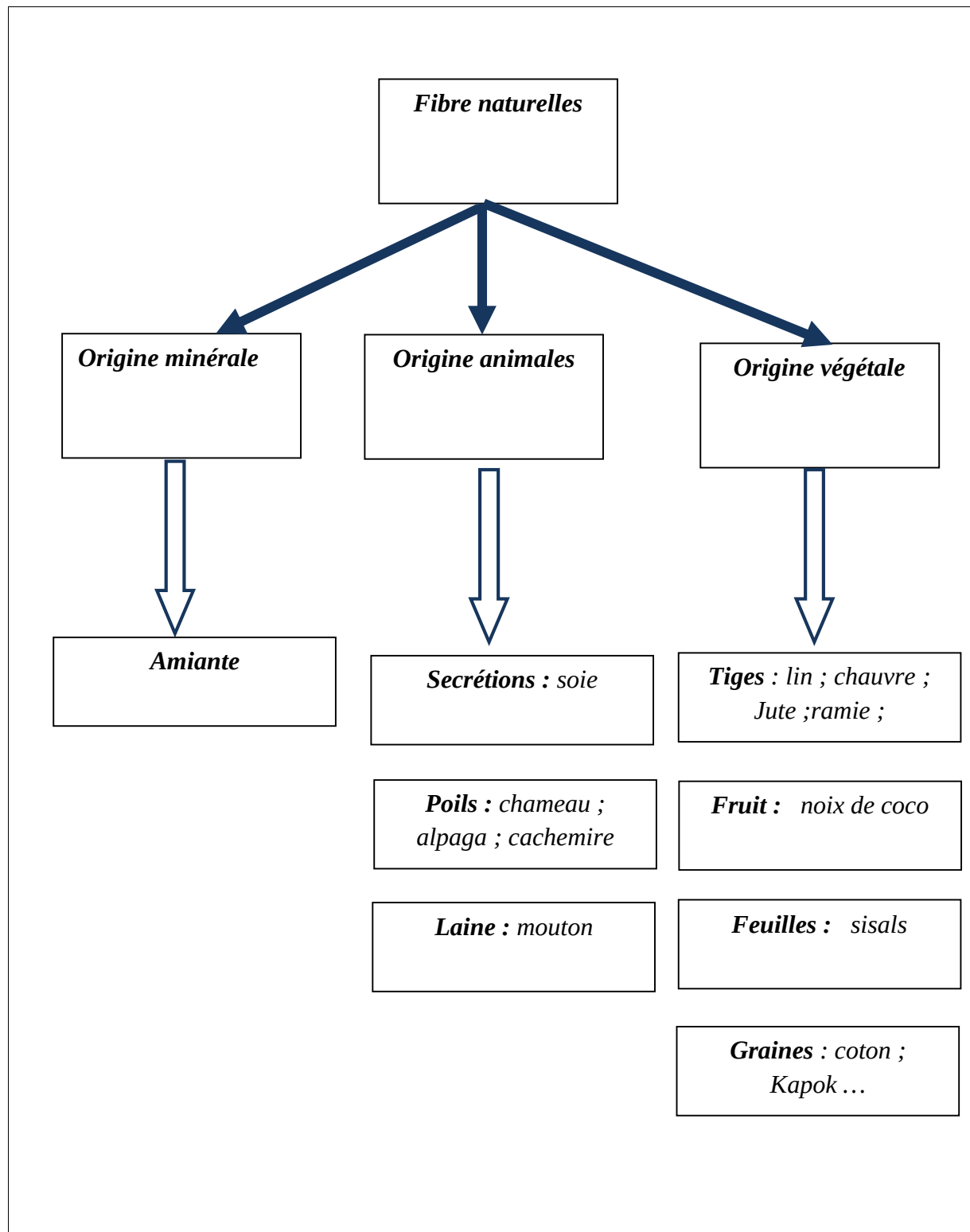


Fig.I.8. Classification des fibres naturelles

I .3.3.4.2. Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles :

D'une manière générale, l'utilisation des fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie par :

- ✓ Valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles.
- ✓ Développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années. Dans cet esprit, on envisage de remplacer les fibres artificielles par des fibres naturelles, pour faire des économies, et parce que les matières premières renouvelables présentent des avantages écologiques. [11]

I .3.3.4.3 Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres :

Le tableau 5 présente les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres :

Fibre	E(GPa)	Allongement à rupture en traction (%)	Contrainte à rupture en traction (MPa)	Densité
Verre E	72-73	4,6-4,8	3200-3400	2,54
Filament vierge				
Filament industriel	72-73	3	200-2400	2,54
Carbone toraye	230	1,5	3530	1,7-1,9
T300Thorneel P-120s	825	0,3	2350	1,87-2
Aramide Kevlar 49	124	2,9	3620	1,44
Lin	12-85	1-4	600-2000	1,54
Ramie	61,4-128,27	1,8-3,8	400-938	1,56
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5-1,8	393-773	1,44

Sisal	9-21	3-7	350-700	1,45
Noix de coco	4-6	15-40	131-175	1,15
Coton	5,5-12,6	7-8	287-597	1,5-1,6

Tableau.I.5. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de différentes fibres. [12]

I .3.3.4.4. Avantages et inconvénients :

Avantages :

- ✓ Faible cout.
- ✓ Propriétés mécaniques spécifiques importants (résistance et rigidité).
- ✓ Biodégradabilité.
- ✓ Non abrasif pour les outillages.
- ✓ Neutre pour l'émission de CO₂.
- ✓ Demande peu d'énergie pour être produite.
- ✓ Pas de résidus après incinération.
- ✓ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.
- ✓ Bonne isolation thermique et acoustique.
- ✓ Ressource renouvelable.

Inconvénients :

- ✓ Absorption d'eau.
- ✓ Faible stabilité dimensionnelle.
- ✓ Biodégradabilité.
- ✓ Faible tenu thermique (20 à 30°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 .4. MISE EN FORME DES MATERIAUX 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.4.1. Moulage au contact :

Consiste à disposition successivement sur un moule Un agent de démoulage, Un gel coat, Une couche de résines thermodurcissable liquide (Figure 9).

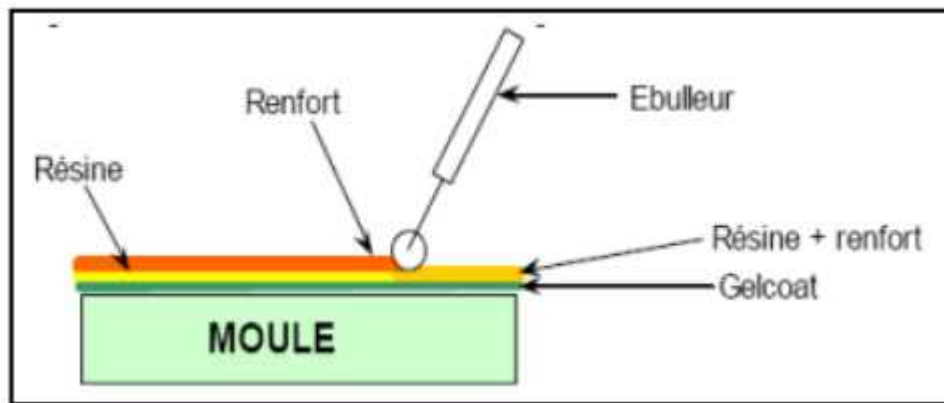


Fig .I.9.Principe du moulage au contact

I.4.2. 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 10).

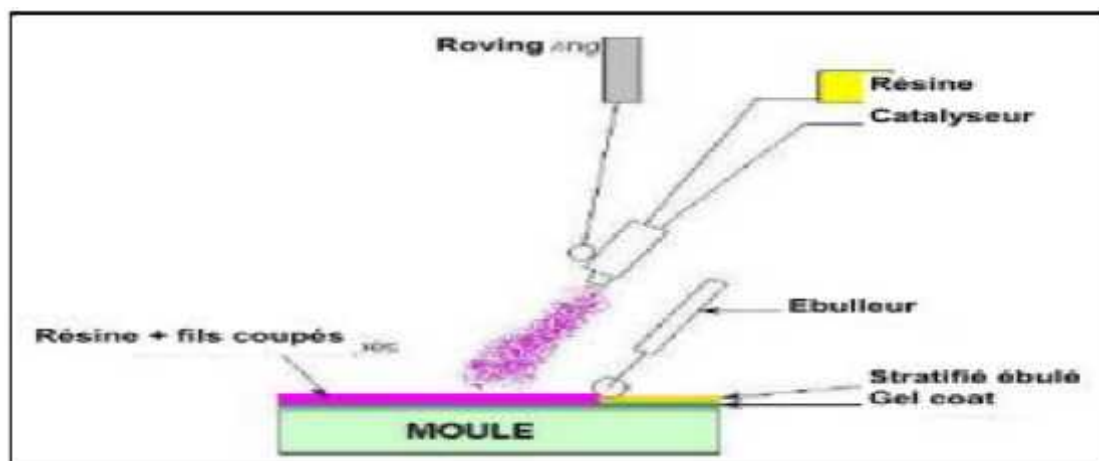


Fig.I.10. Principe du moulage par projection simultanée

I.4.3. 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. [6]

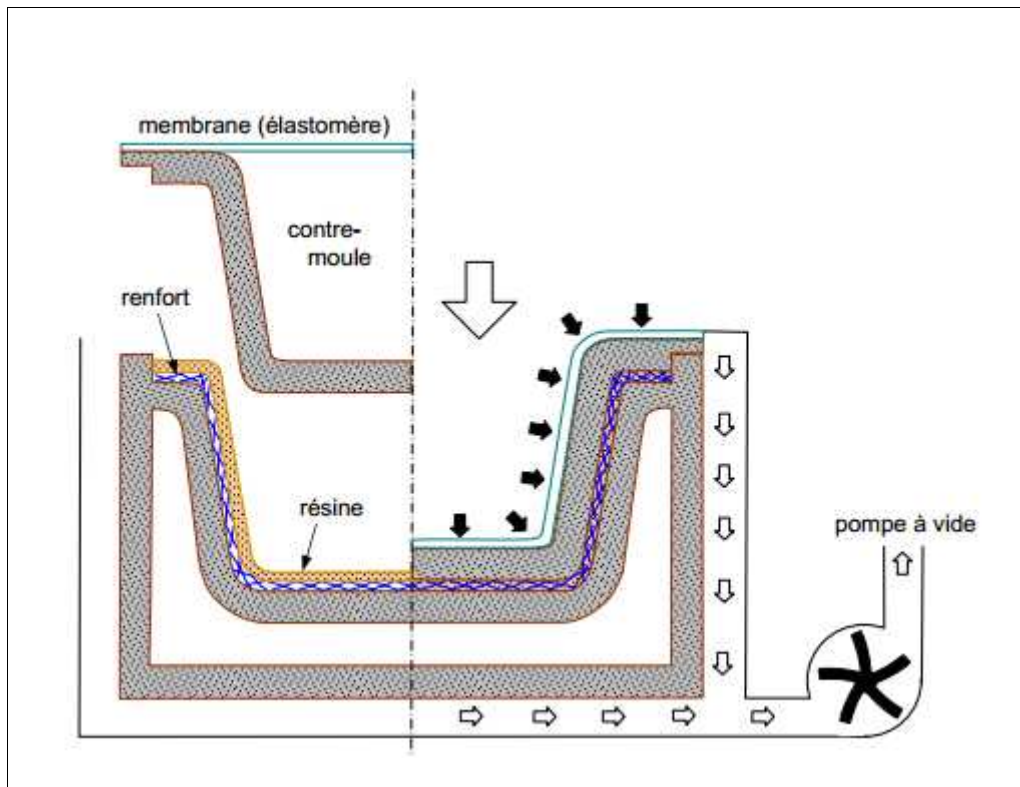


Fig.I.11. Moulage sous vide.

I .4.4. 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 12).

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

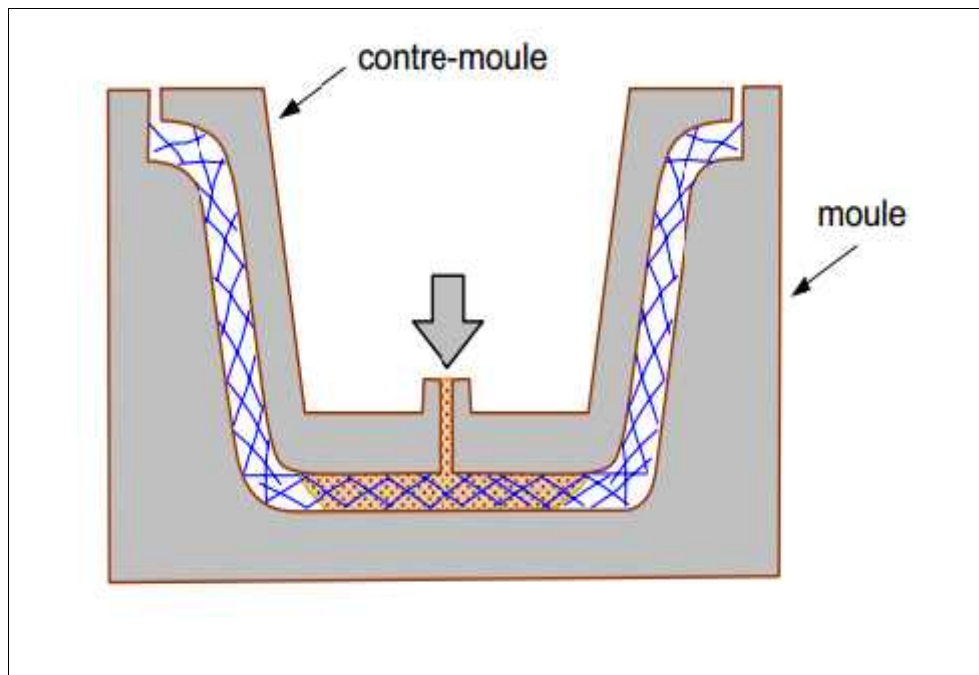


Fig.I.12. Principe du moulage RTM. [6]

I .4.5. 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 13).

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. [6]

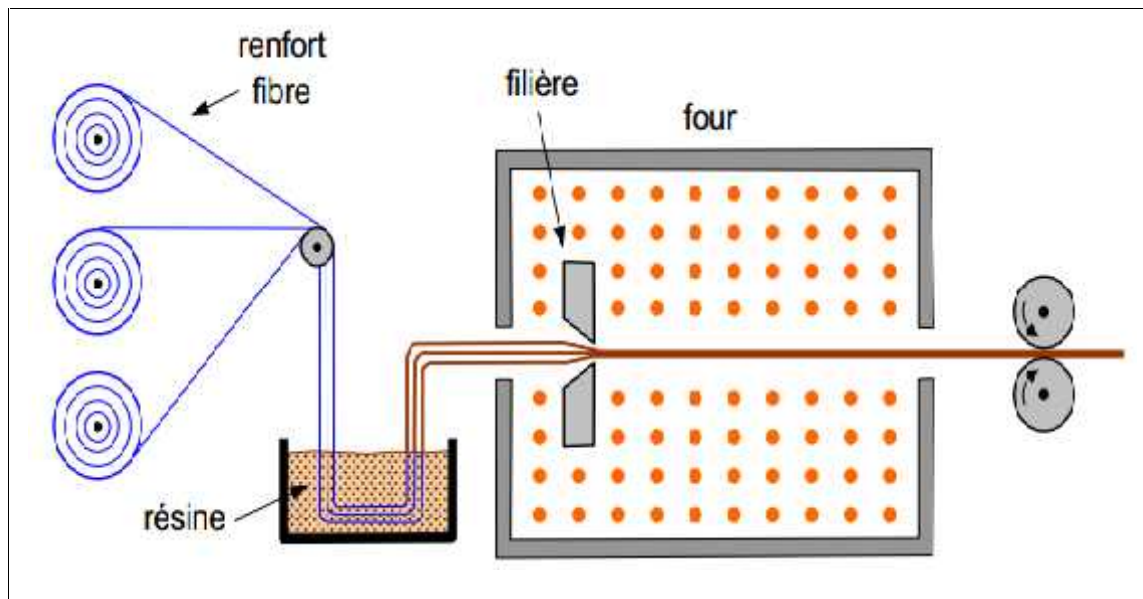


Fig.I.13. Principe du moulage par pultrusion.

I .4.6. 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 époxydes, 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.

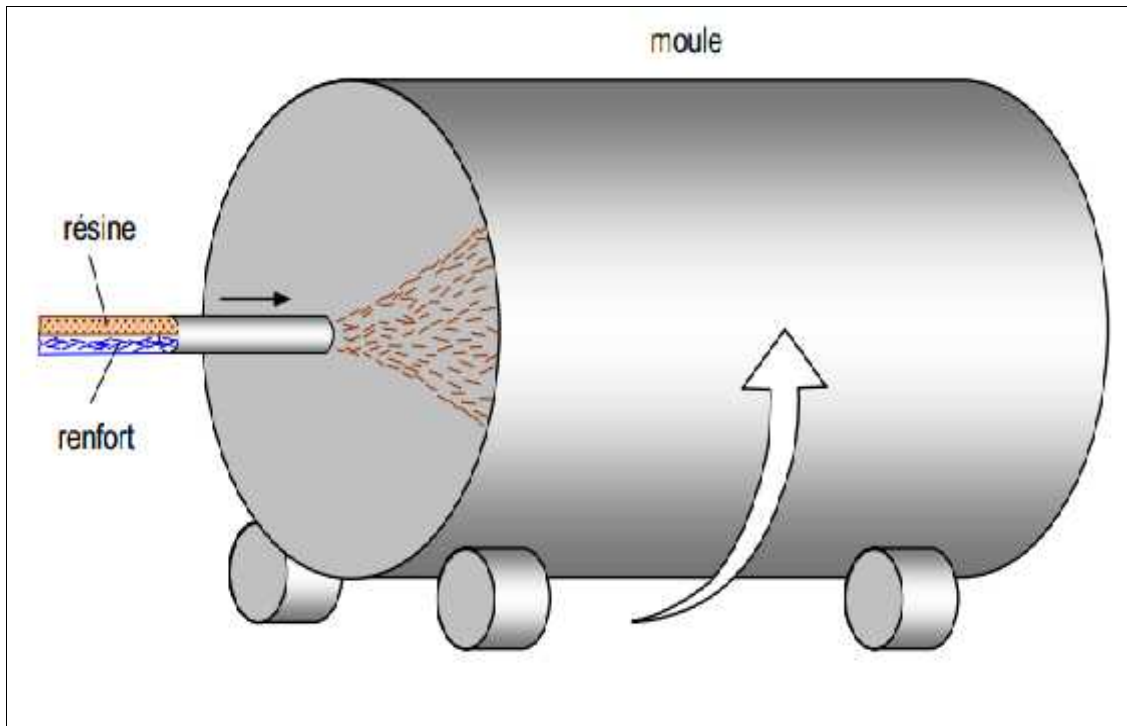


Fig.I.14. Principe du moulage par centrifugation

I.4.7. 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 15).

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.

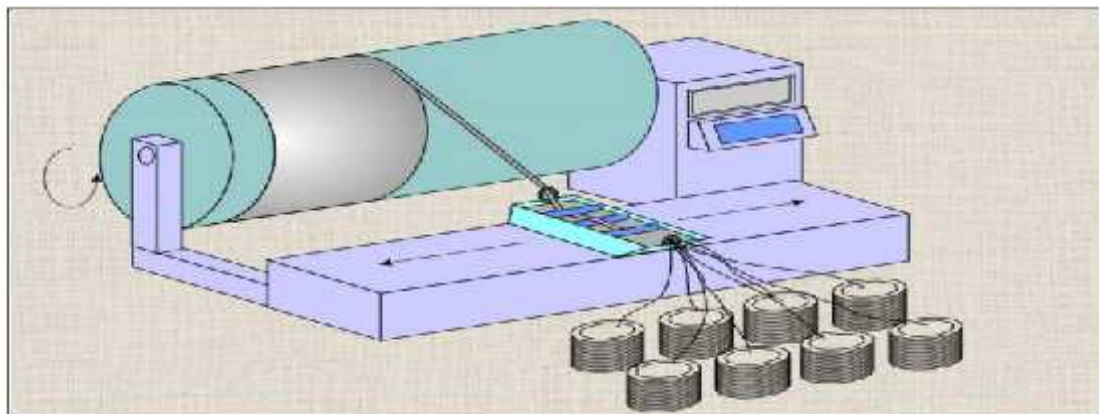


Fig.I.15. Principe de l'enroulement filamentaire

I.5. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES :

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface : plaques, coques,
- par stratification de couches successives.

I.5.1. Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués (figure 16) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Nous examinons les divers types de stratifiés.

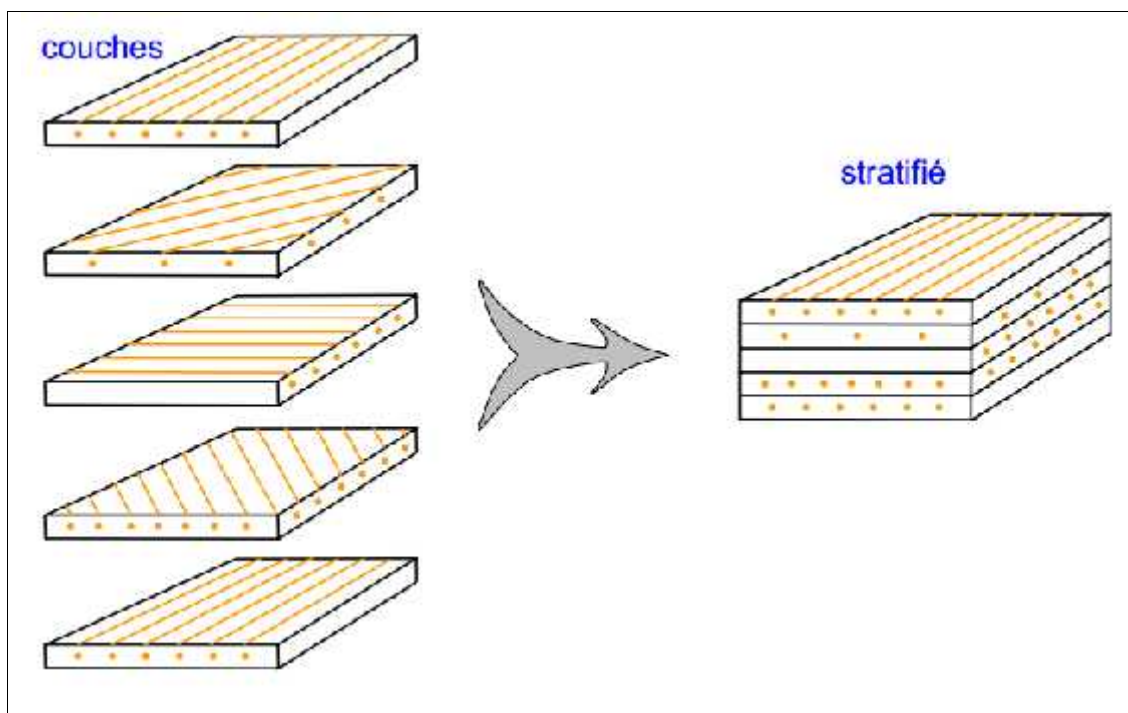


Fig.I.16. Constitution d'un stratifié. [2]

I.5.1.1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (figure 17) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

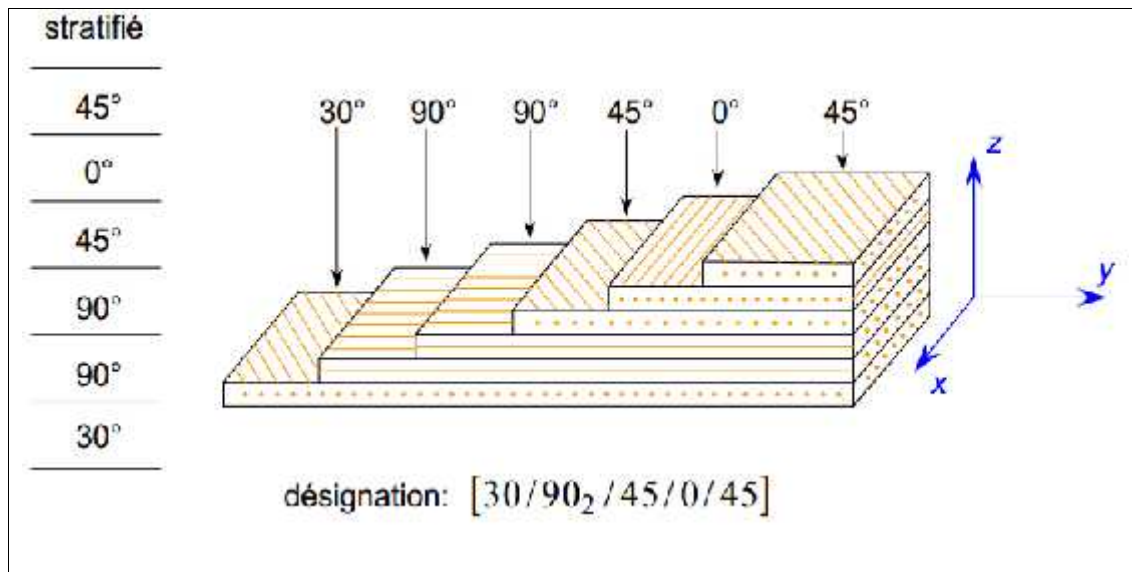


Fig.I.17. Désignation d'un stratifié. [2]

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.
2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la figure 17.

I .5.1.2. Structure générale d'un stratifié :

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposées :

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres ;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées ;
- une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;

— une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

I .5.2. Composites sandwiches :

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme mat unidirectionnel (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux “feuilles”, appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

— pour les âmes pleines (figure 18) :

- le balsa ou bois cellulaire ;
- diverses mousses cellulaires ;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;

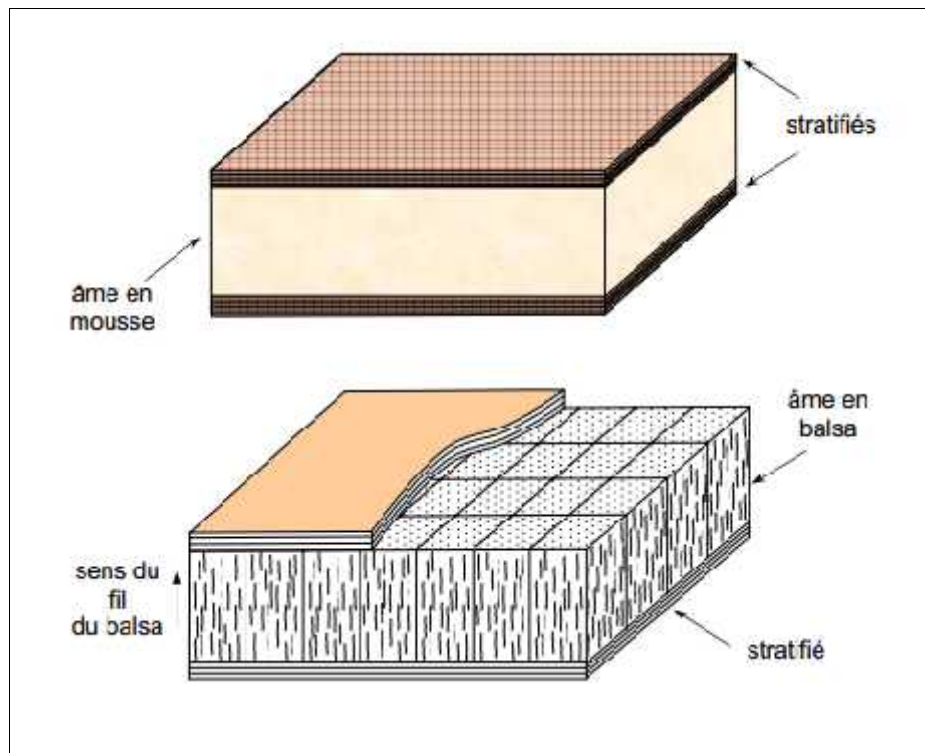


Fig.I.18. Matériaux sandwiches à âmes pleines. [2]

— pour les âmes creuses (figure 19), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers ;
- du papier kraft (enduit ou non de résine) ;
- du papier polyamide, type papier Nomex ;

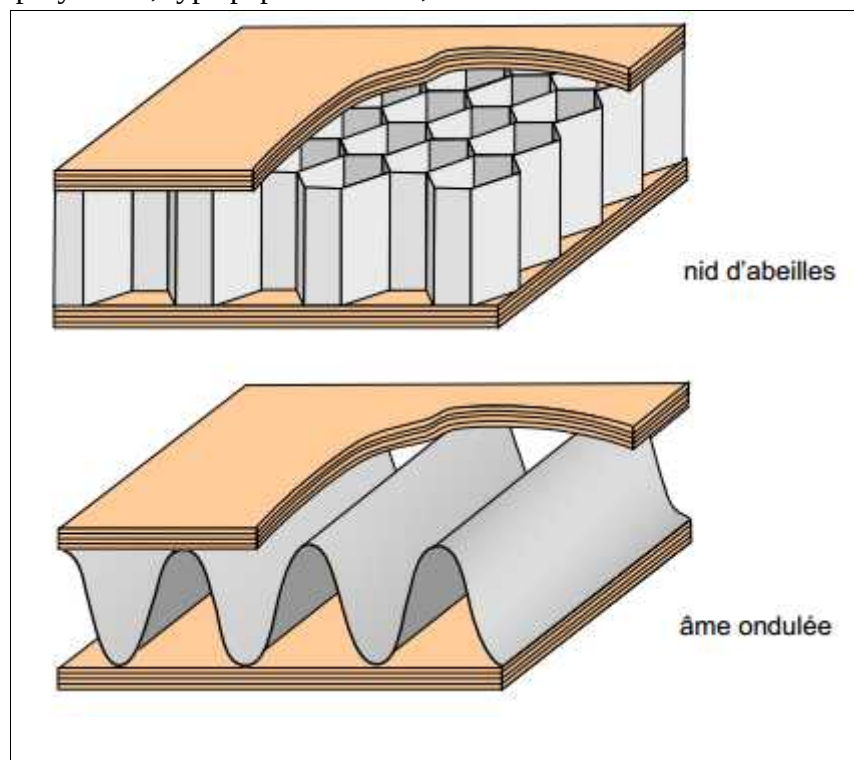


Fig.I.19. Matériaux sandwiches à âmes creuses. [2]

Des âmes mixtes peuvent être utilisées.

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwiches jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.

Autres architectures :

Les autres architectures des matériaux composites peuvent être schématiquement classées en : plastiques renforcés et composites volumiques.

I .6. DOMAINE D'UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES

- L'industrie aérospatiale.
- Le transport aérien, routier et ferroviaire.
- domaine militaire : Hélicoptère, Fusée, Avions ...etc.
- canalisation.
- Construction navales.
- Sports et loisirs. [4]

COCLUSION :

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.

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.1. – HISTORIQUE :

L'enroulement filamentaire est l'une des plus anciennes méthodes de traitement de composites. Il reste aujourd'hui l'une des méthodes les plus rentables pour la production de masse. Le concept de processus enroulement filamentaire avait été introduit au début des années 40. L'équipement qui a été conçu en 1950 était très basique ; il effectue les tâches les plus simples en utilisant seulement deux axes de mouvement (rotation de la broche et de transport horizontal).

Le rythme de développement des composites a été accéléré au cours de la Seconde Guerre mondiale. La poussée de l'aérospatiale qui a commencé dans les années 1950 et a pris de la vitesse dans les années 1960 c'était un nouvel élan pour le développement des composites.

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 essais de matériaux composites a été réalisés en collaboration avec la conception et la construction des récipients sous pression, les carter de moteurs fusés, 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 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.2. - 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.2.1. Enroulement hélicoïdal :

II2.1. 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 1 illustre le principe du modèle d'enroulement hélicoïdal.

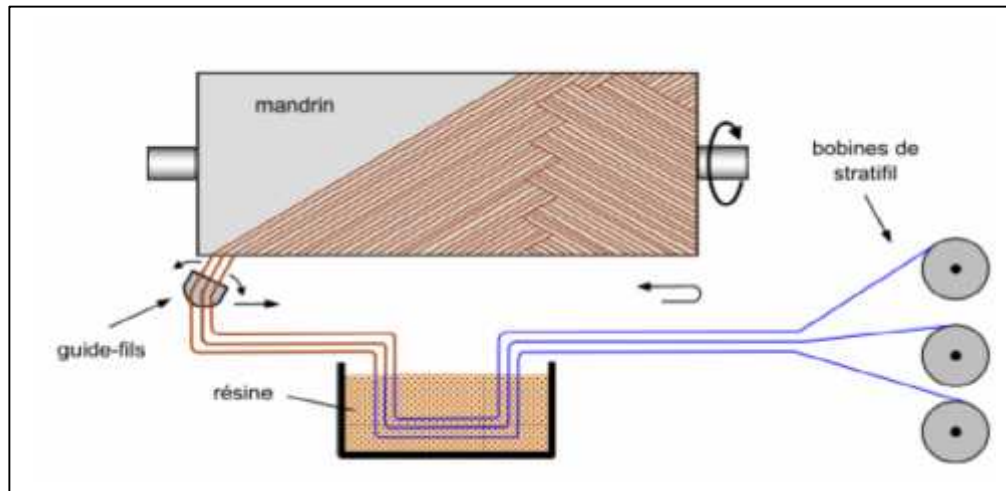


Fig. II. 1 : Principe d'enroulement hélicoïdal. [6]

II.2.1. B. Enroulement continu :

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs. La figure 2 montre ce type d'enroulement :

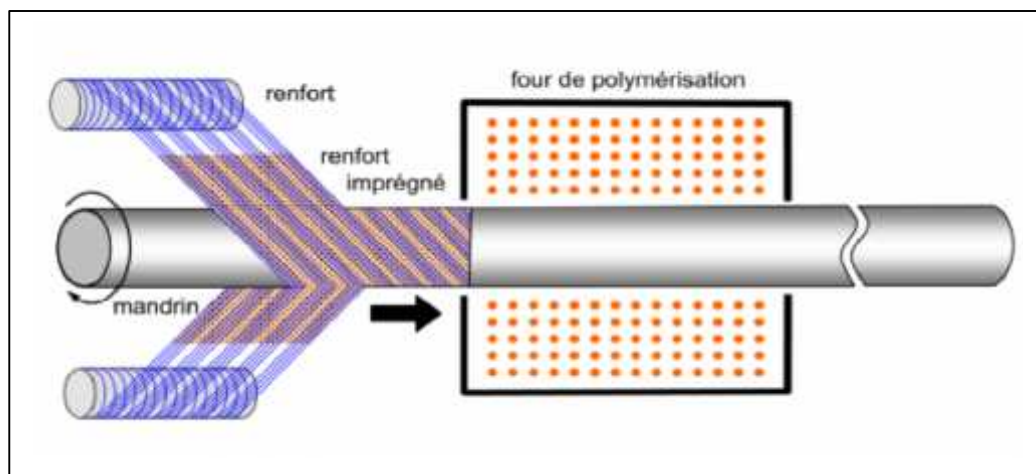


Fig. II. 2 : Enroulement hélicoïdal continu. [6]

Dans l'enroulement hélicoïdal, l'angle α est de 5° à 80° par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la figure 3.

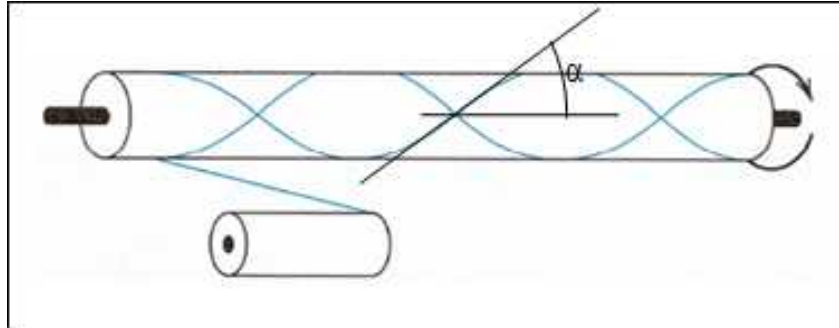


Fig. II. 3. enroulement hélicoïdal

II .2.2. Enroulement circonférentiel :

Le bobinage est effectué à 90° 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 4 illustre le principe de l'enroulement circonférentiel.

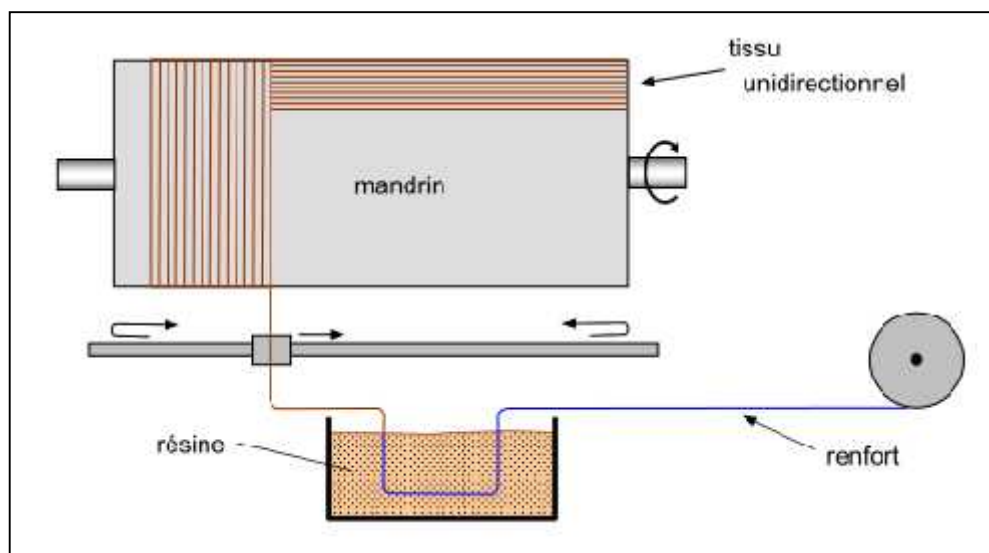


Fig. II. 4 : Principe d'enroulement circonférentiel. [6]

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° 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 5.

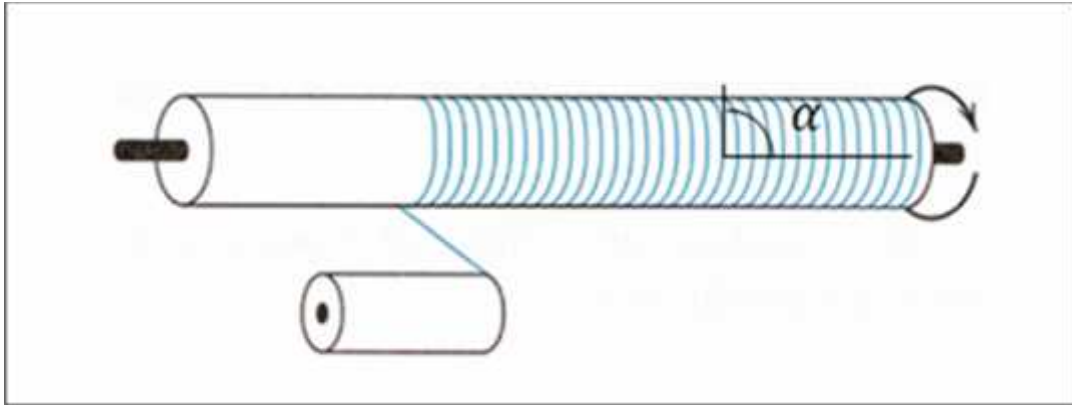


Fig. II. 5 Enroulement circonférentielle

II. 2.3. 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 6 illustre le principe d'enroulement polaire.

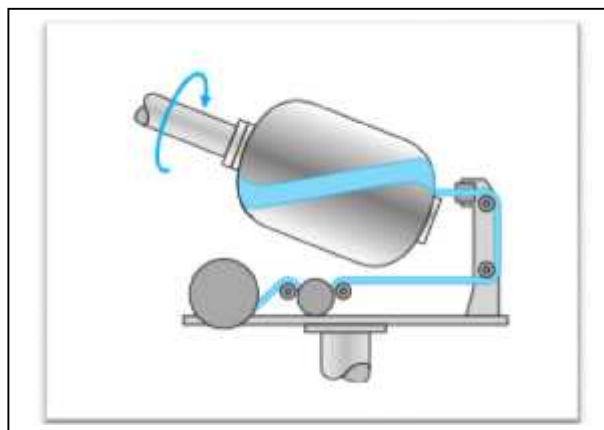


Fig. II. 6 : Principe d'enroulement polaire. [13]

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° par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la figure 7.

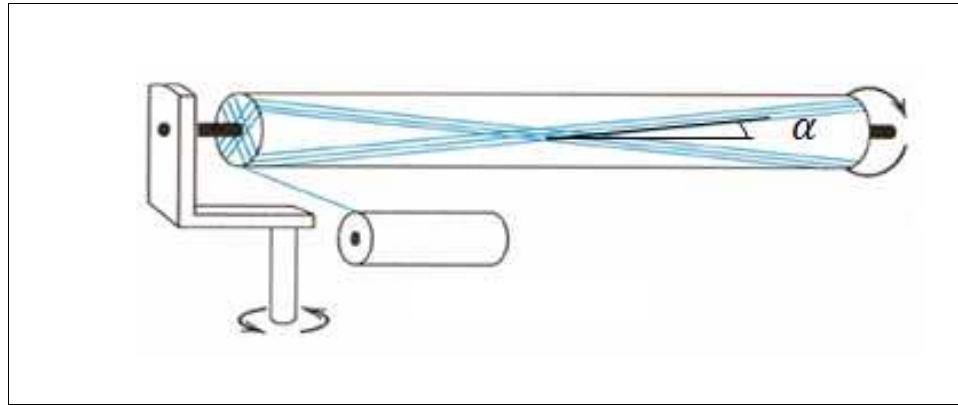


Fig. II. 7: Enroulement polaire. [14]

II .3. – MATERIELS :

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.

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 conductivité électrique et thermique, et absorption d'humidité réduite.

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.

Les fibres naturelles ou organiques sont couramment utilisées 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. 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. 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 .5. - 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 .6. – 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.

II .7. - AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

II .7.1. Avantages :

- ✓ 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.

II .7.2. 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.

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.

INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à la présentation générale de notre machine.

Le mécanisme de la machine d'enroulement filamenteuse est composé de plusieurs sous-ensembles reliés entre eux par une ou plusieurs liaisons.

Un schéma cinématique doit présenter le plus fidèlement possible les relations entre les différentes pièces.

III .1. DESCRIPTION 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 des sorties de la machine.

III .1.1. Chaîne cinématique de la machine :

La documentation concernant la machine d'enroulement filamenteuse 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.

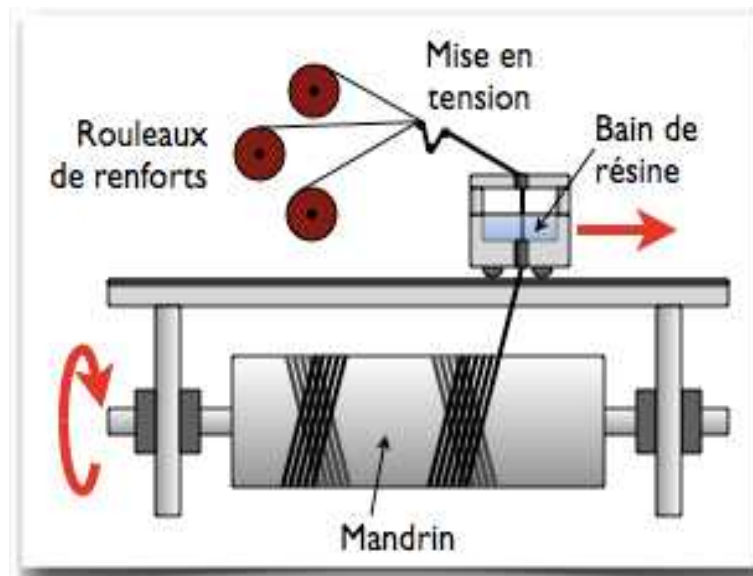


Fig III.1. Sous-chaîne cinématique. [16]

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 :

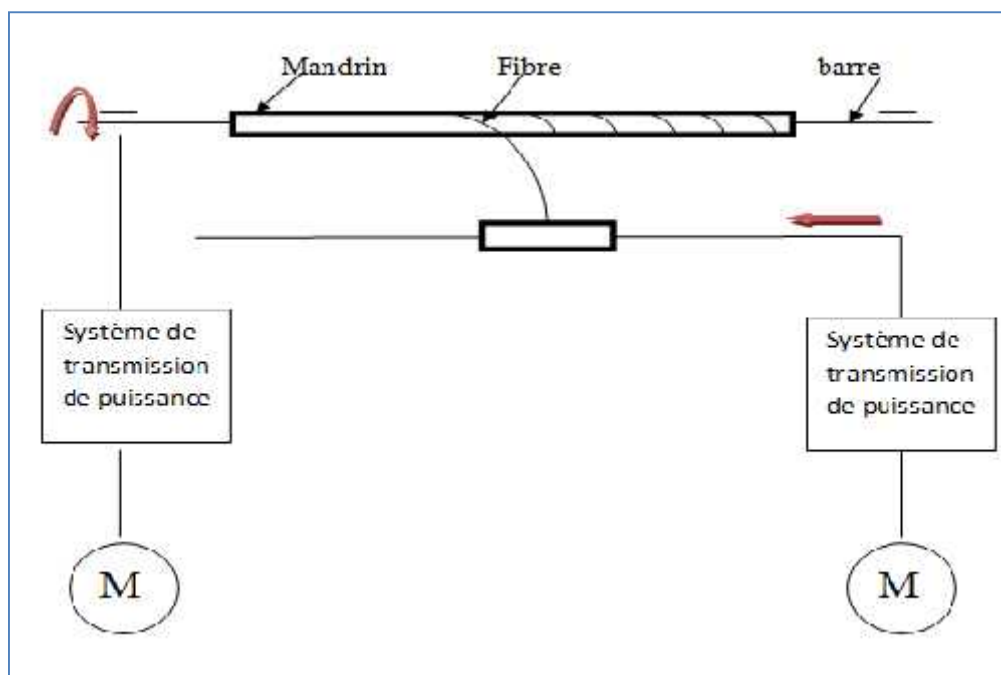


Fig III.2. Chaîne cinématique proposée.

III .1.2. Schéma descriptif de la machine :

La figure suivante illustre une description du système :

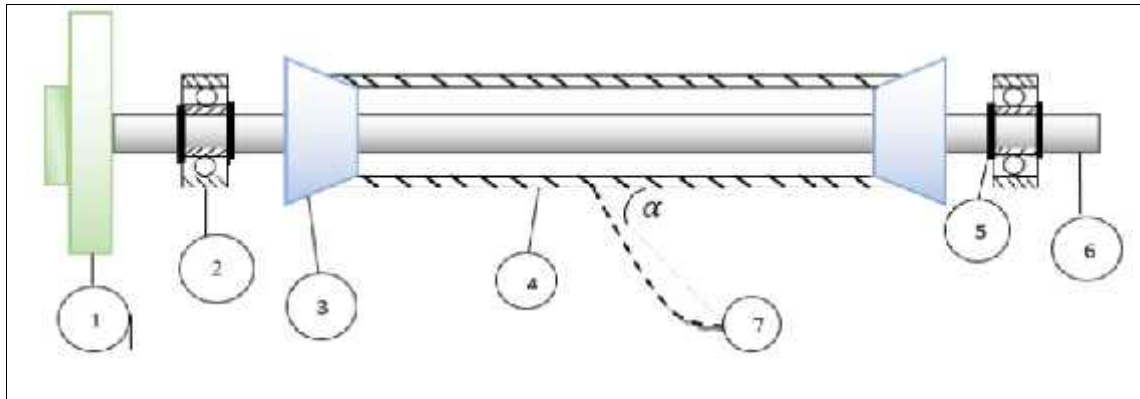


Fig III.3. Schéma descriptif de la machine.

Légende :

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

III .2. LES DEFFERENTES PARTIES MECANQUES DE LA MACHINE :

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

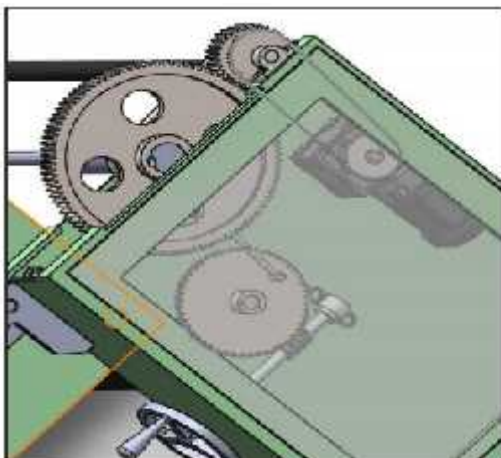


Fig III.4. Mécanisme de rotation.

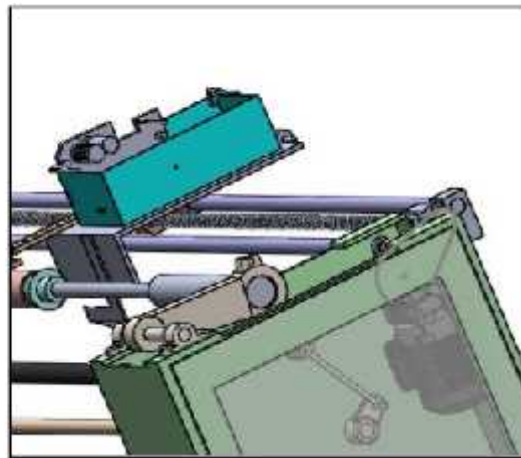


Fig III.5. Mécanisme de translation.

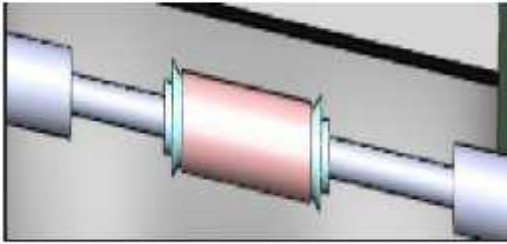


Fig III.6. Le mandrin avec le moule.

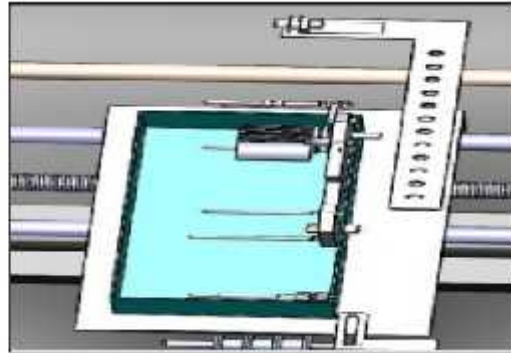


Fig III.7. Bain de résine.

La figure suivante représente l'assemblage de la machine :

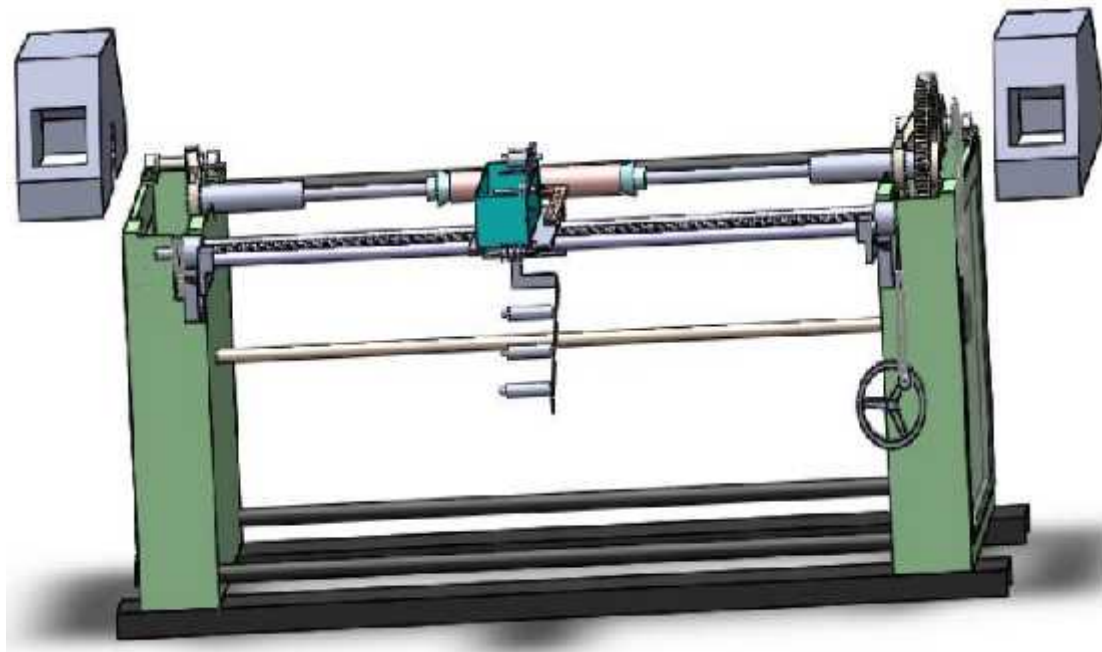


Fig III.8. Assemblage de la machine avec « solidworks ». [18]

III .3. 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 connaître 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. [18]

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.4. 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 stratifil 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° à 80°. 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°. Ce type d'enroulement est assez peu utilisé ;

– **Enroulement polaire** : l'angle est moins de 5°. 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 placés 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 .4.1. 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 :

$$\tan(\alpha) = \frac{2\pi r N_m}{L N_s}$$

Tel que :

- N_s : Vitesse de rotation de la vis ;
- N_m : Vitesse de rotation du mandrin ;
- α : 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 ;
- Vitesse 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 .4. 2. Exemple de calcul avec quelques angles :

L'intervalle de variation de fréquence sera fixé pour chaque système :

- Système de rotation du mandrin : l'intervalle de fréquence est entre 10 et 150 Hz.
- Système de rotation de la vis : l'intervalle de fréquence est entre 3 et 100 Hz.

Le travail sera fait avec des tubes des différents diamètres.

) Cas sans variateur de fréquence

Dans ce cas, la fréquence du système égale la fréquence du réseau (50 Hz). La vitesse de rotation du mandrin est de :

$$50 \text{ Hz} \longrightarrow 14,47 \text{ tr/mn}$$

La vitesse de rotation de la vis est de :

$$50 \text{ Hz} \longrightarrow 280 \text{ tr/mn}$$

) Avec variateur de fréquence

Les angles d'enroulement les plus utilisés vont être choisis, ainsi que quelques valeurs de fréquences du mandrin pour trouver la vitesse de rotation de la vis qui convient. Après ça, l'angle pratique de l'enroulement va être vérifié par rapport à l'angle théorique.

o Vitesse de rotation du mandrin en fonction de la fréquence :

$$N_m \propto \frac{f_m}{50} \times 14,47$$

Fréquence du mandrin f_m	10	20	30	50	100	120	150
N_m	2,89	5,79	8,68	14,47	28,94	34,73	43,41

Tableau III .1. Vitesse de rotation du mandrin en fonction de la fréquence.

o Vitesse de rotation de la vis N_s :

La vitesse de rotation de la vis est donnée par :

$$N_s \propto \frac{2\pi r N_m}{L \tan(\alpha)}$$

L'intervalle de fréquence est entre 3 et 100 Hz, c'est-à-dire, la vitesse de rotation de la vis est entre 16,8 et 560 tr/mn.

➤ *Pour un diamètre du cylindre d'enroulement de 70 mm.*

Le tableau suivant illustre la variation de la vitesse de rotation de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la vitesse de rotation du mandrin.

α° $N_m : \text{tr/mn}$	20	30	45	50	55	60	75	89
2,89	290,87	183,37	105,87	88,83	74,13	61,12	28,36	
5,79		367,38	212,10	178,00	148,50	122,46	56,83	
8,68			318,00	266,80	222,65	183,58	85,20	
14,47				444,79	371,16	306	142	
28,94							284	18,50
34,73							340,9	22,20
43,41							426	21,75

Tableau III .2. Vitesse de rotation de la vis pour D=70 mm.

Le tableau suivant illustre la variation de la fréquence de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la fréquence du mandrin.

α° $f_m : \text{Hz}$	20	30	45	50	55	60	75	89
10	51,94	32,74	18,9	15,86	13,23	10,91	5	
20		65,6	37,87	31,78	26,51	21,86	10,15	
30			56,78	47,64	39,75	32,78	15,21	
50				79,42	66,27	54,64	25,35	
100							50,71	3,3
120							60,87	3,96
150							76	3,88

Tableau III .3. Fréquence de la vis pour D=70 mm.

➤ **Pour un diamètre du cylindre d'enroulement de 90 mm.**

Le tableau suivant illustre la variation de la vitesse de rotation de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la vitesse de rotation du mandrin.

a (°) N _m :tr/mm	20°	30°	45°	50°	55°	60°	75°	89°
2,89	373,98	235,76	136	114,2	95,3	61,12	36,47	
5,79		472,34	272,7	228	190,9	157,44	73	
8,68			408,8	343	286,26	236	109,54	
14,47					477	393	182,6	
28,94							365,2	23,79
34,73							438,3	28,55
43,41								35,68

Tableau III .4. Vitesse de rotation de la vis pour D= 90 mm.

Le tableau suivant illustre la variation de la fréquence de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la fréquence du mandrin.

a (°) f _m : Hz	20	30	45	50	55	60	75	89
10	66,78	42,1	24,28	20,39	17	10,91	6,5	
20		84,34	48,69	40,7	34	28	13	
30			73	61,25	81,78	42	19,56	
50					85,17	70,17	32,6	
100							65,2	4,25
120							78,26	5,1
150								6,37

Tableau III .5. Fréquence de la vis pour D=90 mm

➤ **Pour un diamètre du cylindre d'enroulement de 104 mm.**

Le tableau suivant illustre la variation de la vitesse de rotation de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la vitesse de rotation du mandrin.

$\alpha(^{\circ})$ $N_m : \text{tr/mm}$	20	30	45	50	55	60	75	89
2,89	432,15	272,4	157,29	131,98	110,13	90,81	42,14	
5,79			315,13	264,42	220,65	181,94	84,44	
8,68			472,42	396,4	330,79	272,75	126,5	
14,47						454,69	211	
28,94							422	27,49
34,73								32,99
43,41								41,24

Tableau III .6. Vitesse de rotation de la vis pour D= 104 mm.

Le tableau suivant illustre la variation de la fréquence de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la fréquence du mandrin.

$a(^{\circ})$ $f_m : \text{Hz}$	20	30	45	50	55	60	75	89
10	77,16	48,64	28	23,56	17,66	16,21	7,52	
20			56,27	47,21	39,4	32,48	15,1	
30			84,36	70,78	59	48,7	22,6	
50						81,19	37,67	
100							75,35	4,9
120								5,89
150								7,36

Tableau III .7. Fréquence de la vis pour D=104 mm.

➤ **Pour un diamètre du cylindre d'enroulement de 165 mm.**

Le tableau suivant illustre la variation de la vitesse de rotation de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la vitesse de rotation du mandrin.

α (°) N_m :tr/mm	20	30	45	50	55	60	75	89
2,89		432,23	249,55	209,39	174,73	144	66,86	
5,79				419,52	350	288,65	133,96	
8,68						432,73	200,83	
14,47							334,79	21,8
28,94								43,61
34,73								52,35
43,41								65,43

Tableau III .8. Vitesse de rotation de la vis pour D= 165 mm.

Le tableau suivant illustre la variation de la fréquence de la vis en fonction de l'angle d'enroulement et de la fréquence du mandrin.

α (°) f_m : Hz	20	30	45	50	55	60	75	89
10		77,18	44,56	37,39	31,2	25,71	11,93	
20				74,91	62,5	51,54	23,92	
30						77,27	35,86	
50							59,78	3,89
100								7,79
120								9,35
150								11,68

Tableau III .9. Fréquence de la vis pour D=165 mm.

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 filamenteux dépend de la vitesse de rotation du mandrin, ainsi de la vitesse de rotation de la vis.

INTRODUCTION :

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

On a conçu ces tubes dans le but de faire une caractérisation, pour cela nous avons confectionné 2 catégories de tubes, la première à 8 couches et la deuxième à 10 couches de renfort.

IV.1. Elaboration des tubes :

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

Dans l'objet d'une comparaison, on a aussi élaboré 4 tubes à base de fibre de verre, 3 avec résine époxy et un avec résine polyester.

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.1. 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

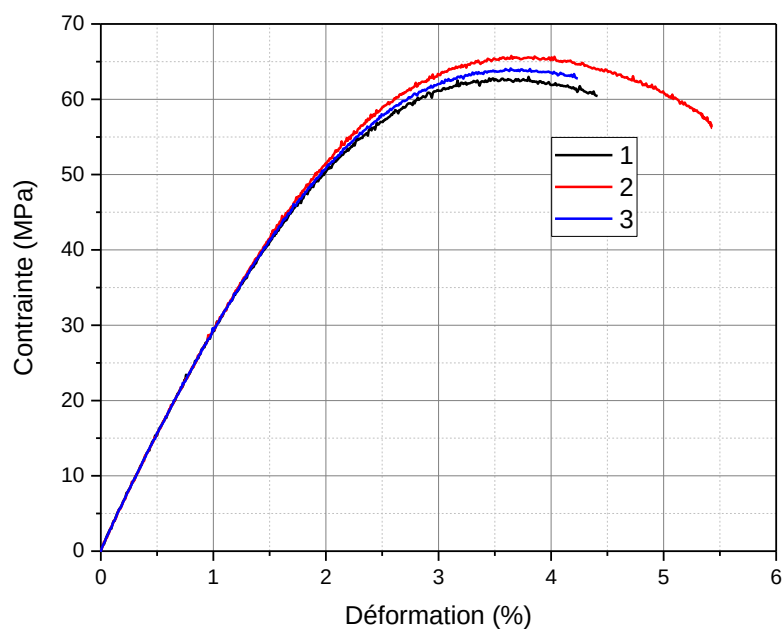


Fig. IV .1 Comportement de résine G 35 en traction

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.2. 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.3. Caractéristiques des fibres

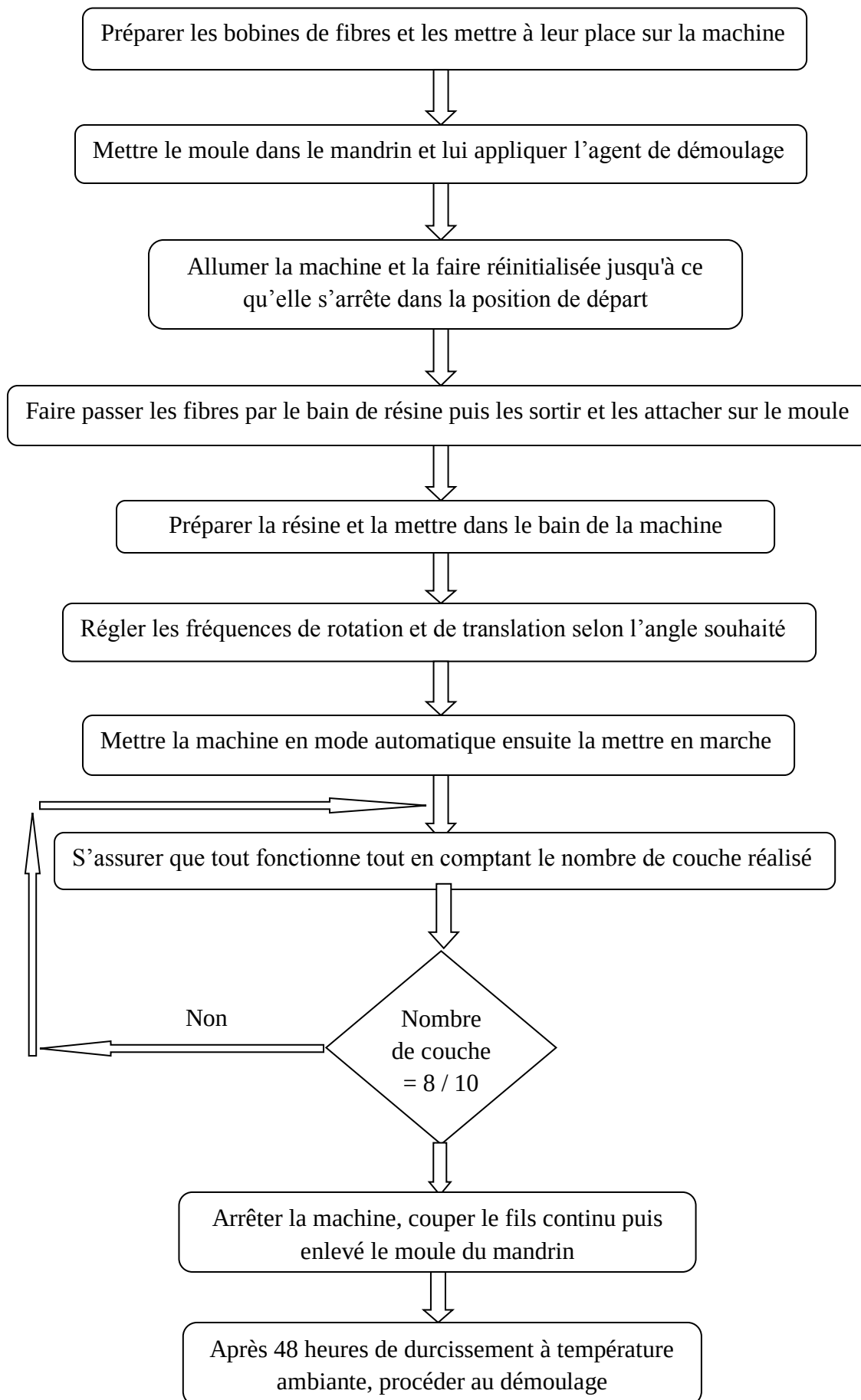
Pendant la réalisation des tubes, on a joué sur l'architecture des fibres. Comme on l'a déjà cité, on a fait deux catégories de tubes l'une à 8 couches et l'autres à 10 couches de fibres. Les deux catégories comportent des tubes de différents angles.

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

N ^{bre} de couche	Angle	Architecture	Renfort	Matrice
08	30°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 30° + 1 couche de finition 90°	Fibre de Jute	Résine Epoxy
	45°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 45° + 1 couche de finition 90°		
	50°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 50° + 1 couche de finition 90°		
	55°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 55° + 1 couche de finition 90°		
	60°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 60° + 1 couche de finition 90°		
	75°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 75° + 1 couche de finition 90°		
	90°	8 couches de 90°		
	45°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 45° + 1 couche de finition 90°	Fibre de Verre	
	55°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 55° + 1 couche de finition 90°		
	90°	8 couches de 90°		
		55°	1 couche primaire de 90° + 6 couches ± 55° + 1 couche de finition 90°	Fibre de verre
10	30°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 30° + 1 couche de finition 90°	Fibre de Jute	Résine Epoxy
	45°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 45° + 1 couche de finition 90°		
	50°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 50° + 1 couche de finition 90°		
	55°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 50° + 1 couche de finition 90°		
	60°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 60° + 1 couche de finition 90°		
	75°	1 couche primaire de 90° + 8 couches ± 75° + 1 couche de finition 90°		
	90°	10 couches de 90°		

Tableau IV.4. Architecture des différents tubes réalisés

Les étapes de mise en forme des tubes sont décrites dans le plan suivant :



Les figures suivantes représentent quelques étapes de mise en forme des tubes :



Fig IV.2. Bobine de fibre dans leur place à la machine

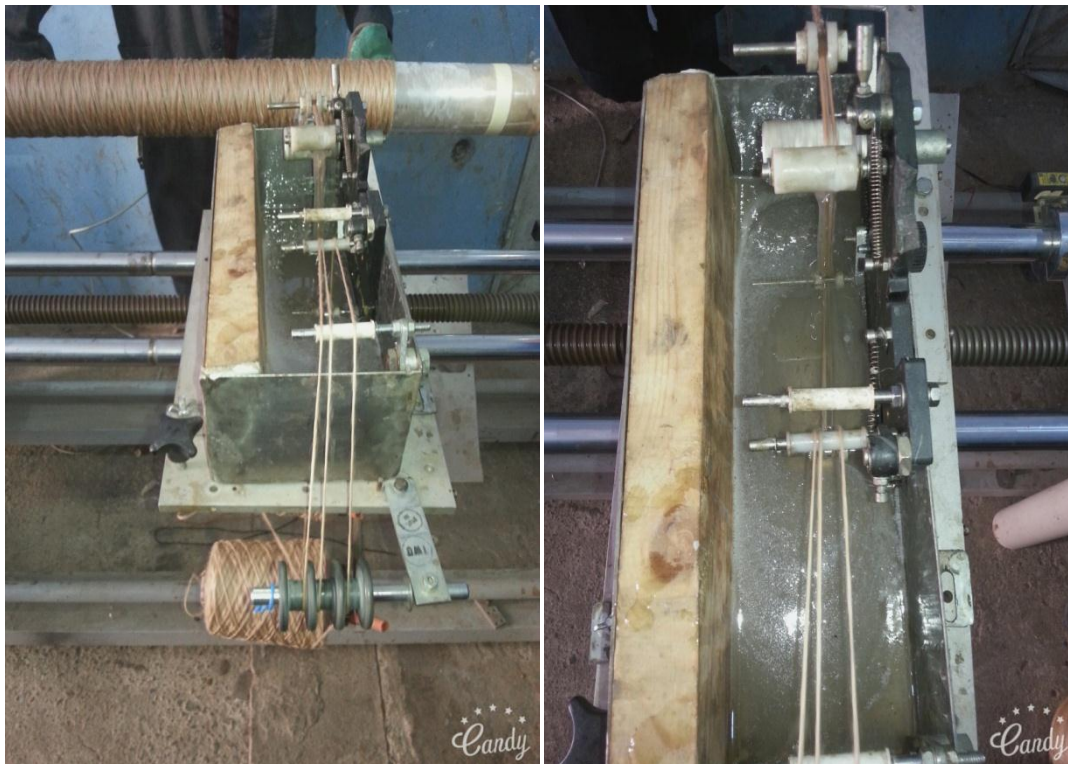


Fig IV.3. Fibres passant dans le bain de résine



Fig IV.4. Réglage des fréquences de translation et de rotation



Fig IV.5. La machine en état de marche

Voilà une figure qui nous montre notre produit finis :



Fig IV.6. Tubes composites jute/époxy et verre/époxy

IV.2. Caractérisation des tubes :

Pour la caractérisation de ces tubes, on à procéder à des essais de compression, de traction et de flexion. Ces essais sont effectués au niveau de l'unité de recherche UR-MPE.

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

IV.2.1. Essai de compression :

Préparation des éprouvettes :

Nous avons coupé tous les tubes pour avoir des éprouvettes qui s'adapte à la machine de compression, puis on a mis ces éprouvettes dans la machine.

Voilà des figures qui nous montrent toutes nos éprouvettes prêtes à passer à l'essai :



Fig IV.7. Deux éprouvettes différentes



Fig IV.8. Eprouvettes prêtes pour l'essai

Les essais de compression sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type ZwickZ010 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE, dotée d'un capteur de force de capacité 10 KN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 9.0.



Fig IV.9. Machine de compression Zwick/Roell

Les figures suivantes représentent différents tubes pendant la réalisation des essais :

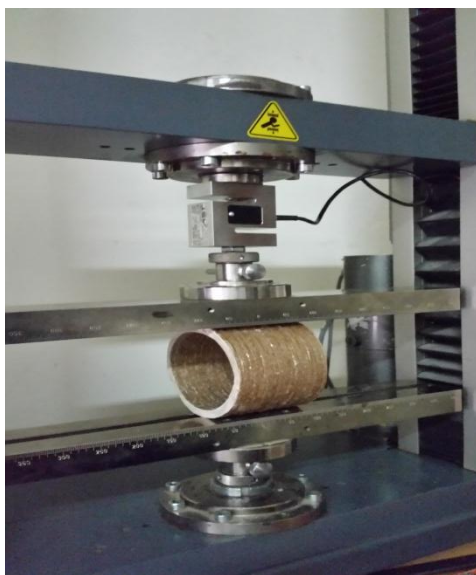


Fig IV.10. Déroulement de l'essai d'un tube jute/époxy

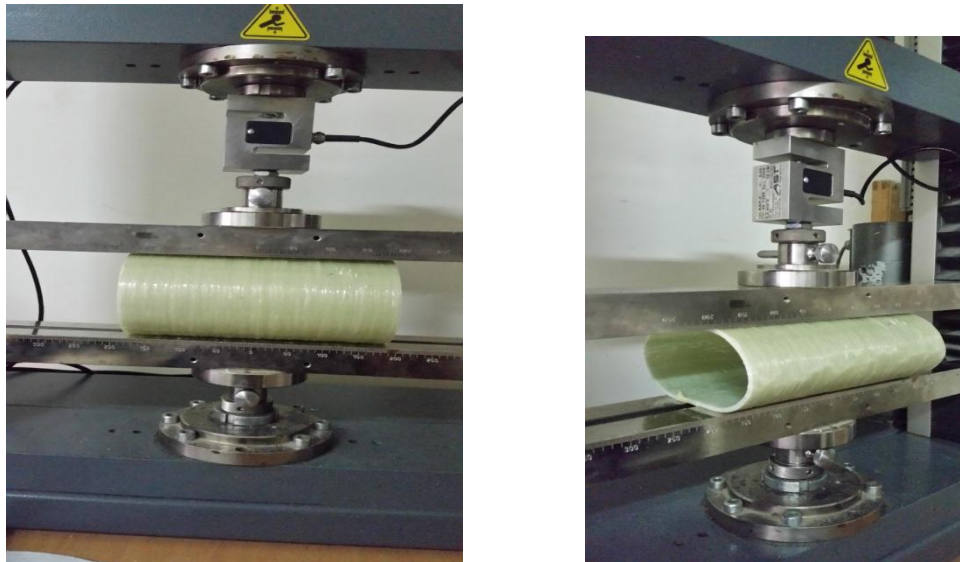


Fig IV.11. Déroulement de l'essai d'un tube verre/époxy

Les courbes contraintes-déformations des tubes à base de matrices époxy sont représentées dans les figures qui suivent.

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

- Courbes des tubes de catégorie 8 couches :

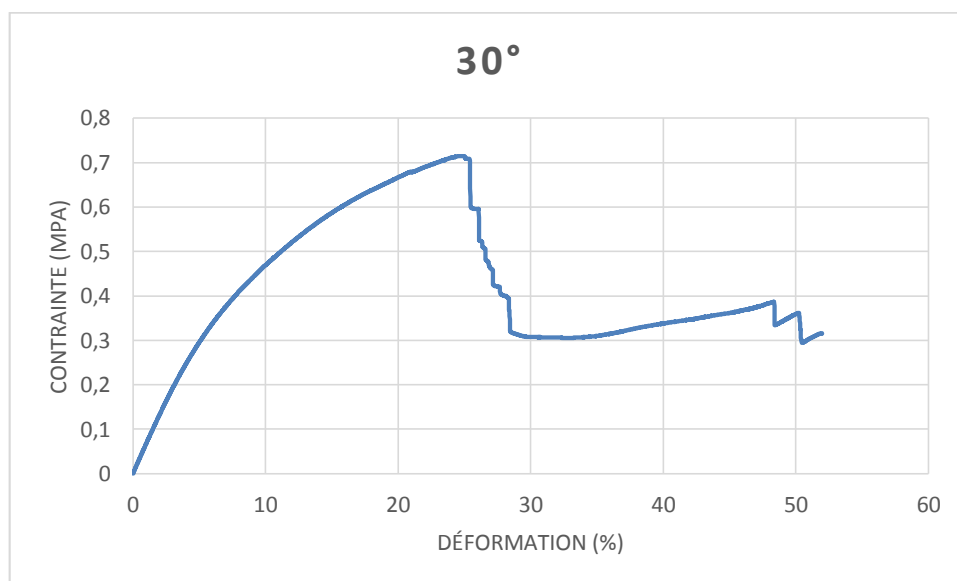


Fig IV.12. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (30°)

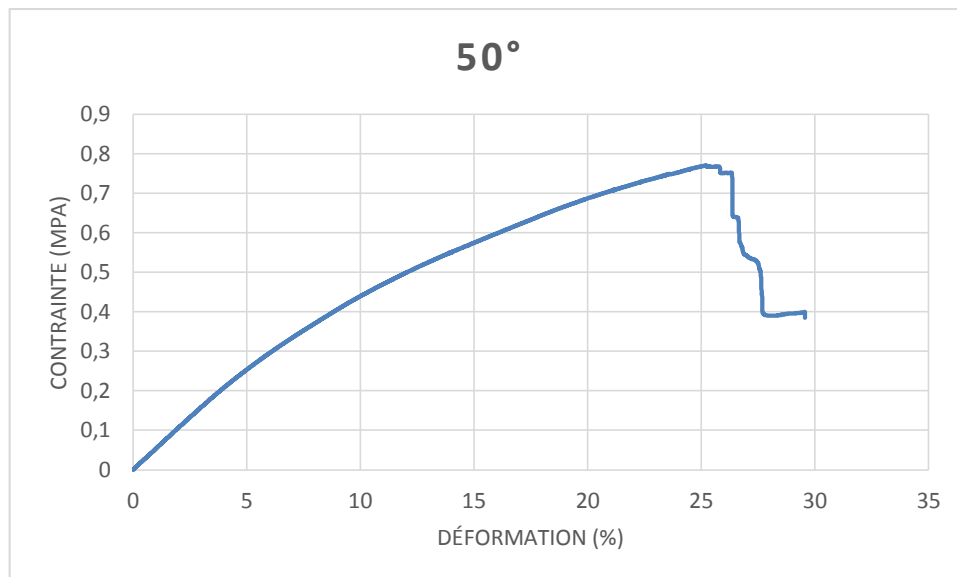


Fig IV.13. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (50°)

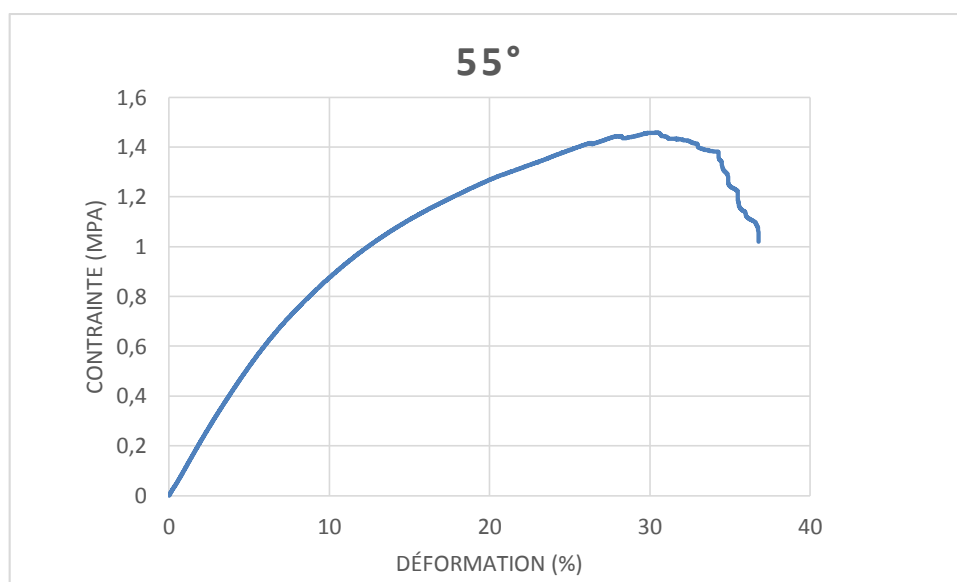


Fig IV.14. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (55°)

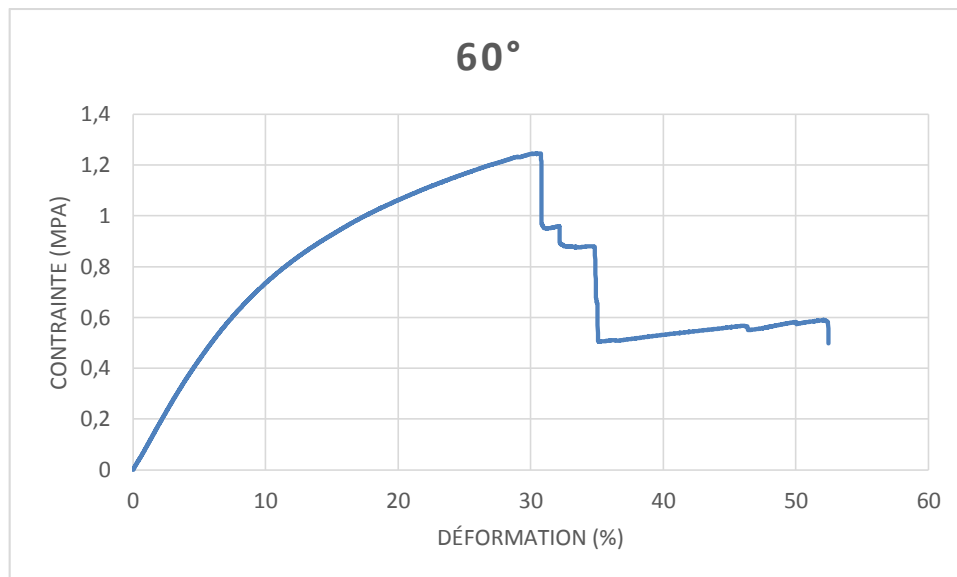


Fig IV.15. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (60°)

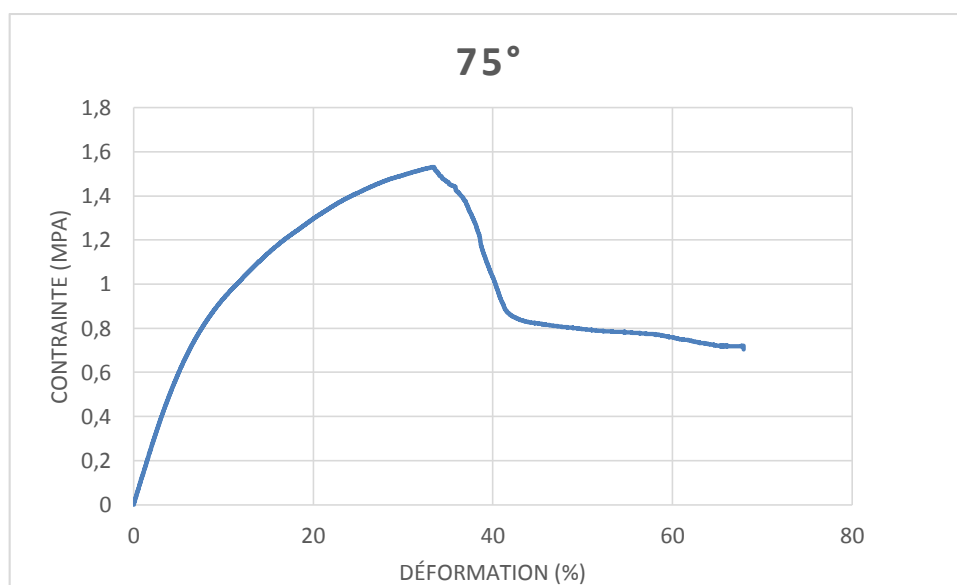


Fig IV.16. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (75°)

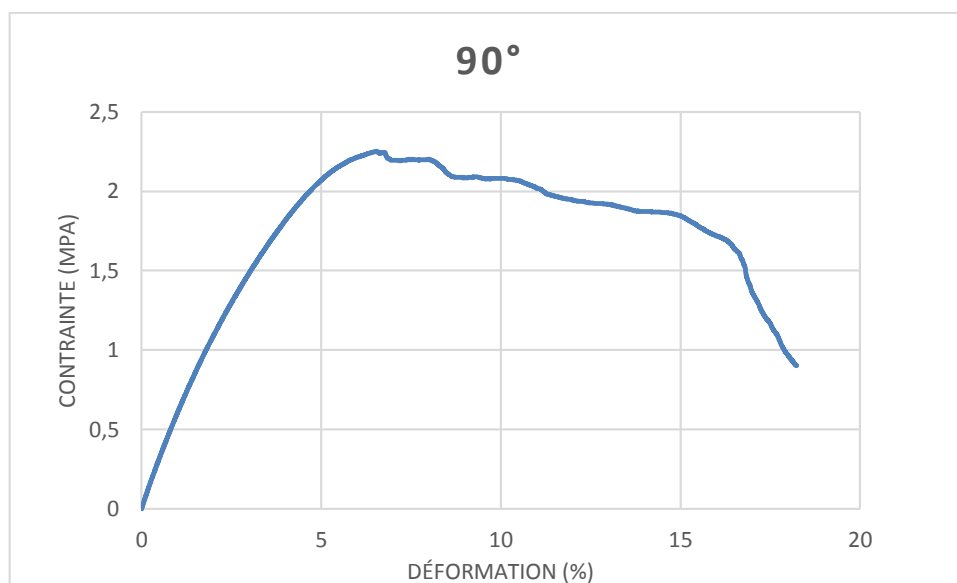


Fig IV.17. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de compression de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	0.7146	24.49	4.8733
50°	0.7690	25.07	4.9322
55°	1.4471	30.7	9.9246
60°	1.2463	30.74	7.7096
75°	1.5299	33.20	10.3793
90°	2.2488	6.55	44.2102

Tableau IV.5. Paramètres des essais de compression des tubes (8 couches)

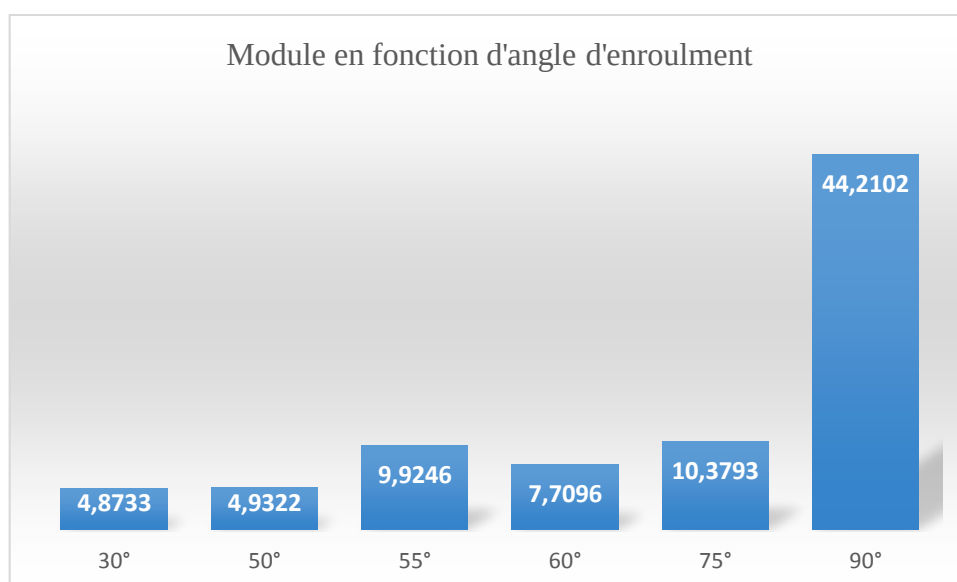


Fig IV.18. Histogramme du module de Young en fonction d'angle d'enroulement

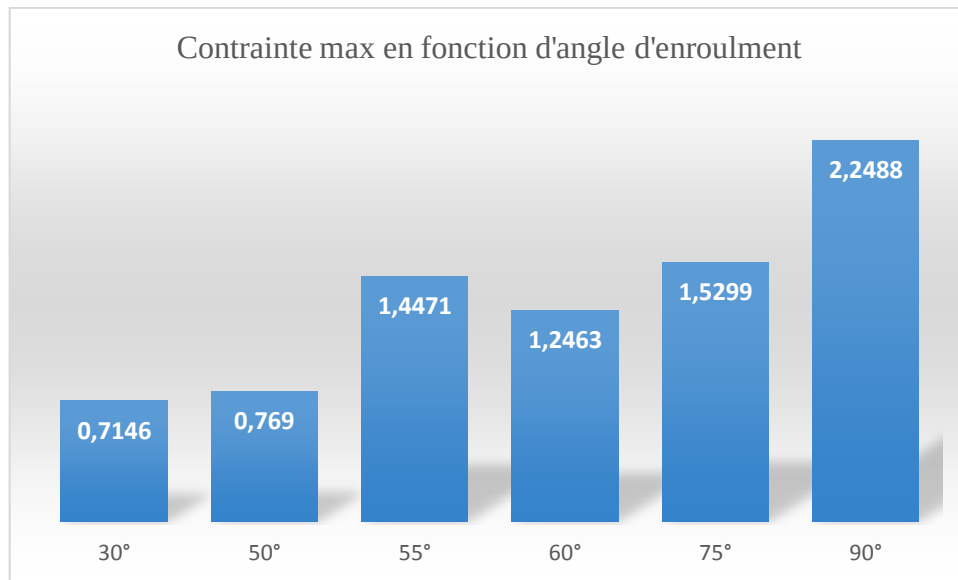


Fig IV.19. Histogramme de contrainte max en fonction d'angle d'enroulement

Les histogrammes 18 et 19 présentent les modules et les contraintes calculées 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 55° respectivement cela est expliquée par l'angle entre l'axe des efforts appliquées et l'axe des angles d'enroulement, dans le cas d'angle 90° l'axe des efforts est perpendiculaire sur l'angle d'enroulement.

- Courbes des tubes de catégorie 10 couches :

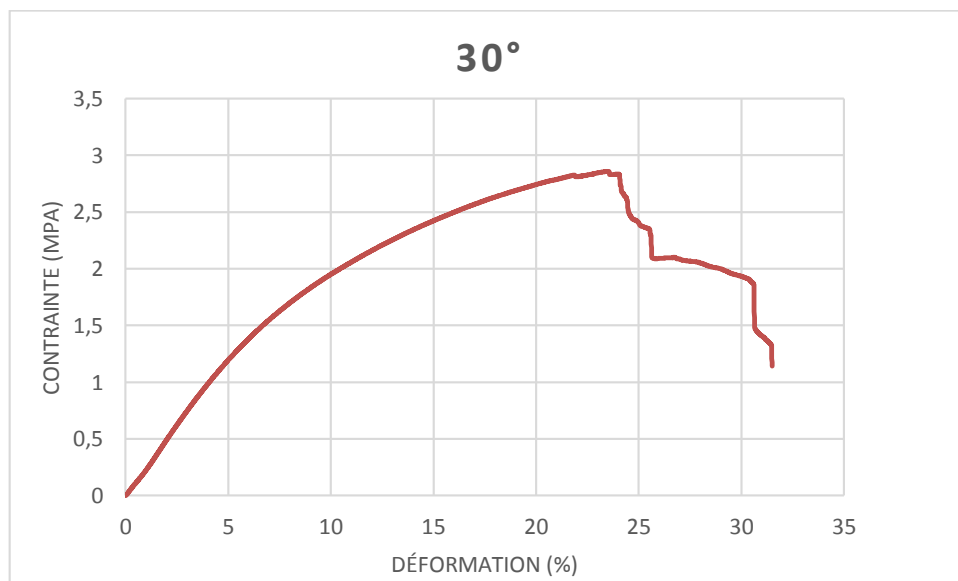


Fig IV.20. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (30°)

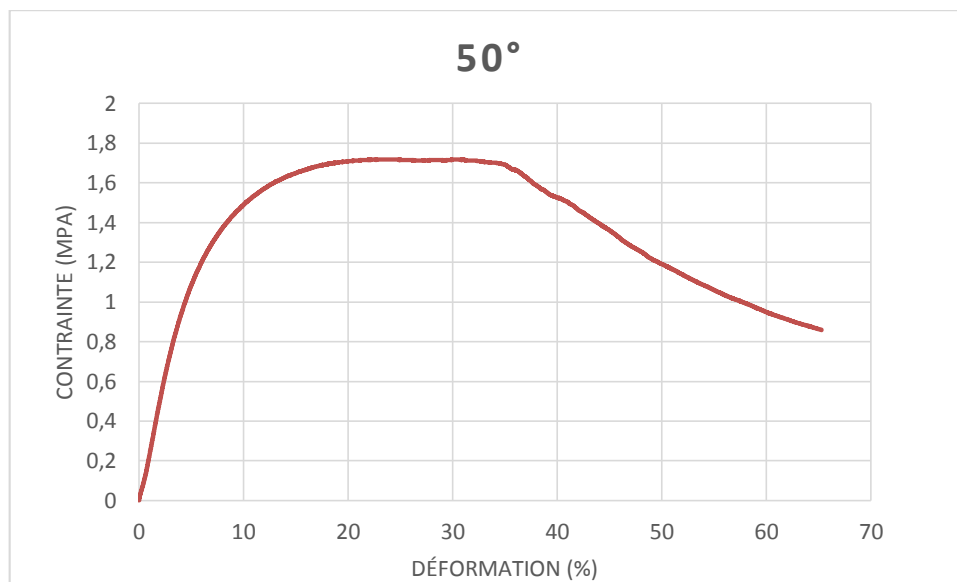


Fig IV.21. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (50°)

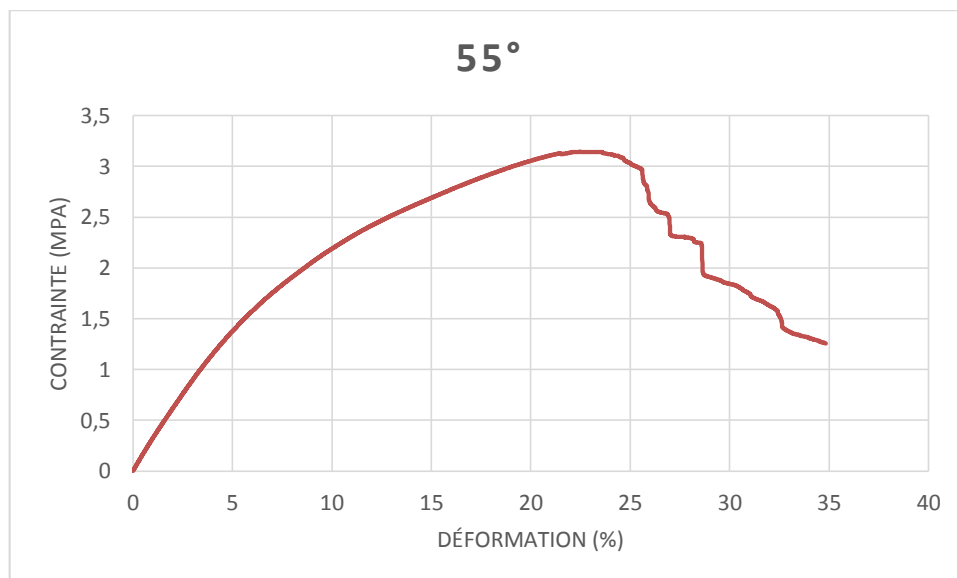


Fig IV.22. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (55°)

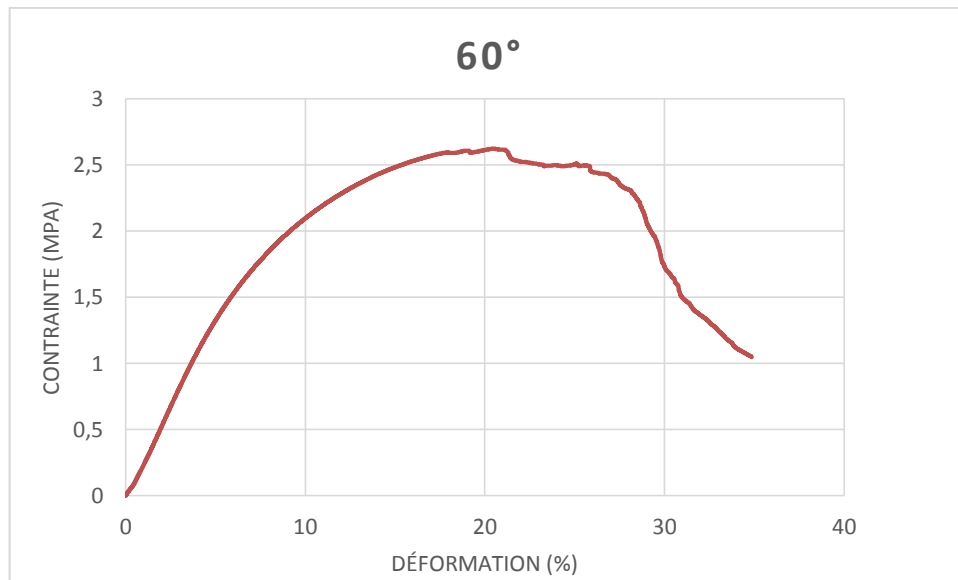


Fig IV.23. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (60°)

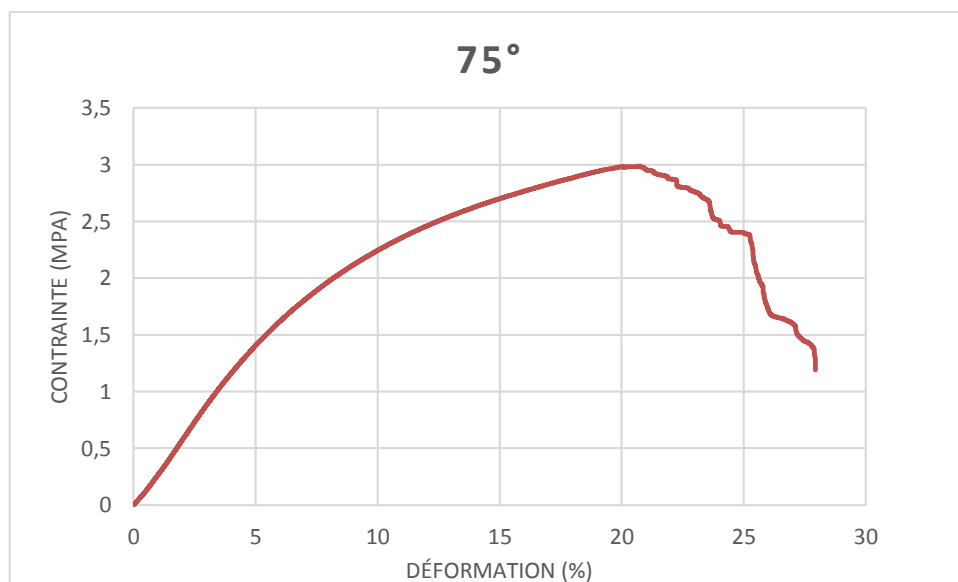


Fig IV.24. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (75°)

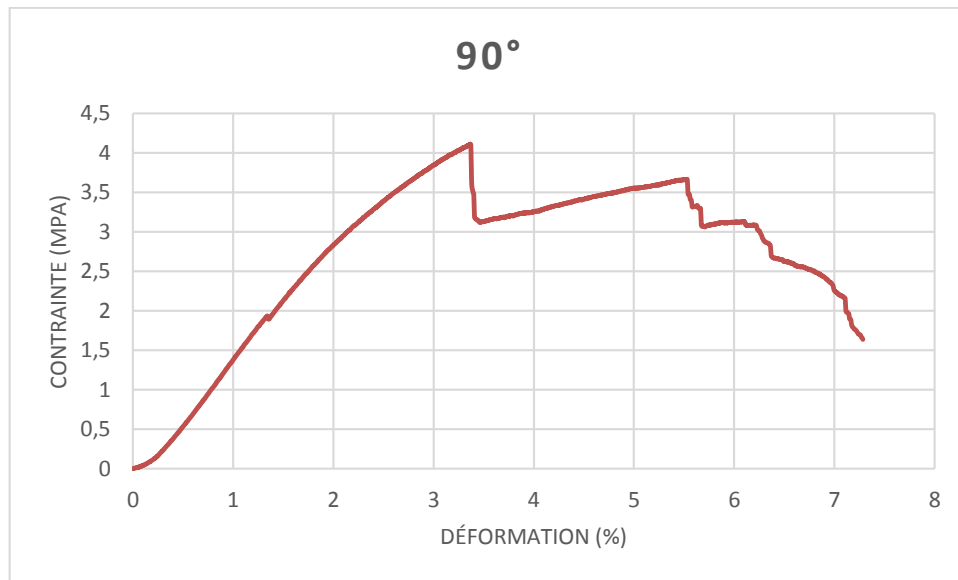


Fig IV.25. Comportement à la compression d'un tube époxy/Jute (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de compression de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	2.8498	23.13	24.1628
50°	2.9874	22.90	24.9755
55°	3.1414	22.87	25.4290
60°	2.6	19.55	26.2428
75°	2.9832	20.42	29.0946
90°	4.0535	3.37	64.1765

Tableau IV.6. Paramètres des essais de compression des tubes (10 couches)

La figure 4.26 représente un histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories des tubes 8 couches et 10 couches.

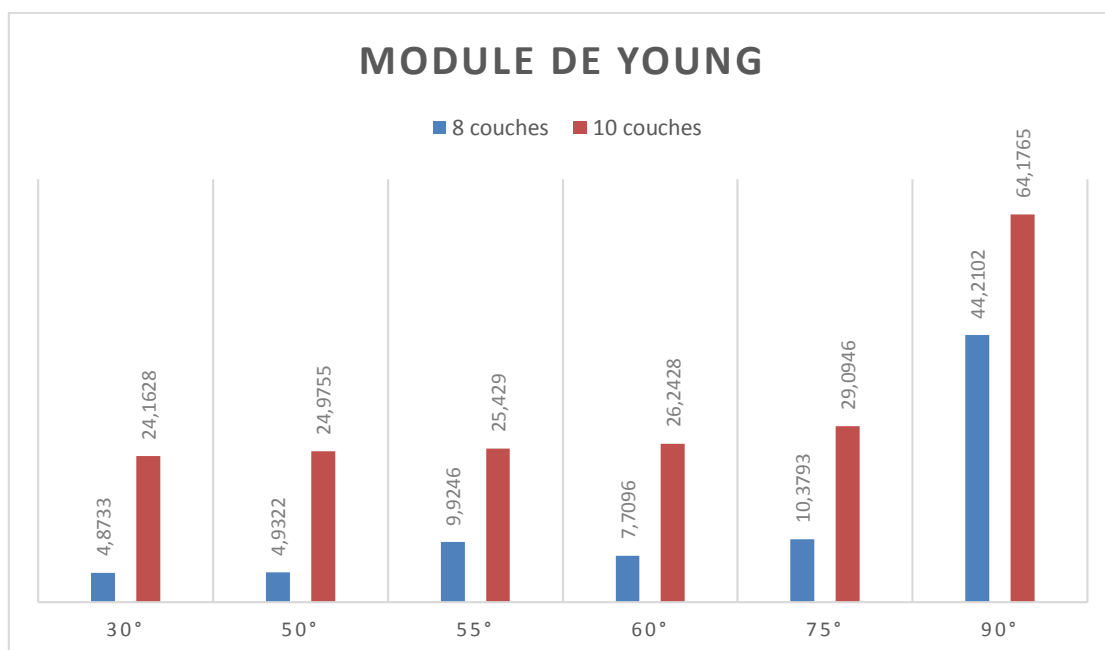


Fig IV.26. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches

L'évolution de module est expliquée comme le cas précédent par l'angle entre l'axe des efforts est celle d'enroulement, la stabilité des valeurs pour les angles 30, 50, 55 et 60 est due au fait que le pas d'enroulement (trois files) est insuffisant pour créer des conséquences sur la rigidité des tubes à 10 couches.

- Courbes des tubes à base époxy/verre :

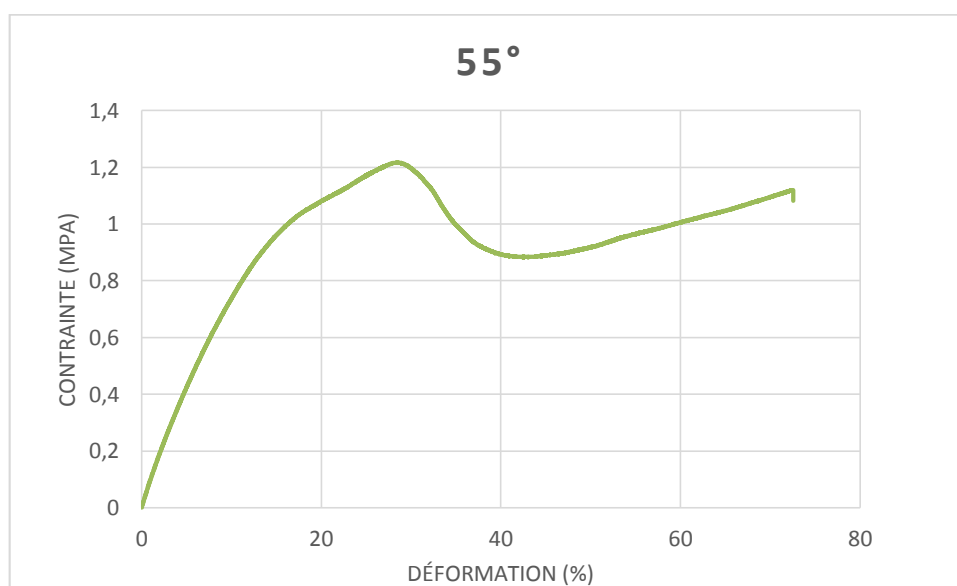


Fig IV.27. Comportement à la compression d'un tube époxy/verre (55°)

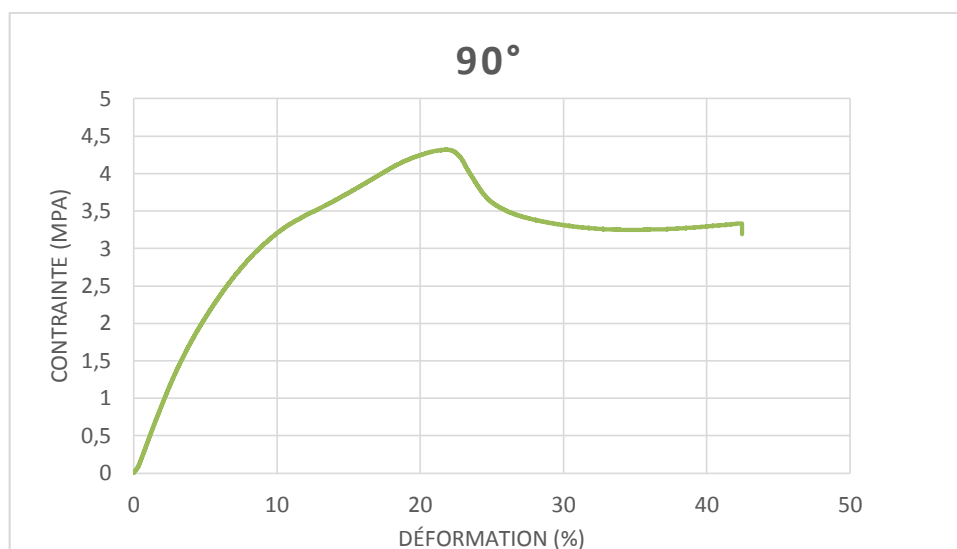


Fig IV.28. Comportement à la compression d'un tube époxy/verre (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de compression de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{MPa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (MPa)
55°	1.2136	27.80	7.3425
90°	4.2663	20.33	46.1707

Tableau IV.7. Paramètres des essais de compression des tubes époxy/verre

La figure 4.29 représente un histogramme de comparaison entre les paramètres de compression (déformation, contrainte et Module de Young), des tubes époxy/Jute et époxy/verre avec un angle de 55°.

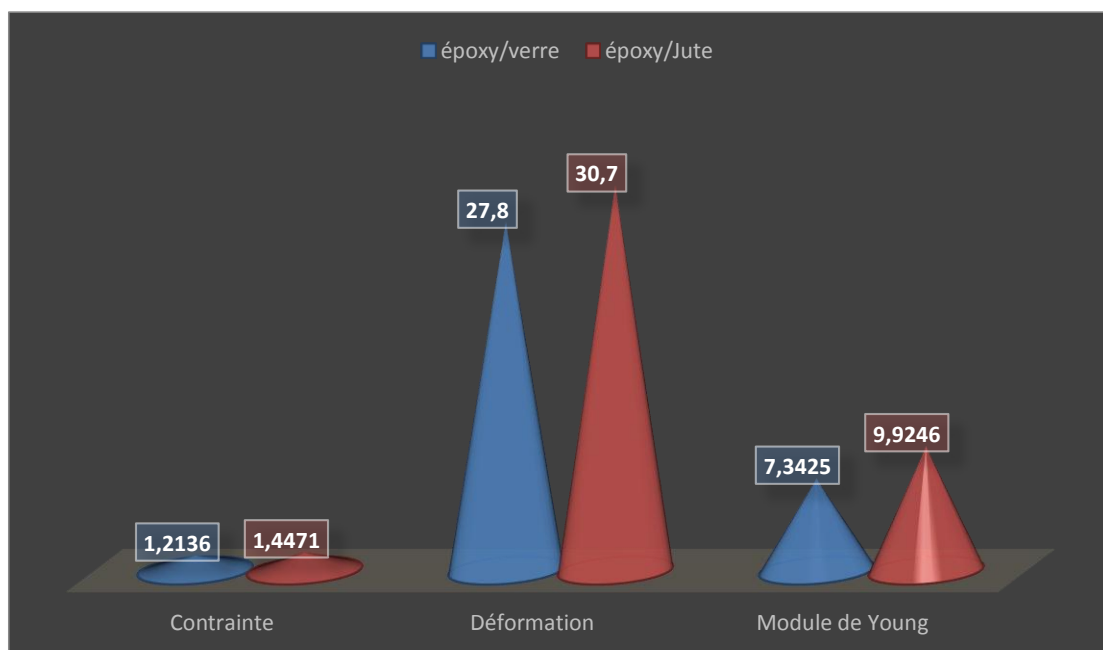


Fig IV.29. Histogramme de comparaison entre les paramètres de compression des tubes époxy/jute et époxy/verre (55°)

Les propriétés mécaniques des tubes de huit plis en fibre de jute sont supérieures à celle de fibre de verre ce qui montre la fiabilité et la possibilité de remplacer les fibres de verre par fibre de jute de point de vue mécaniques.

La figure 4.30 représente un histogramme de comparaison entre les paramètres de compression (déformation, contrainte et Module de Young), des tubes époxy/Jute et époxy/verre avec un angle de 90° .

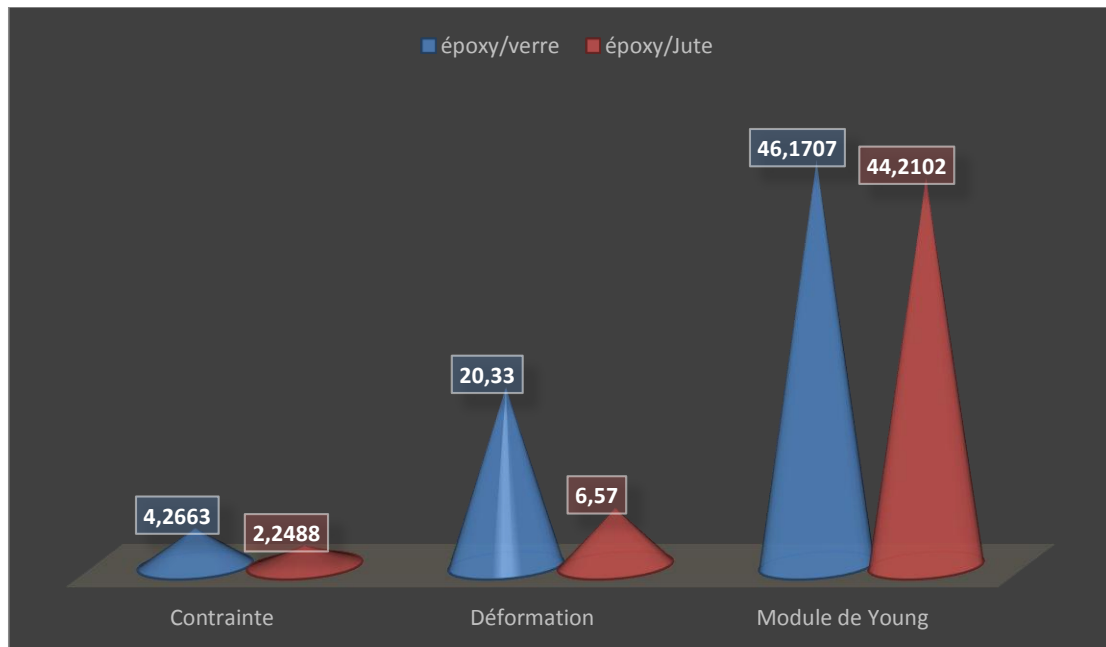


Fig IV.30. Histogramme de comparaison entre les paramètres de compression des tubes époxy/jute et époxy/verre (90°)

Cette figure montre que des angles d'enroulement de 90° la contrainte de rupture des tubes en fibre de jute est très limitée par rapport les tube à base de fibre de verre.

IV.2.2. 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.

Les essais de traction 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.



Fig 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.

- Courbes des tubes de catégories 8 couches :

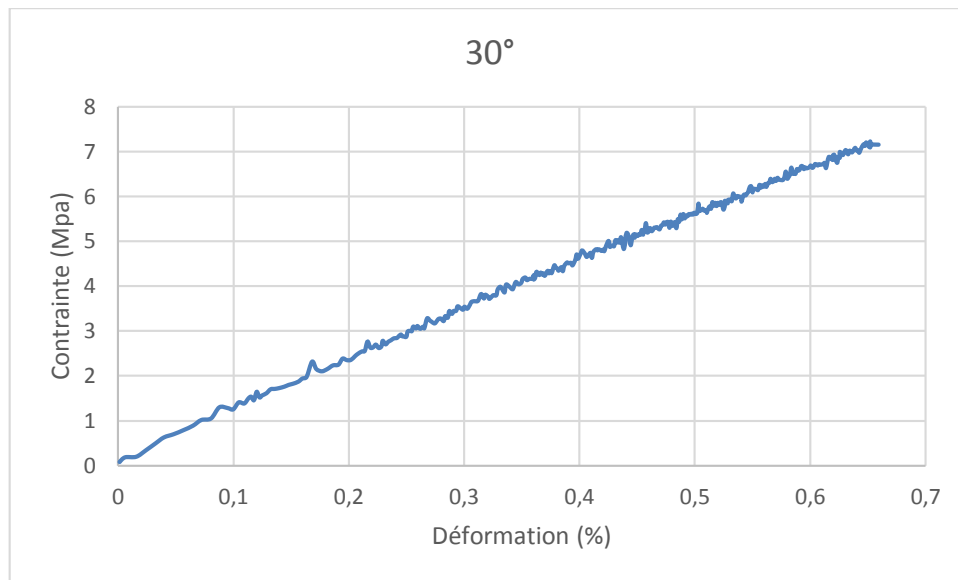


Fig IV.32. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (30°)

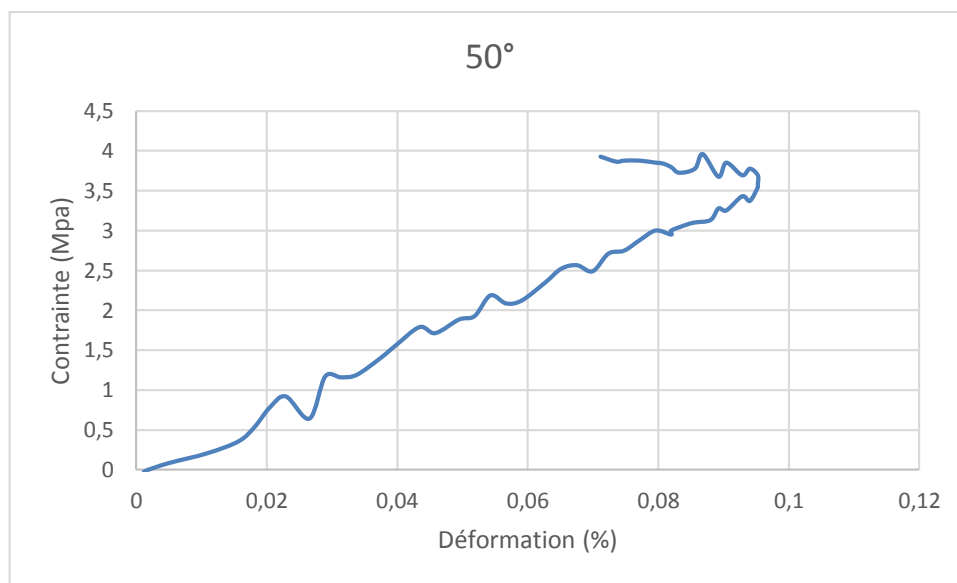


Fig IV.33. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°)

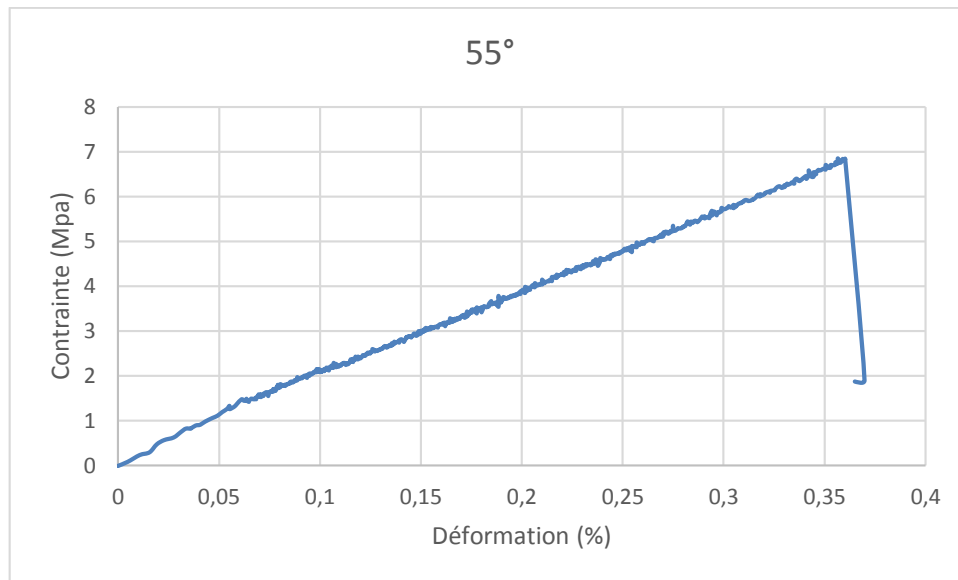


Fig IV.34. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°)

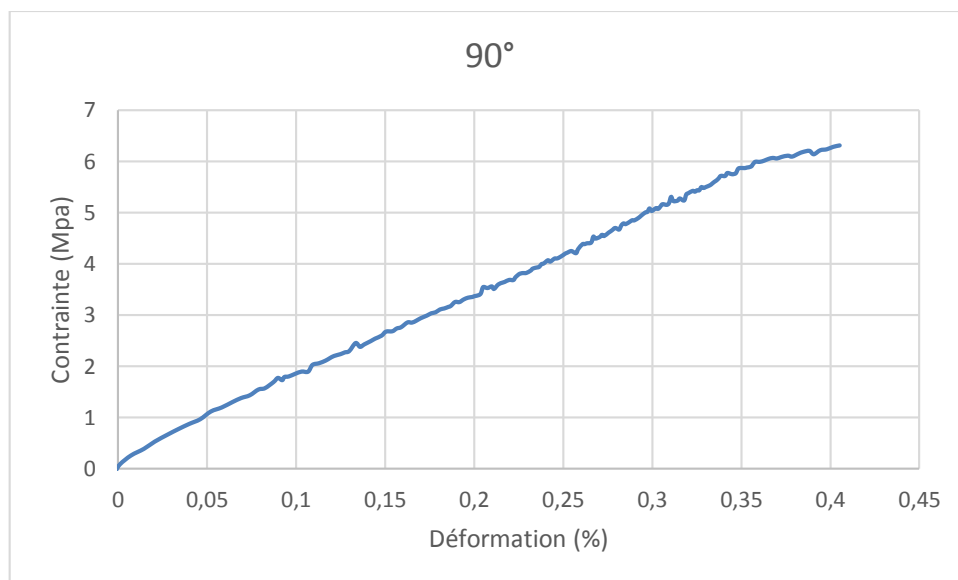


Fig IV.35. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de traction de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	7.1551	0.65	1277.67
50°	3.9591	0.08	2673.02
55°	6.8327	0.36	2339.21
90°	6.3122	0.40	1931.81

Tableau IV.8. Paramètres des essais de traction des tubes (8 couches)

Le module de Young prend des valeurs supérieures pour tube d'angle 50 et 55, les autres présentent des valeurs inférieures, ces résultats sont expliqués par l'adhérence fibre matrice d'une part, et par l'angle d'orientation des fibres d'autre parts.

- Courbes des tubes de catégorie 10 couches :

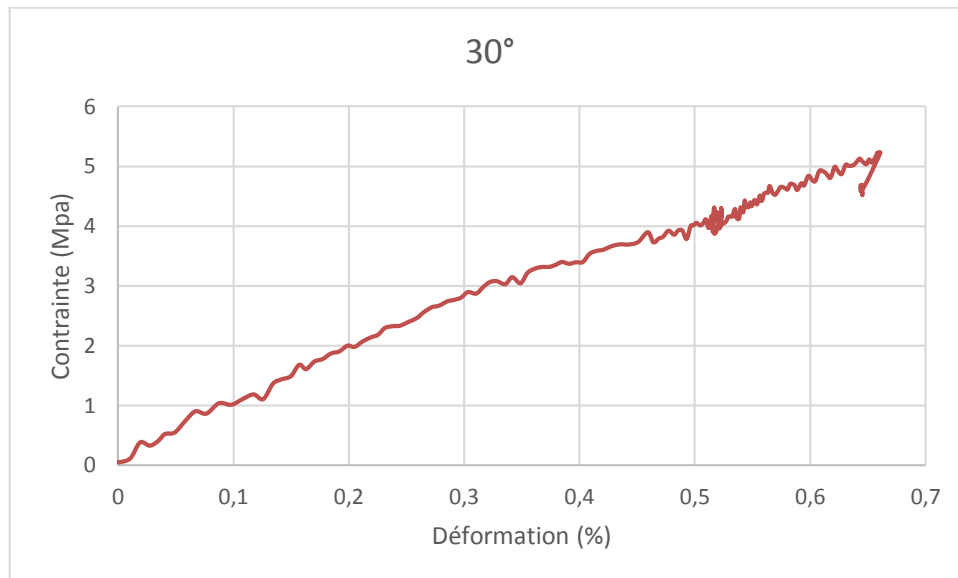


Fig IV.36. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (30°)

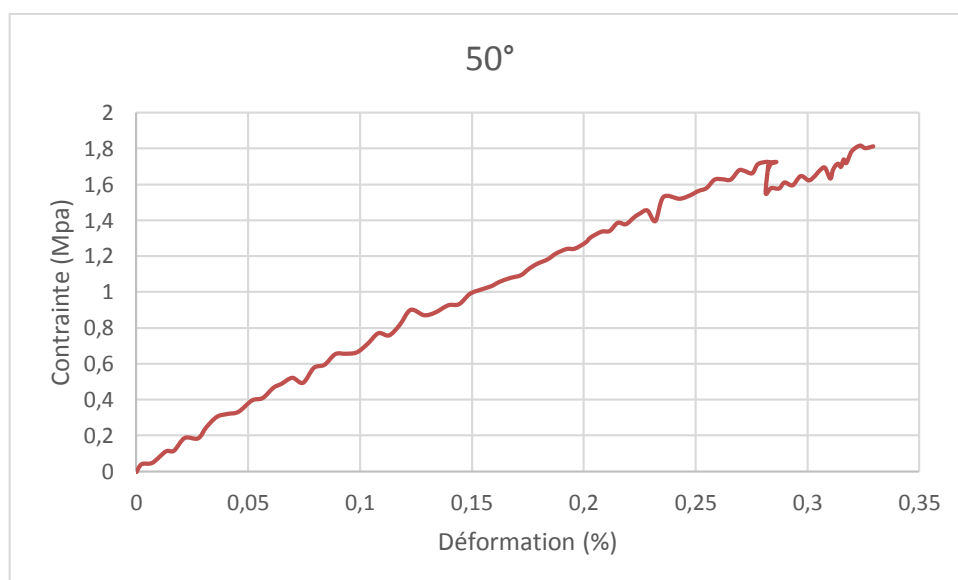


Fig IV.37. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (50°)

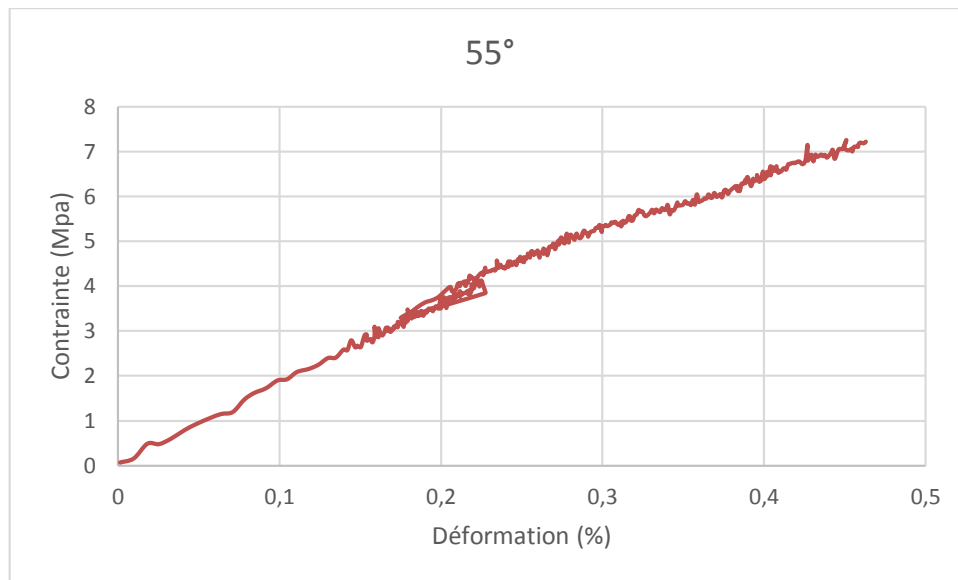


Fig IV.38. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (55°)

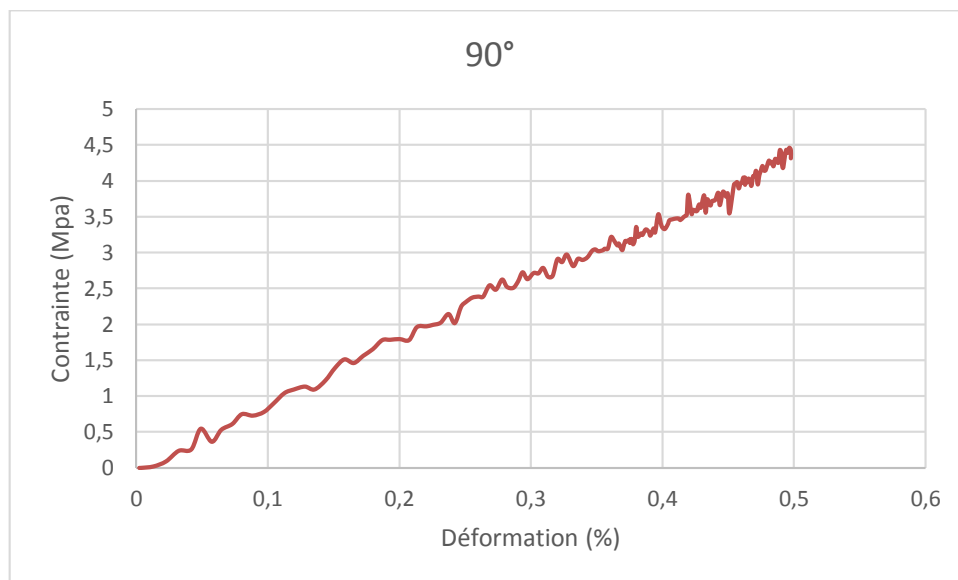


Fig IV.39. Comportement à la traction d'un tube époxy/Jute (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de traction de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	5.2237	0.66	1130.04
50°	1.8026	0.32	747.28
55°	7.2597	0.45	1800.14
90°	4.3898	0.49	1010.44

Tableau IV.9. Paramètres des essais de traction des tubes (10 couches)

La figure 4.40 représente un histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories des tubes 8 couches et 10 couches.

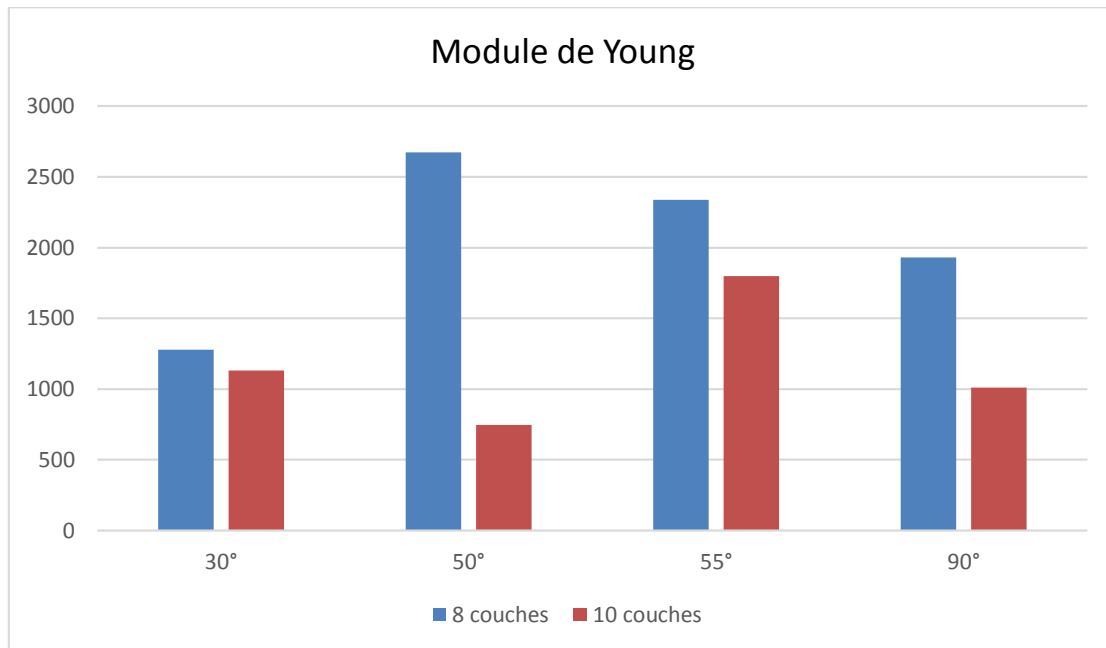


Fig IV.40. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches

Les paramètres élastiques sont d'une part, plus faible pour 10 couche, et prend les meilleurs résultats pour l'angle de 55°. Ce qui confirme l'insuffisance de pas d'enroulement pour 10 couches.

- Courbes des tubes à base époxy/verre :

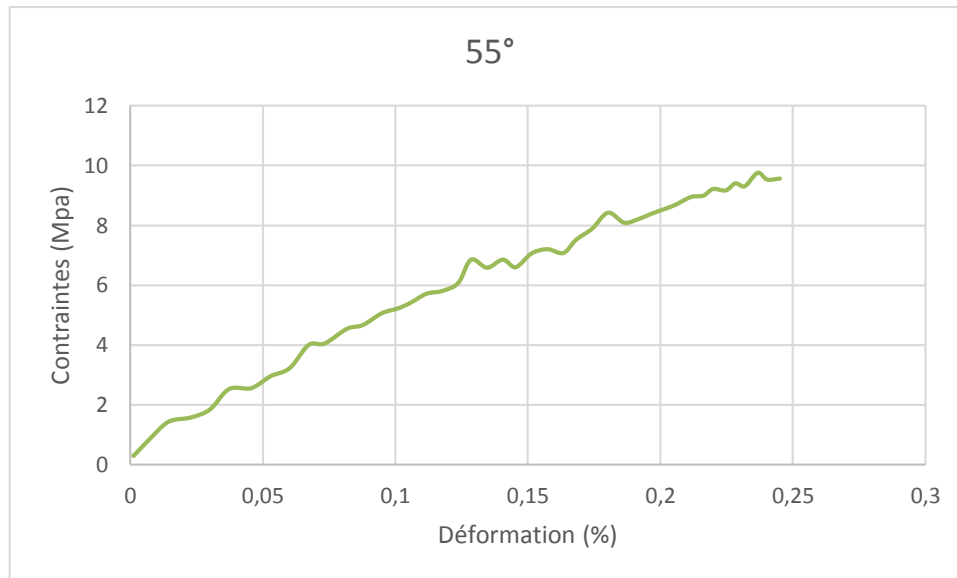


Fig IV.41. Comportement à la traction d'un tube époxy/verre (55°)

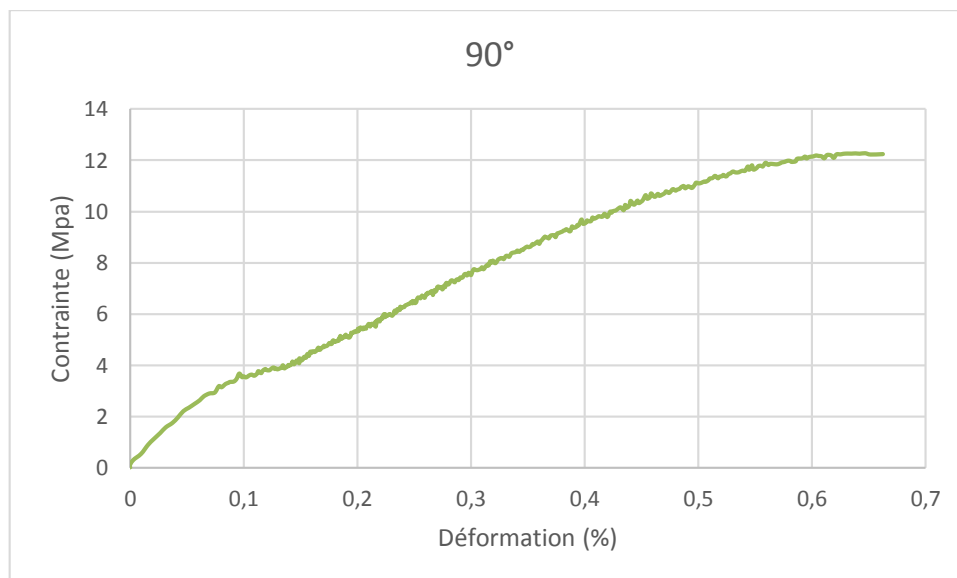


Fig IV.42. Comportement à la traction d'un tube époxy/verre (90°)

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de traction de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{MPa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (MPa)
55°	9.7589	0.23	5702.46
90°	12.25	0.64	3651.95

Tableau IV.10. Paramètres des essais de traction des tubes époxy/verre

La figure 4.43 représente un histogramme de comparaison du Module de Young des tubes époxy/Jute et époxy/verre.

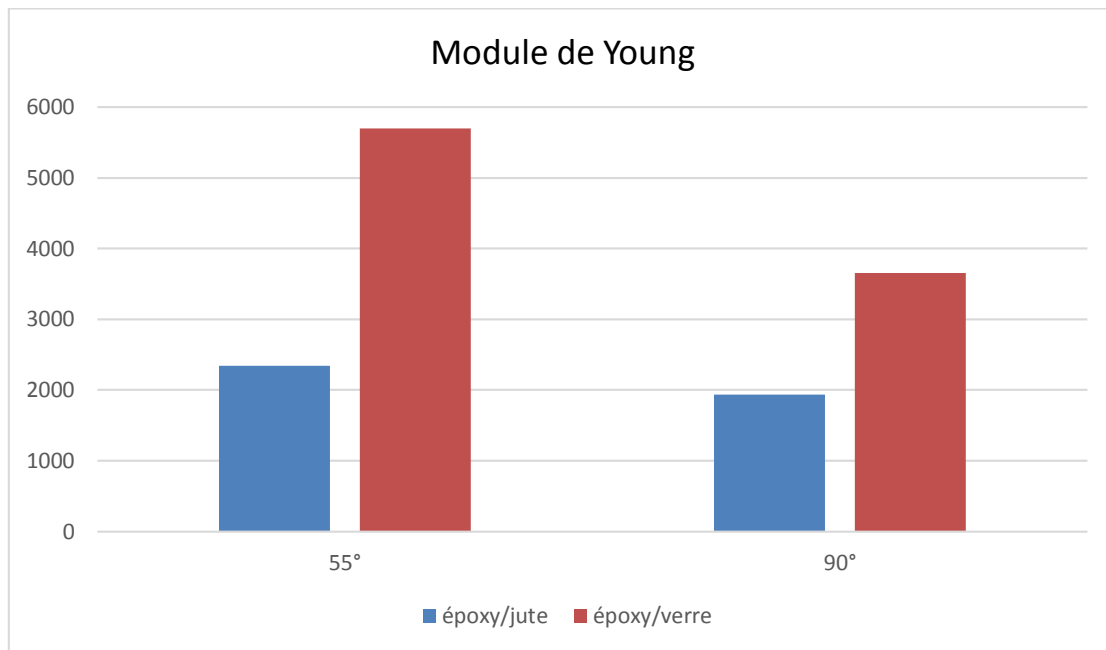


Fig IV.43. Histogramme de comparaison du Module de Young des tubes époxy/jute et époxy/verre

A partir de cette courbe on confirme que quel que soit la nature des fibres, l'angle d'enroulement 55° donne des meilleurs résultats, et ces meilleurs résultats sont marqués pour le cas des fibres de verre par rapport aux fibres de jute.

IV.2.3. Essai de traction circonférentielle :

Préparation des éprouvettes :

L'essai se fait dans la même machine de traction précédemment décrite.

Pour avoir des éprouvettes qui convient à cet essai, nous avons coupé les tubes en petit tubes de faible longueur pour qu'il s'adapte au dispositif qu'on a conçu pour la réalisation de cet essai. Ce dispositif est mis entre les mâchoires de la machine de traction tandis que notre éprouvette se met dedans comme le montre les figures qui suivent :



Fig IV.44. Eprouvette de traction circonférentielle.

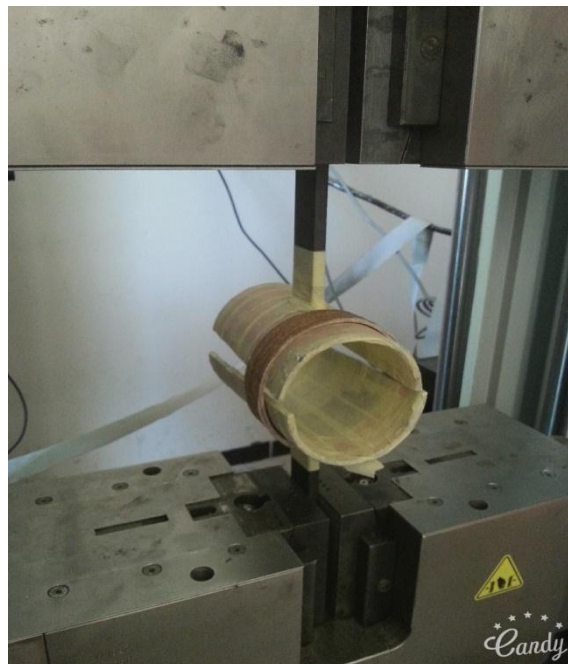


Fig IV.45. Eprouvette dans le dispositif conçu pour cet essai.

Les figures suivantes nous montrent une éprouvette pendant la réalisation de cet essai :

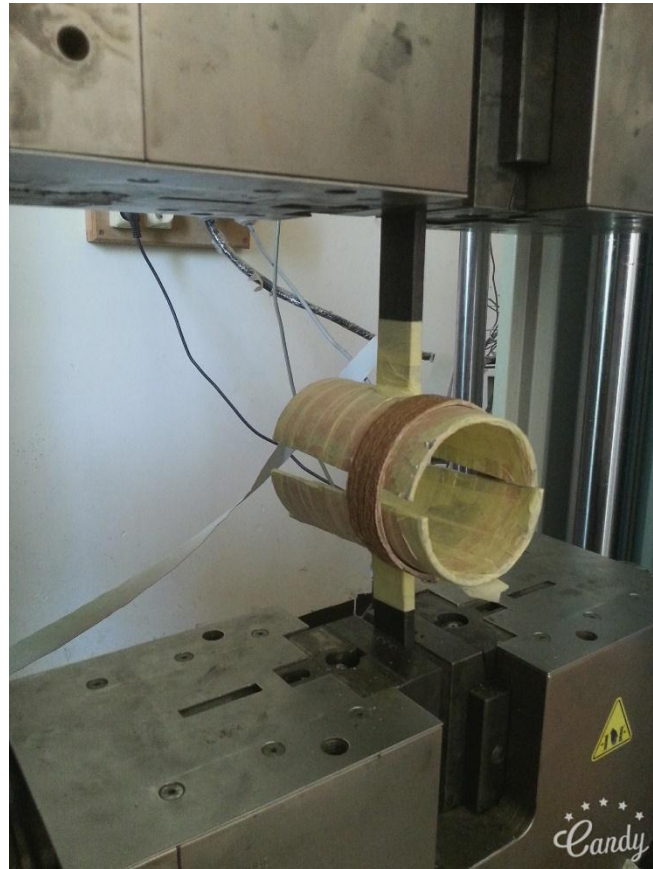


Fig IV.46. Réalisation de l'essai de traction circonférentielle.

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

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

- Courbes des tubes de catégories 8 couches :

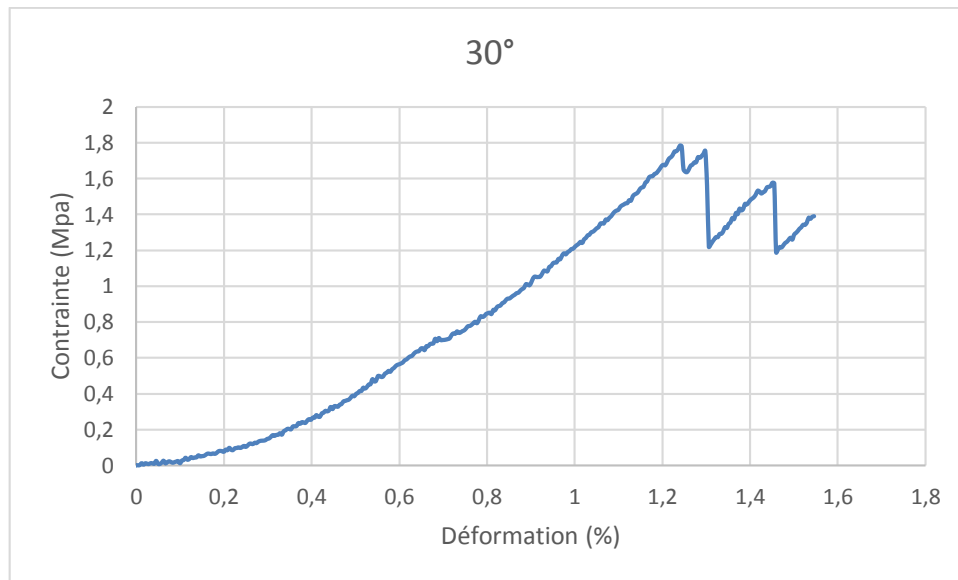


Fig IV.47. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (30°).

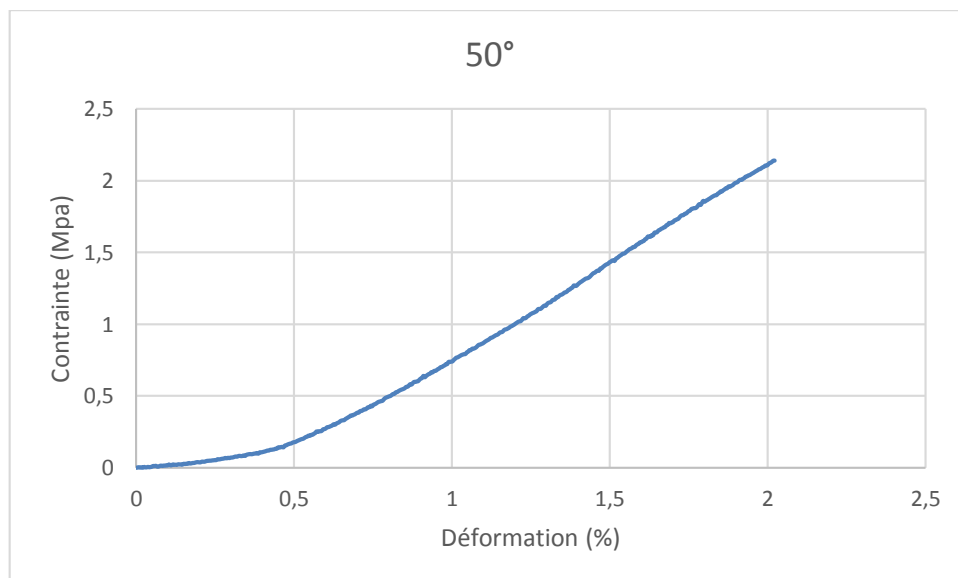


Fig IV.48. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (50°).

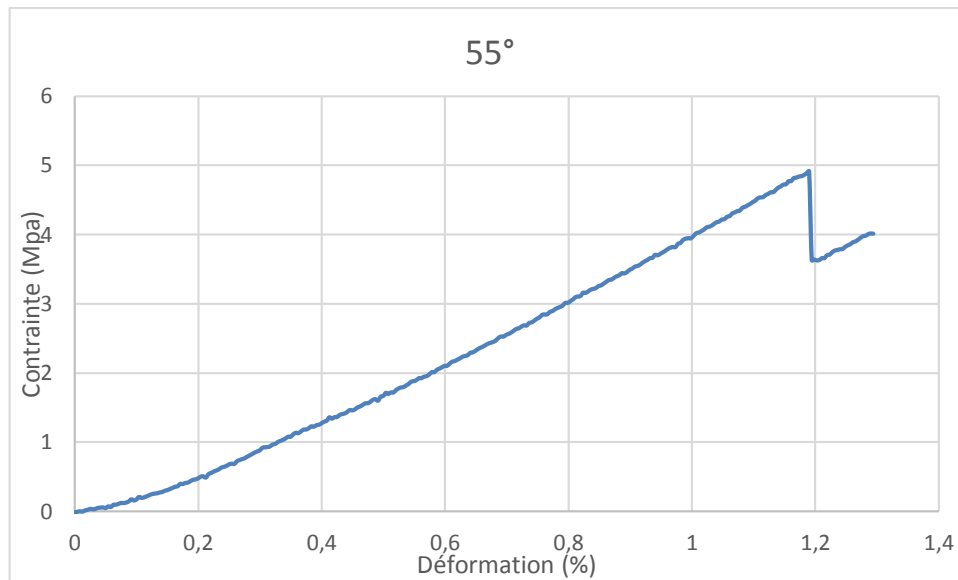


Fig IV.49. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (55°).

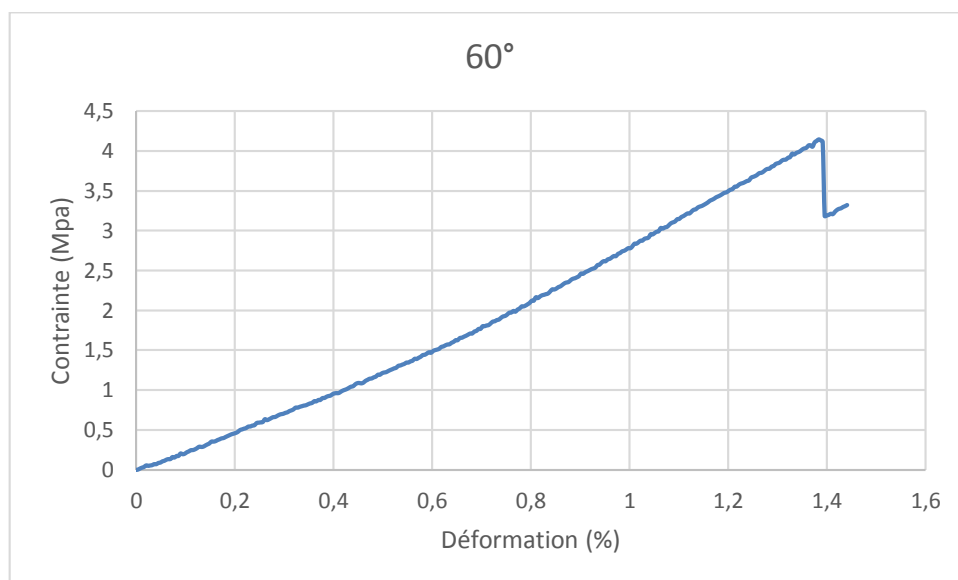


Fig IV.50. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (60°).

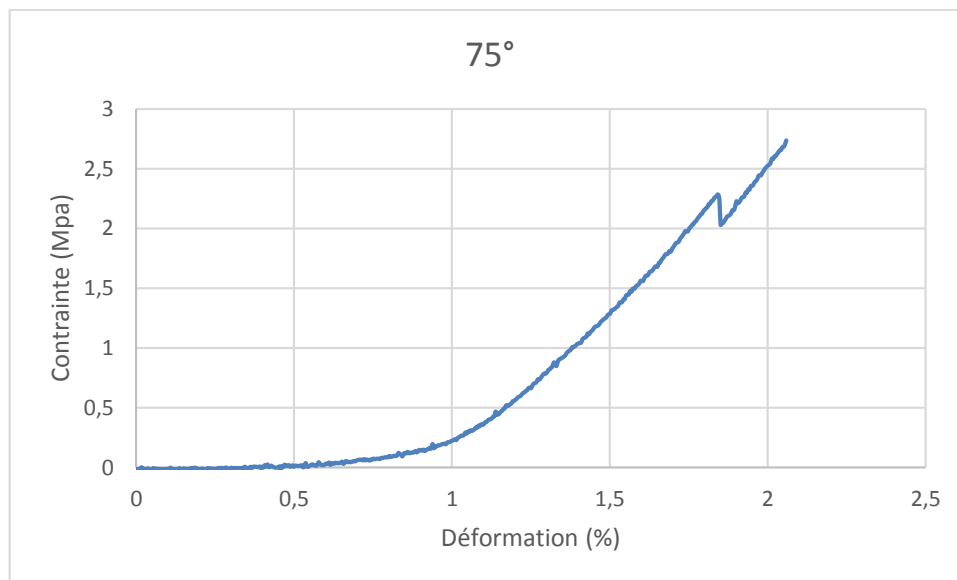


Fig IV.51. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (75°).

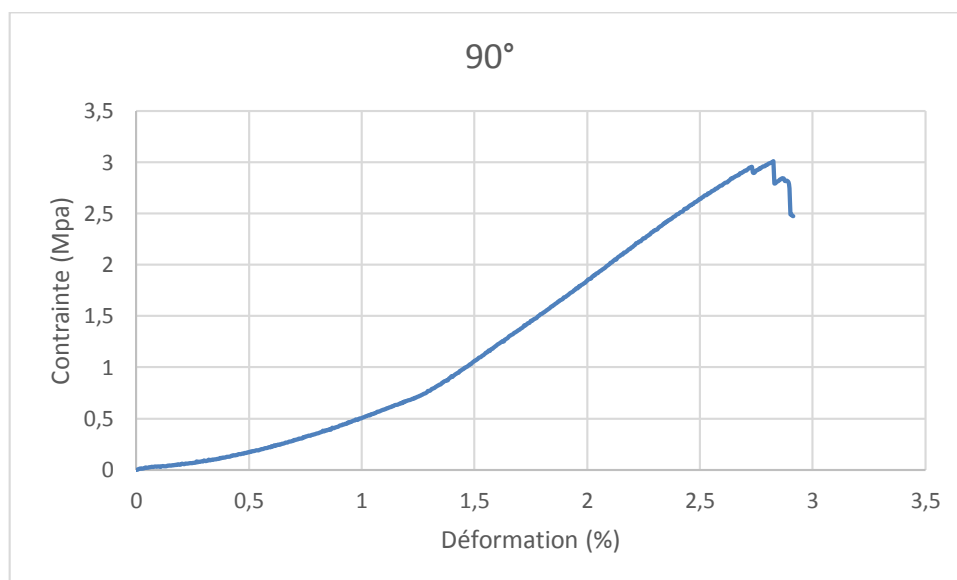


Fig IV.52. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (90°).

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de traction circonférentielle de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	1.7801	1.24	40.0609
50°	2.1404	2.02	30.2710
55°	4.9118	1.18	181.39
60°	4.1313	1.38	225.39
75°	2.7024	2.05	167.16
90°	3.0010	2.81	56.6573

Tableau IV.11. Paramètres des essais de traction circonférentielle des tubes (8 couches)

La contrainte Maxe de rupture est maximum pour l'angle de 55°, le module est supérieur pour 60°, cela confirme les résultats précédents.

D'autre part, on note que le mode de rupture est différé d'une pièce à l'autre en fonction de couche d'enroulement, comme indique la figure IV.52



Fig IV.53. Rupture des éprouvettes par traction circonférentielle

- Courbes des tubes de catégorie 10 couches :

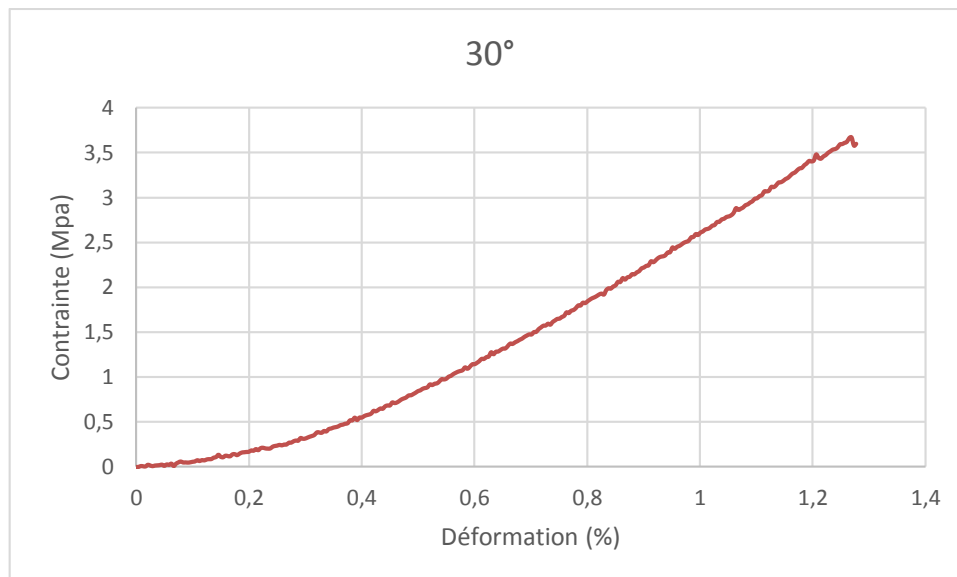


Fig IV.54. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (30°).

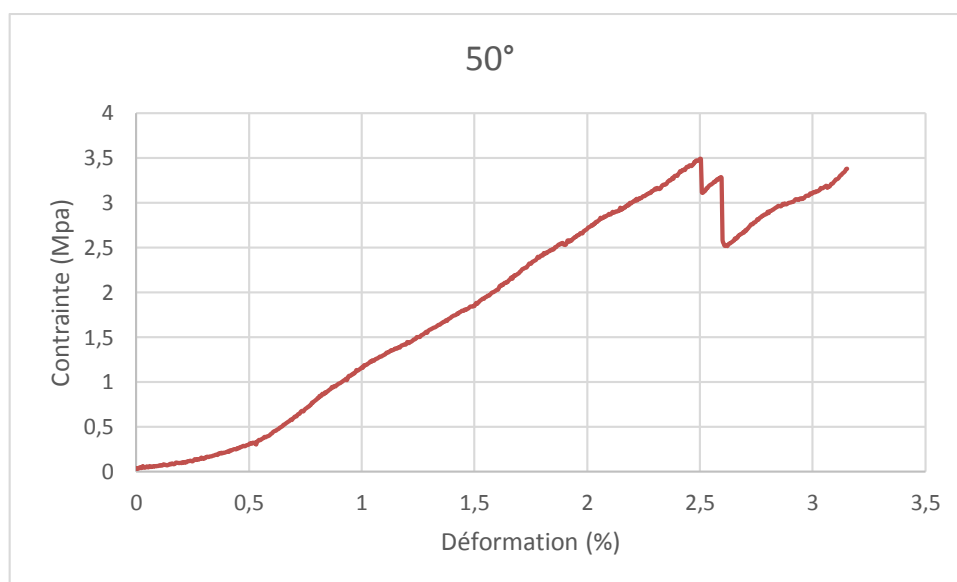


Fig IV.55. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (50°).

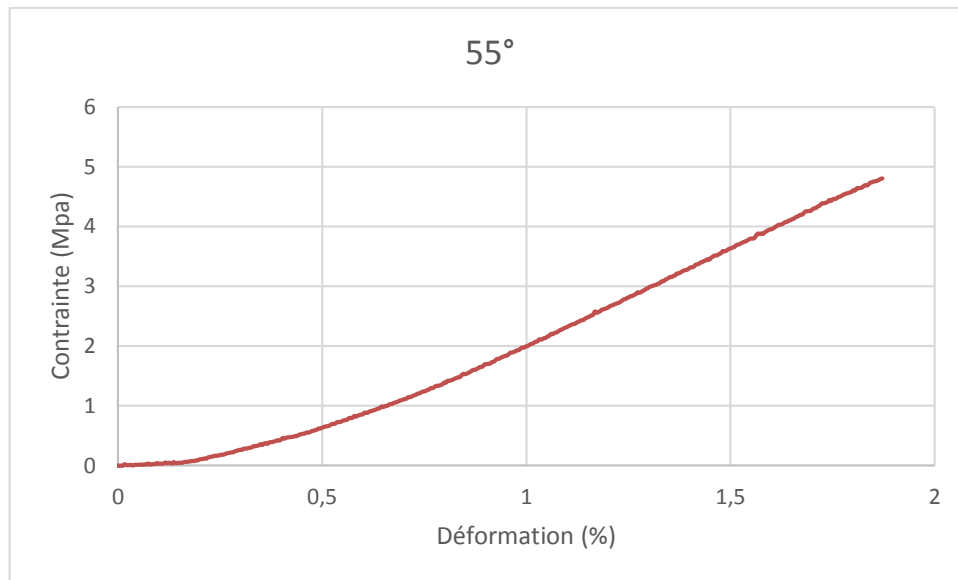


Fig IV.56. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (55°).

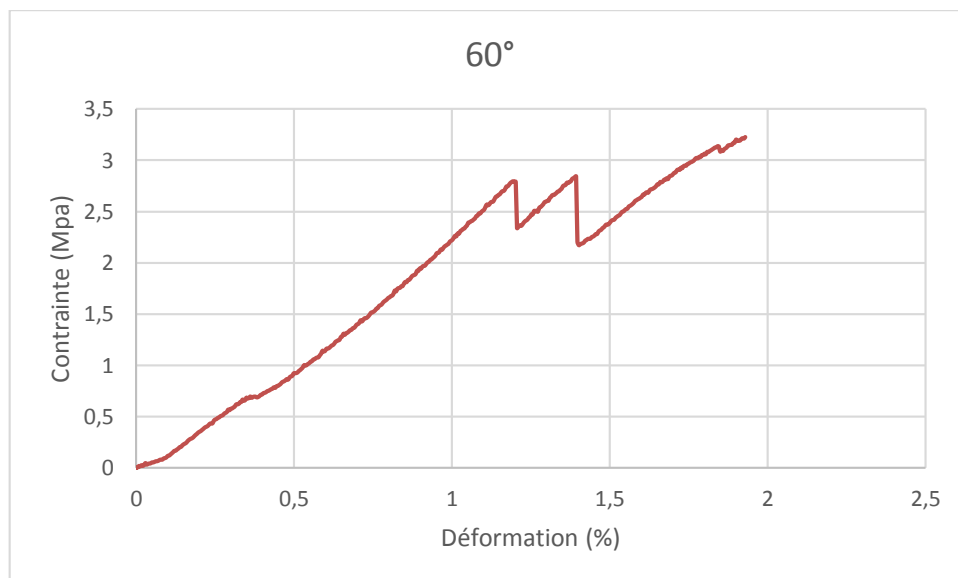


Fig IV.57. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (60°).

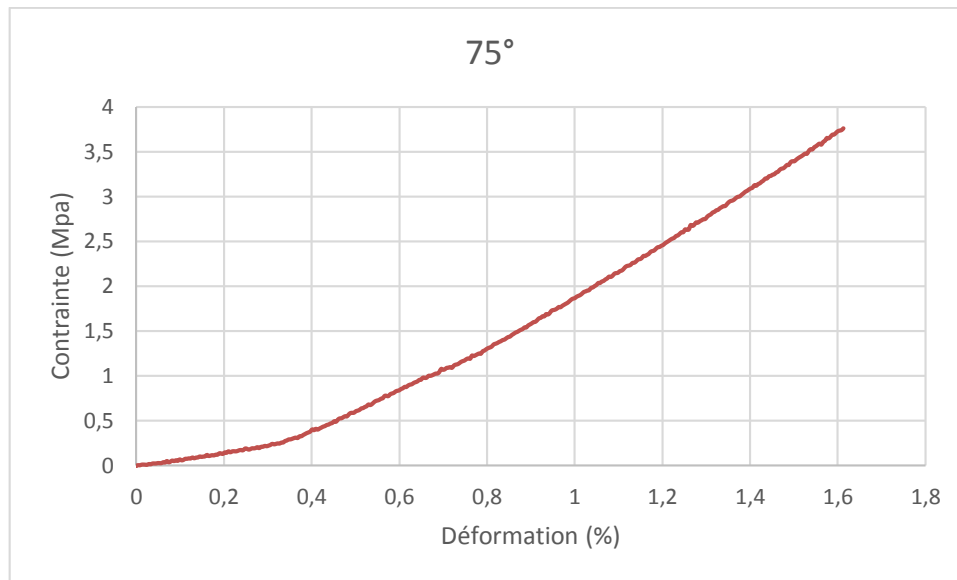


Fig IV.58. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (75°).

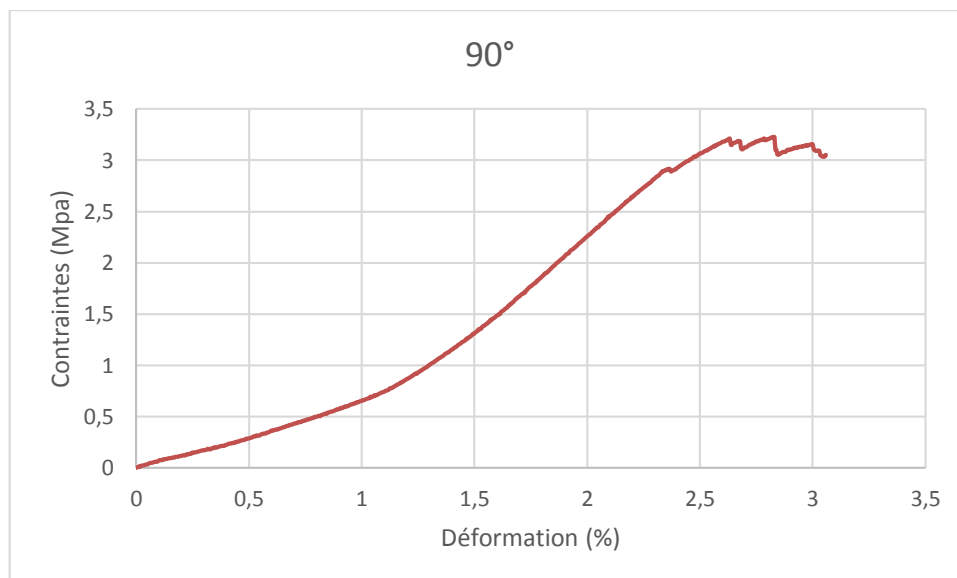


Fig IV.59. Comportement à la traction circonférentielle d'un tube époxy/Jute (90°).

Le tableau suivant représente les paramètres des essais de traction circonférentielle de ces tubes :

Angle	$\sigma_{\max}(\text{Mpa})$	$\epsilon_{F\max}(\%)$	E (Mpa)
30°	3.5997	1.27	69.3013
50°	3.4761	2.49	54.1512
55°	4.8015	1.87	35.8084
60°	3.2279	1.92	97.1502
75°	3.7606	1.61	81.5191
90°	3.2294	2.82	61.6154

Tableau IV.12. Paramètres des essais de traction circonférentielle des tubes (10 couches)

La figure 4.60 représente un histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories des tubes 8 couches et 10 couches.

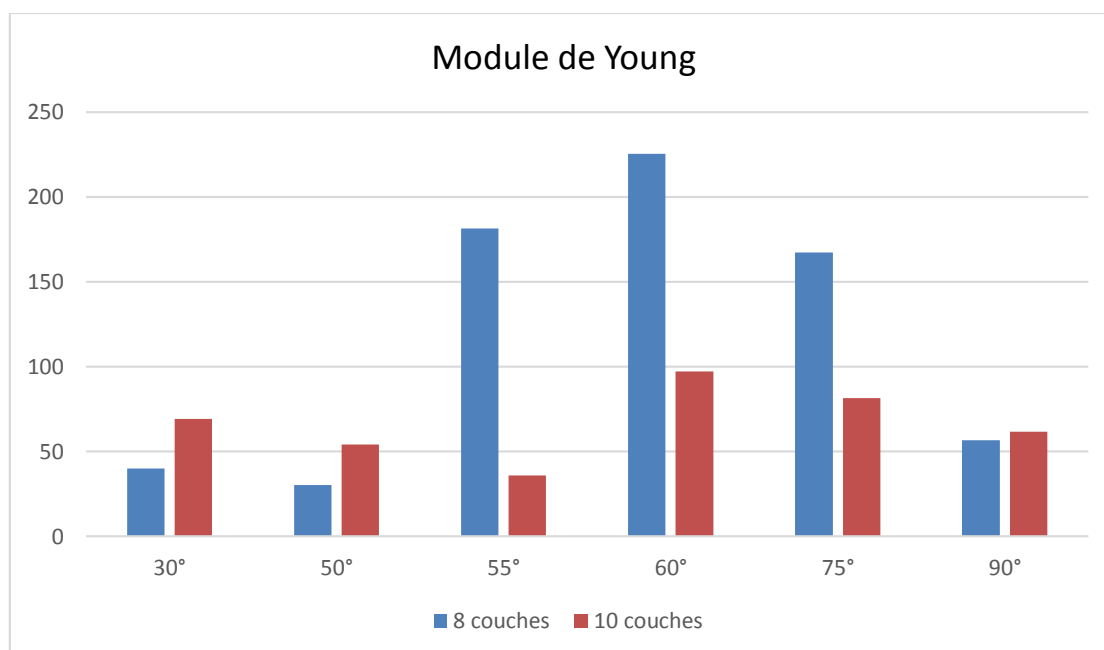


Fig IV.60. Histogramme de comparaison du module de Young des 2 catégories de tube 8 couches et 10 couches

Ces résultats confirment l'insuffisance de pas d'enroulement pour 10 couches.

CONCLUSION :

Ces essais montrent la nécessité d'augmenter le pas d'enroulement en fonction du nombre de couche, l'angle 55 donne toujours les meilleures performances par rapport aux autres angles.

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 RPV ; cet expérience nous a permis de se faire connaissance a cette activité.

La fabrication des canalisations en PRV est une industrie nouvelle en Algerie 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 était fabriqués l'année passée a Haizer wilaya de Bouira par monsieur Kari djamal eddine doctorant a l'UR-MPE, pour la fabrication des tuyaux de différentes diamètre ,dans notre cas nous avons utilisé un diamètre nominale de 90 mm avec deux variantes l'une à huit couches et l'autre à dix couches 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 de 55° , les performances des tubes obtenues en fibre naturel sont supérieures à celle de la fibre de verre sur les essais de compression extérieur.
- Le pas d'enroulement de 3 fils est insuffisant.
- l'angle 60° donne les meilleures performances mécaniques en traction circonférentielle pour le tube à huit couches par contre les angles 75° et 30° concernant les tubes à dix couches.

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 réalisé permet de voir la sensibilité du pas d'enroulement, pour mieux comprendre ce 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 couches.

Etude des propriétés des composites de deux tube Verre-Epoxy et Jute-Epoxy à “Maghreb pipe industrie” :

1. Calcul des propriétés des composites :

1.1.Composite Verre-Epoxy :

Données
Résultats

Renfort: Fibre de verre type E

Matrice : Résine Epoxy

E_g Module d'élasticité du <i>Renfort</i>	68 000.00	MPa
E_m Module d'élasticité de la <i>Matrice</i>	2 400.00	MPa
ρ_g Densité du <i>Renfort</i>	2 540.00	kg/m3
ρ_m Densité de la <i>Matrice</i>	1 160.00	kg/m3
TAUX RENFORT	0.62	62%
TAUX MATRICE	0.38	38%
E_g Module d'élasticité en flexion du Renfort	68 000.00	
E_m Module d'élasticité en flexion de la Matrice	2 400.00	
σ_g Résistance du Renfort	1 700.00	MPa
σ_m Résistance de la Matrice	60.00	MPa
Fraction vol de renforts	0.43	43%
Fraction vol de la matrice	0.57	57%

Etc : Module en traction du composite	30 409.69	MPa
Efc: Module en flexion composite	4 080.99	
ρ : Densité du composite	1 749.23	kg/m3

σ_{tc} : Résistance en traction du composite	760.24	MPa
---	--------	-----

ANNEXE-A

Renfort : Fibre de Jute

Matrice : Résine Epoxy

E_g Module d'élasticité du <i>Renfort</i>	3 500.00	MPa
E_m Module d'élasticité de la <i>Matrice</i>	2 400.00	MPa
ρ_g Densité du Renfort	1 400.00	kg/m ³
ρ_m Densité de la Matrice	1 160.00	kg/m ³
Taux de renforts	0.20	20%
Taux de la matrice	0.80	80%
E_g Module d'élasticité en flexion du Renfort	3 500.00	
E_m Module d'élasticité en flexion de la Matrice	2 400.00	
σ_g Résistance du Renfort	100.00	MPa
σ_m Résistance de la Matrice	60.00	MPa
Fraction vol de renforts	0.17	17%
Fraction vol de la matrice	0.83	83%

Etc : Module en traction du composite	2 588.76	MPa
Efc: Module en flexion composite	2 536.81	
ρ: Densité du composite	1 201.18	kg/m³

σ_{tc} : Résistance en traction du composite	66.86	MPa
---	--------------	------------

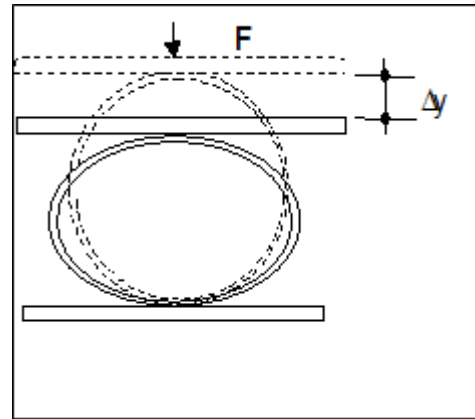
Résultats des tests

Test de rigidité :

$$E_{fc} = SD^3/I \text{ (en N/m}^2\text{) avec } I = \pi^4/12$$

$$S = (f \cdot F) / (L \cdot y \cdot 10^{-6}) \text{ (N/m}^2\text{) où}$$

$$f = (0.0186 + (0.025 \cdot y) / D)$$



Composite	Epoxy-Verre 19 x 55° J8 MPa	Epoxy-Jute 9 x 45° J8 MPa	Epoxy-Jute 12 x 50° J10 MPa
Module d'élasticité à la flexion circonférentielle	35000	3200	6000

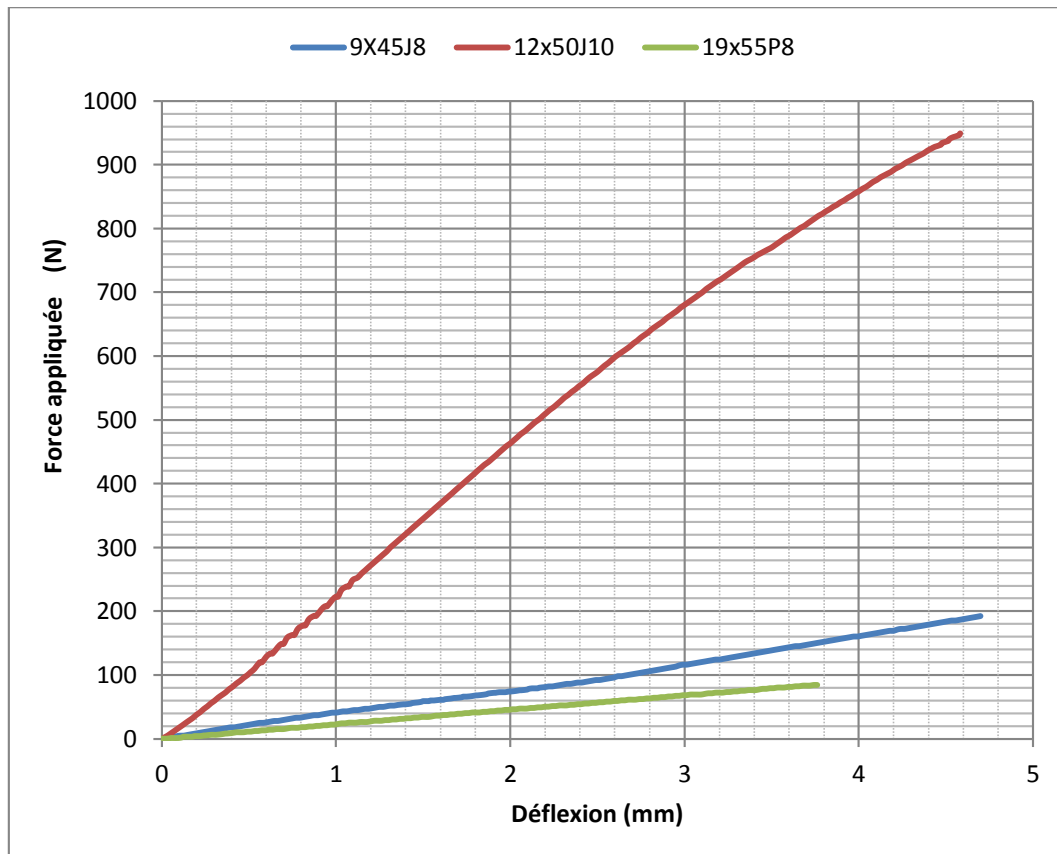
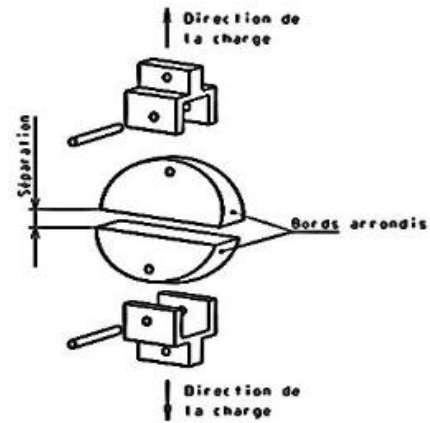


Fig. 1. Courbe Charge appliquée-Déflexion (Ovalisation).

Test de traction circonférentielle :



Composite	Epoxy-verre 19 x 55° P8 MPa	Epoxy-Jute 9 x 45° J8 MPa	Epoxy-Jute 12 x 50° J10 MPa
Résistance à traction circonférentielle	748.8	59	64

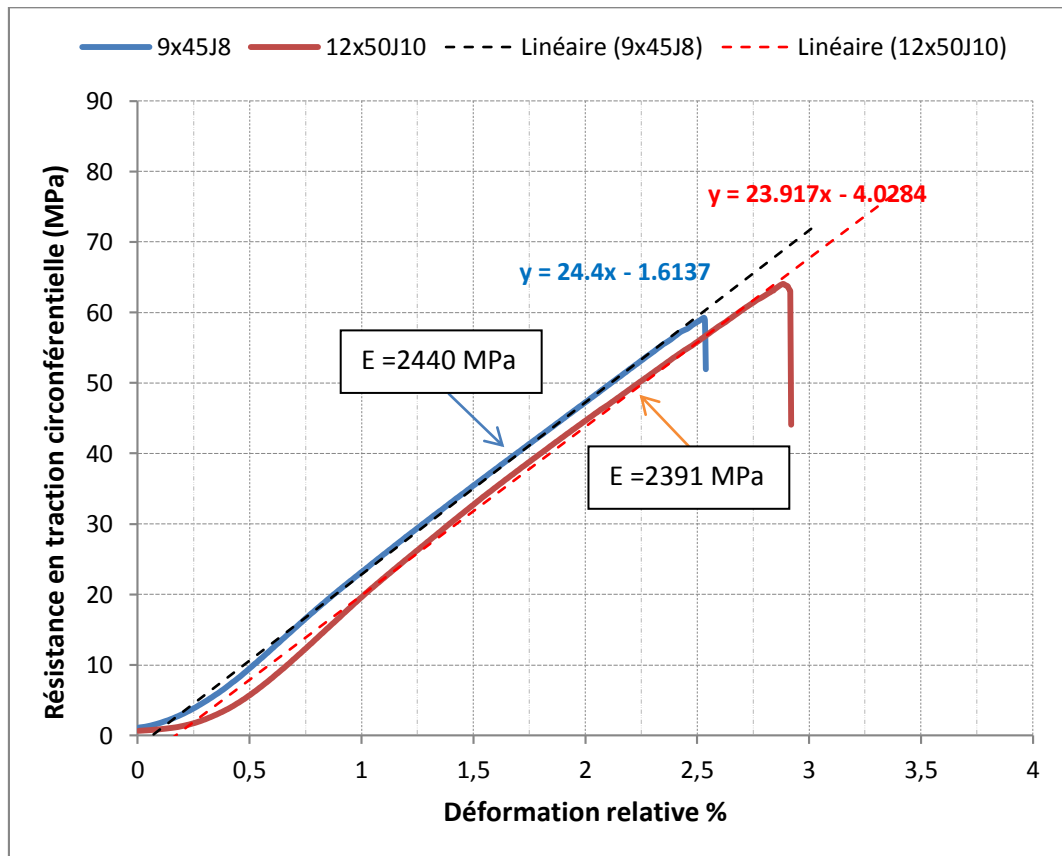


Fig. 2. Courbes résistance circonférentielle-déformation relative Jute-Epoxy

1. Fabrication

Maghreb pipe emploie deux procédés de fabrication pour les tuyaux de fibre de verre

1.1. Enroulement filamentaire continu :

Ce procédé utilise un mandrin de reformation sur lequel le tuyau de fibre de verre est fabriqué sans interruption pour être coupé à la longueur exigée (habituellement 12m).

La résine, les fibres de verre coupées, le sable de grande pureté (si spécifié), et les stratifiés continus et tendus sont appliqués dans des rapports prédéterminés afin de donner au tuyau les propriétés requises.

Les caractéristiques principales de ce procédé sont les suivantes :

Assemblage par manchon

Extrémités lisses

Les tuyaux construits par enroulement filamentaire continu sont utilisés pour :

L'écoulement par gravité et la basse pression

Pour les applications souterraines

1.2. Enroulement filamentaire discontinu

Ce procédé fabrique des tuyaux en fibre de verre dans des longueurs standard (habituellement 12 m) sur un mandarin rotatif.

En ajustant les vitesses relatives de rotation du mandarin et le mouvement de la tête de distribution du verre, tuyau hélicoïdalement renforcé est fermé.

L'ajustement du rapport des matières premières, qui peut inclure un sable de silice de grande pureté, peut également changer les propriétés du tuyau.

Les caractéristiques principales de ce procédé sont les suivantes :

Assemblage tulipe et bout uni

Extrémités à tulipe et bout uni monolithiques avec la paroi du tuyau

En changeant l'angle d'enroulement des caractéristiques différentes d'axe et de bandage peuvent être obtenues

Les tuyaux construits par enroulement filamentaire discontinu sont utilisés pour :

- L'écoulement par gravité.
- La moyenne et haute pression.

- Toute application souterraine et en surface.

2. Angle d'enroulement

Puisque les couches typiques de fibre de verre /résine présentent des propriétés de tension et de rigidité presque 20 fois plus élevés dans la direction des fibres plutôt que dans la direction performance requises pour des applications spécifique.

Le fabricant change juste les angles d'enroulement des différentes couches .par exemple, considérez une application typique :

L'effort circonférentiel (cercle) de la paroi sera produit dans un rapport de 2 :1 comparé aux efforts longitudinaux. Le modèle optimum d'enroulement pour cette condition dérive mathématiquement est 55°.pour d'autres conditions de charge, un angle alternatif, ou des combinaisons d'angles dans différentes couches, optimise la conception.

Note :

Pour les deux procédés le diamètre intérieur du tuyau fini est défini par le diamètre extérieur du mandarin et l'épaisseur de la paroi conçue obtenue par des emballages répétés.

3. Pression interne

L'effort circonférentiel dans la paroi du tuyau, dû à la pression interne p, est calculé avec l'équation classique de Mariotte :

$$\sigma_{prA} = \frac{PD}{2t}$$

Ou D est le diamètre interne et l'épaisseur de paroi renforcée. Dans le calcul de pression, les efforts sont généralement rapportés à l'épaisseur de la paroi renforcée, abstraction faite du revêtement interne ou de la couche extérieure .leur contribution à la résistance de la pression est en effet très faible, comparée à la résistance de la paroi du tuyau .différentes considérations sont tirées de l'analyse des résultats de test.

Si la tuyauterie est soumise également à l'effort axial en raison de la présence des assemblages retenus, l'effort axial dû à la pression interne est :

$$\sigma_{prA} = \frac{PD}{4t}$$

La classe de pression est définie en faisant référence à la pression de rupture (effort ou contrainte) à long terme (50ans) en appliquant un facteur de sécurités de 1.8 (selon les normes AWWA ou ASTM) et à la pression de rupture à court terme (ou effort) avec un facteur de sécurité de 4. D'autres normes internationales peuvent prescrire des facteurs de sécurité légèrement différents.

Par conséquent la classe de pression p_c sera la plus basse entre :

ANNEXE-B

$$\frac{1}{1.8}PF_{it} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{1.8} \frac{2t.HDBstress}{D} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{1.8} \frac{2t.HDBstrain.Eh}{D} \quad \text{et} \quad \frac{1}{4} PF_{st} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{4} \frac{2t.\sigma h}{D}$$

Ou :

PF= pression de rupture (long ou court terme)

T= épaisseur de la paroi structurale

D= diamètre de tuyauterie

HDB= base de construction hydrostatique à long terme (base d'effort ou de contrainte) telle que définie dans en « spécification de conception générale »

E_h = module élastique de traction circonférentielle jusqu'à rupture

Un contrôle sur la déformation à court terme n'est pas pratique en raison de la relation non linéaire effort /contrainte à des niveaux élevés d'effort (proche de la rupture).

P_C la classe de pression minimum requise, est déterminée selon l'équation 5-3 et 5-4 de M45 :

$$P_C \geq P_w \text{ et } P_C \geq \frac{P_w + P_s}{1.4} *$$

Ou :

P_w=pression de service

P_s=pression de montée subite

La pression de montrée subite dans la canalisation est provoquée par la fermeture /ouvertures de vannes et les arrêts de pompes.la pression permise est plus élevée que la classe de pression dans le cas du coup de bélier, comme indiqué dans la section 5.7.3.1 deM45 :

« la tolérance de pression de montée subite est prévue pour prévoir des augmentations passagères et rapides de pression normalement rencontrées dans les systèmes de transmission .la tolérance de pression de montée subite de 0.4NP est basée sur la résistance accrue de la tuyauterie de fibre de verre pour des vitesses de déformation rapide. Une attention particulière doit être accordée à la conception des systèmes sujets aux services cycliques rapides et fréquentes.

Pour réduire au minimum l'effet de la pression de montée subite il est nécessaire d'avoir un temps de fermeture assez long.

ANNEXE-B

Cependant, en raison du module élastique inférieur, l'effet du coup de bélier est considérablement plus faible dans les tuyauteries PRV que dans une tuyauterie en acier.

La vitesse de déplacement de la vague à travers le liquide dans une tuyauterie est :

$$c = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{E}} \cdot \frac{D}{t}} \text{ [m/s]}$$

Ou :

C : vitesse du son dans le liquide = 1420 m/s pour l'eau

ε : module d'élasticité du liquide=2028 N/mm²

E : module E de tuyauterie

T : épaisseur de la tuyauterie

Pour un changement soudain de vitesse, la surpression maximum en raison du coup de bélier est :

$$\Delta h = \frac{c \cdot V^o}{g} \text{ [mètres de colonne liquide]}$$

Ou :

V^o : changement soudain de vitesse de l'eau

g : constante de la gravité=9.81M/s²

La pression en bar de la montée subite est :

$$P_s = \frac{\Delta h \times \rho \times 9.81}{10000}$$

Si est la masse spécifique du fluide en kg/m³

4. Rigidité :

Lorsque l'on parle de la rigidité d'un tuyau de fibre de verre, si pas autrement indiqué, il s'agit toujours de la rigidité transversale à l'axe.

Selon AWWA ou ASTM, la rigidité du tuyau ou la classe de rigidité du tuyau est définie comme suit :

$$PS = \frac{F}{\Delta y}$$

Où F est la force appliquée à un tuyau de longueur unitaire autre produit le fléchissement Δy égal à 5% du diamètre (essai des plateaux parallèles selon ASTM D2412)

Généralement la rigidité des tuyauteries est exprimée en psi

Selon BSBS, ISO et toute autre norme

La rigidité spécifique est définie comme suit :

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

Où :

E : est le module d'élasticité en flexion de l'anneau.

I : est le deuxième moment d'inertie de la paroi du tuyau

D : est le diamètre moyen

Pour une paroi lisse, le second moment d'inertie est :

$$I = \frac{t^3}{12}$$

Généralement la rigidité spécifique est exprimée en N/m² (Pa)

5. Relation entre la rigidité du tuyau et la rigidité spécifique :

Les deux paramètres sont une mesure de la résistance du tuyau au fléchissement circonférentiel en réponse au changement externe appliqué le long d'un plan diamétral (5480).

Puisque la rigidité du tuyau (ASTM OU AWWA) est liée à la quantité EI, appelée également le facteur de rigidité (SF), selon l'équation :

$$EI = 0.149 r^3 PS$$

La relation entre PS et S peut être trouvée comme suit :

$$EI = 0.149 \cdot \left(\frac{8}{8} r^3\right) \cdot PS = 0.149 \cdot \frac{1}{8} D^3 \cdot PS$$

ANNEXE-B

$$\frac{EI}{D^3} = S = 0.018625 \cdot PS$$

Considérant également l'unité différente généralement utilisée, PA pour la norme européenne psi pour la norme US, la formule devient :

$$\frac{EI}{D^3} = S [Pa] = 0.018625 \cdot PS \cdot K [psi]$$

K : étant le facteur de conversion de psi a Pa (1psi =6895 Pa)

La relation entre le classe de rigidité US et Européenne est alors :

USA (AWWA et ASTM) $PS = \frac{EI}{0.149 \cdot r^3} (psi)$	Europe $S = \frac{EI}{D^3} = 0.018625 \cdot 6895 \cdot PS (Pa)$
9	1250
8	2500
36	5000
72	10000

6. Fléchissement :

La réduction du diamètre vertical est due aux charges externes exercée sur le tuyau. Elle est exprimée en pourcentage du diamètre lui-même.

Le fléchissement est généralement limitée à 5% pour des raisons de calcule hydraulique, puisque la section et le rayon hydraulique sont réduits et par la même, le volume d'écoulement prévu à travers le tuyau .avec 5% de fléchissement, l réduction de la section est approximativement de 0.25%

En outre souvent il n'est pas acceptable d'avoir des tassements et des mouvements de la surface du sol supérieurs à certaine quantité. Dans ce cas l'ingénieur définira une limitations différent et variable au fléchissement vertical.

7. Analyse de contrainte combinée longitudinale :

Avant que la structure final de la paroi puisse être déterminé à partir des résultats d'analyses de fléchissement et de flambement, les effets des diverses charges longitudinal sur le tuyau doivent être évalués.

ANNEXE-B

Ceci car la résistance longitudinale du tuyau de fibre de verre pour une installation souterraine n'est pas généralement aussi grande que sa résistance dans la direction circonférentielle.

Puisqu'une grande résistance n'est pas exigée dans la direction axiale et qu'il est possible de réduire la quantité de renforcement dans cette direction, une analyse plus précise est exigée pour vérifier une résistance structurale minimum de la paroi droite et pour s'assurer que la contrainte ou l'effort prévu n'excède pas la contrainte ou l'effort longitudinale permis.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : J. Weiss et C. Bord (1983). Les Matériaux Composites (tomes 1 et 2). Editions de l'Usine, Paris.
- [2] : M. Geier et D. Duedal (1985). Guide pratique des matériaux composites. Technique et Documentation, Paris.
- [3] : R.G. Weatherhead (1980). FRP Technology. Fibre Reinforced Resin Systems. Applied Science Publishers, Londres.
- [4] : I.K. Partridge (éd.) (1989). Advanced Composites. Elsevier Applied Science, Londres et New York.
- [5] : G. Chrétien (1986). Matériaux composites à matrice organique. Technique et Documentation, Paris.
- [6] : Jean-Marie Berthelot, « Mécanique des matériaux et structure composites ». Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, le Mans, France.
- [7] : Dilmi, « Procédés de mise en forme ». Cours de Procédés technologiques du moulage des composites, FSI, 2015.
- [8] : « Quelques procédés de mise en forme des composites », science de l'ingénieur.
- [9] : A. Bergeret and Krawczak P, Liaison renfort/matrice - Définition et caractérisation, Plastiques et composites, Techniques de l'ingénieur, Paris2006.
- [10] : C. Aribi, Etude comparative du comportement des différents matériaux composites, mémoire de magistère, université de Boumerdès. 2012.
- [11] : A. Bouarissa, Comportement mécanique d'un matériau fibre jute/époxy : Elaboration et caractérisation, mémoire de master, université de Boumerdes. 2013.
- [12] : M. Sellik, Influence des différents séquences d'empilement sur le comportement mécanique en traction d'un stratifier jute/époxy, mémoire de master, université de Boumerdes. 2013.
- [13] : Philippe COGNARD, « cor502 Applications des composites anticorrosion dans l'industrie ». Techniques de l'ingénieur, 10/06/2005, France.
- [14]: thesis: « Design and optimization of filament wound composite pressure vessels». Master of Science in Engineering Mechanics Xi'an University of Technology, 2012, china.
- [15] : Patricia KRAWCZAK, « p2645 Spectrométrie de masse – Principe et appareil ».Techniques de l'ingénieur, 10/04/2002, France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

[17]: Saad MUTASHER; Nazim MIR-NASIRI; Lee CHAILIN, « small- scale filament winding machine for producing fiber composite products». Journal of Engineering Science and Technology.

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

[19] : M. Gasmi, Conception d'un système Automatisé pour une machine d'enroulement filamenteuse, mémoire de master, université de Boumerdes. 2015.

[20] : NOTICE D'UTILISATION DE L'AUTOMATE SIEMENS LOGO ! Référence : RCPULOGO24RC 2005.

Sites web :

. Matériau composite — Wikipédia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite

. Les matériaux composites :

<http://www.compositec.com/compositec-promotion/les-materiaux-composites>

. Les textiles d'origine végétale :

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/textiles/>

. Jute (plante) — Wikipédia :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_\(plante\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_(plante))

. Les procédés de mise en forme :

<http://www.compositec.com/compositec-promotion/les-procedes>

. Enroulement filamenteuse — Wikipédia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Enroulement_filamenteuse