

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie
Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie des Matériaux

**Elaboration et caractérisation mécanique de
composites par enroulement filamentaire avec
différents renforts (Jute, Verre et Cuivre).**

Proposé et encadré par :

Dr. N.KECHOUD

Mr.D.E.KARI

Réalisé par :

ARACHI Sid Ahmed

HOMMIA Messaoud

Composition du jury :

President

Dr. K. ABADLI

Rapporteur

Dr. N.KECHOUD

Co promoteur

Mr.D.E.KARI

Examineur

Pr M. LARIBI

Examineur

Dr. A. KASSER

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie
Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie des Matériaux

**Elaboration et caractérisation mécanique de
composites par enroulement filamentaire avec
différents renforts (Jute, Verre et Cuivre).**

Proposé et encadré par :

Dr. N.KECHOUD

Mr.D.E.KARI

Réalisé par :

ARACHI Sid Ahmed

HOMMIA Messaoud

Composition du jury :

President

Dr. K. ABADLI

Rapporteur

Dr. N.KECHOUD

Co promoteur

Mr.D.E.KARI

Examineur

Pr M. LARIBI

Examineur

Dr. A. KASSER

Remerciements

Tout d'abord nous remercions "Allah" le tout puissant pour nous avoir donné la volonté, le courage et surtout la patience afin de réaliser ce travail.

Nous voulons aussi adresser nos sincères remerciements à notre encadreur Madame N. KECHOUD d'avoir accepté de superviser notre travail.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à notre co-promoteur Mr D. E. KARI , qui a proposé ce thème d'étude, pour sa précieuse aide et son rôle primordial dans la partie expérimentale de ce travail.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail : Dr. K. ABADLI , Pr M. LARIBI et Dr. A. Kasser respectivement président de jury et examinateurs de ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier énormément la direction de l'entreprise MAGHREB PIPE M'sila Algérie et en particulier Monsieur BAALI Brahim, Directeur de l'usine de nous avoir reçu chaleureusement au sein de son laboratoire de l'usine pour réaliser les tests .

Nos vifs remerciements s'adressent encore aux enseignants de l'école nationale polytechnique d'Alger et en particulier les enseignants du département de Métallurgie pour avoir participé à notre formation.

Dédicace

A la suite de cette étape de ma vie j'aimerais porter une pensée et me rappeler de ces personnes qui ont partagé avec moi les bons moments de ma vie mais surtout les mauvais.

Ces personnes qui m'ont aidé et soutenu sans conditions, qui m'ont aimé et ont cru en moi et à qui mon bonheur et ma joie reviennent de droit.

Je dédie ce modeste travail à ...

Ma mère,

“ Tu m’as donné la vie, la tendresse, et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t’offrir ne pourra exprimer l’amour et la reconnaissance que je te porte.

En témoignage, je t’offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l’affection dont tu m’a toujours entouré “

Mon père,

“ L’épaulé solide, l’oeil attentif, compréhensif, est la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes sincères sentiments pour ta patience illimitée, pour ton encouragement continu et surtout pour l’éducation que tu m’as donnée ”

Qu’Allah vous préserve et vous procure longue vie.

A mes frères et sœur ABDALLAH, MEHDI et NAIMA
Qui m'ont soutenu et aidé de manière tant physique que morale.

A mes professeurs qui par leur patience et leurs conseils ont fait de moi ce
Futur ingénieur.

A ma chère O.SABRINA qui m'a encouragé pour la concrétisation de ce projet

A mes oncles et mes tantes : KHALED, NOUNOU, GUEBLI ABDALLAH, SALIMA
et ZAKOU

A mes amis : NOUFI OUSSAMA, HOMMIA MESSAOUD, BOUALOUACH
MOHAMED EL AMINE, SAMIR BOULACHEB, BELBACHIR NACER

REGUOUAT ABDALLAH

ARACHI Sid Ahmed

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère sous le
Regard de Dieu, en souhaitant intérieurement qu'Il
me La garde encore longtemps.*

*A mes frères Bellal, hfourda, charef eddine ,Abd
Essaleme et leurs familles*

*A mes chers amis Mourad GASSOUMA, Sid Ahmed
ARACHI, Adel BEN SEGHIR.*

*A mes chers cousins Salem HOMMIA, Saddam
BELLOUL et Mohamed CHOUIA.*

*A tous ceux qui m'ont nourri de Leur amour et de
leur tendresse.*

*Pareillement ne sont pas oubliés ceux qui ont, de
près ou de loin, contribué à ma formation*

HOMMIA Messaoud

ملخص

إن العمل المنجز هو دراسة مفاهيمية لتصنيع الأنابيب المركبة بواسطة لف خيوط. لاحظ أنه يتم استخدام هذه التقنية في مختلف المجالات (صناعة السيارات، الطيران، الصناعة العسكرية، خطوط الأنابيب، الخ...).

تصنع الأنابيب المركبة في 6 زوايا مختلفة باستخدام 3 تعزيزات في ألياف الجوت ، والألياف النحاسية والألياف الزجاجية ومصفوفة راتنج الإيبوكسي.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها في الأنظمة الثلاثة (الجوت ، الجوت الزجاجي والنحاس الجوت) أن معامل يونغ في الضغط المحيبي Ecc يكون دائما أكبر من معامل يونغ في الجر المحيبي الخ.

النتائج التي تم الحصول عليها في الأنظمة الثلاثة (الجوت ، الجوت الزجاجي والنحاس الجوت) تبين أن معامل يونغ في الضغط المحيبي Ecc هو دائما أكبر من معامل الشد في الجر المحيبي الخ.

تكون الأنابيب المنتجة بزوايا 55 ° - 60 ° هي الأفضل صلابة مقارنة بالآخرين و تكون ذروة الصلابة الأقصى للهيبن جوت- الزجاج و الجوت عند 65 درجة ولهجين الجوت -النحاس عند 60 درجة.

الكلمات المفتاحية: راتنج الإيبوكسي وألياف الجوت والألياف الزجاجية والهيبنة وزاوية التفكيك ومعامل يونغ.

Abstract

The work done is a conceptual study for the elaboration of composite tubes by filament winding. Note that this technique is used in various fields (automotive industry, aeronautics, aerospace, military industry, pipeline etc ...).

The composite tubes are made in 6 different angles using 3 reinforcements in Jute fiber, copper fiber and glass fiber and epoxy resin matrix.

The results obtained in the three systems (jute, glass- jute and copper-jute) show that the YOUNG modulus in circumferential compression Ecc is always greater than the modulus of YOUNG in circumferential traction Etc.

The specific rigidity is high between 55 ° -70 ° and maximum for the jute- glass and jute hybrid at 65 ° and for the jute-copper hybrid at 60 °.

Key words: epoxy resin, jute fiber, glass fiber, hybrid, winding angle and Young's modulus.

Résumé

Le travail réalisé est une étude conceptuelle pour l'élaboration des tubes composites par enroulement filamentaire. A noter que cette technique est utilisée dans différents domaines (industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, industrie militaire, canalisation etc...).

Les tubes composites sont élaborés à l'aide de 3 renforts en fibres de Jute, fibres de cuivre et fibres de verre, enroulées sous 6 angles différents, et d'une matrice en résine époxy.

Les résultats des essais mécaniques obtenus pour les trois systèmes (jute, verre-jute et cuivre-jute) montrent que le module d'Young en compression circonférentielle, Ecc, est toujours supérieur au module d'Young en traction circonférentielle, Etc.

La rigidité spécifique est élevée entre 55°-70° et maximale pour l'hybride jute-verre et jute à 65° et pour l'hybride jute-cuivre à 60°.

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

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	14
1. Généralités sur les matériaux composites	16
1.1. Définition d'un matériau composite	16
1. 2 Classification des matériaux composites	17
1.2.1 Classification suivant la forme des constituants :.....	17
1.2.1.1 Composites à fibres :	17
1.2.1.2 Composites à particules :	17
1.2.2 Classification suivant la nature des constituants :.....	18
1.3 Constituants des matériaux composites	18
1.4 Matrices & Renforts :	19
1.4.1 Matrices :	19
1.4.1.1 Les divers types de résines :.....	20
1.4.1.1.1 Les résines thermoplastiques :	20
1.4.1.1.2 Les résines thermodurcissables :.....	21
1.4.1.1.3 Les résines thermostables :	22
1.4.1.1.4 Les résines polyesters	22
1.4.1.1.4 Les résines époxy	23
1.4.1.2 Les charge :	24
1.4.1.2.1 Charges renforçantes :	24
1.4.1.2.2 Les charges non renforçantes	25
1.4.1.3 Les additifs :	25
1.4.1.3.1 Lubrifiants et agents de démoulage :	25
1.4.1.3.2 Pigments et colorants :	25
1.4.1.3.3 Agents anti-retrait et agents de fluage :.....	25
1.4.1.3.4 Agents anti-ultraviolets :.....	26
1.4.2 Renforts :	26
1.4.2.1 Les principales fibres :	26
1.4.2.1.1 Les fibres de verre :	26
1.4.2.1.2 Les fibres de carbone :	27
1.4.2.1.3 Les fibres céramiques :	28
1.4.2.1.4 Les fibres métalliques :	29
1.4.2.1.5 Les fibres synthétiques :.....	30

1.4.2.2 Les fibres végétales :.....	31
1.4.2.2.1 Présentation des fibres végétales :.....	31
1.4.2.2.2 Classification des fibres végétales :.....	32
1.4.2.2.3 Autres domaines d'utilisation des fibres végétales :.....	33
1.4.2.3 Architecture des fibres.....	36
1.4.2.3.1 Formes linéiques.....	36
1.4.2.3.2 Formes surfaciques.....	36
1.5 La fibre de jute :	38
1.5.1 Origine botanique de la fibre de jute :.....	38
1.5.2 Composition chimique de la fibre de jute :	39
1.5.3 Usage de la fibre de jute.....	40
1.6 Mise en œuvre et Architecture des Matériaux Composites :	40
1.6.1 Mise en œuvre des matériaux composites :	41
1.6.1.1 Moulages sans pression :.....	41
1.6.1.1.1 Moulage au contact :	41
1.6.1.1.2 Moulage par projection simultanée :	42
1.6.1.1.3 Enroulement filamentaire.....	43
1.6.1.2 Moulage sous vide :	43
1.6.1.3 Moulage par compression :.....	44
1.6.1.3.1 Moulage par injection de résine :.....	44
1.6.1.3.2 Moulage par compression à froid :	45
1.6.1.3.3 Moulage par compression à chaud :	46
1.6.1.3.4 Moulage par injection :	46
1.6.1.4 Moulage en continu :	47
1.6.1.5 Moulage par centrifugation :.....	49
1.6.1.6 Moulage par la méthode RTM "Resin Transfer Molding":	50
1.6.2 Architecture des matériaux composites :	51
1.6.2.1 Stratifiés	51
1.6.2.1.1 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :.....	52
1.6.2.1.2 Structure générale d'un stratifié :.....	54
1.6.2.2 Composites sandwichs :.....	55
1.6.2.3 Autres architectures :	56
1.6.2.3.1 Plastiques renforcés :	56
1.6.2.3.2 Composites volumiques :	57
1.7 Avantages et inconvénients des composites	57
1.7.1 Avantages	57
1.7.2 Inconvénients	57
1.8 Conclusion :	58

2 L'ENROULEMENT FILAMENTAIRE.....	60
2.1 Introduction :.....	60
2.2 Historique :	60
2.3 Enroulement filamentaire :	61
2.3.1 Enroulement hélicoïdal :	62
2.3.1.1 Enroulement discontinu :.....	62
2.3.2 Enroulement circonférentiel :	64
2.3.3 Enroulement Polaire :	65
2.4 Matériels :	66
2.5 Mandrins :.....	68
2.6 Doublure mandrin :	68
2.7 Applications :.....	69
2.8 Avantages et inconvénients :	70
2.8.1 Avantages :	70
2.8.2 Inconvénients :	70
2.9 Conclusion :	71
3 Machine d'enroulement filamentaire	73
3.1 Introduction	73
3.2 Les différents types de la machine	73
3.3 Présentation de la machine.....	74
3.3.1 Chaine cinématique de la machine	75
3.3.2 Schéma descriptif de la machine :.....	76
III.3.3. Les différentes parties mécaniques de la machine :.....	77
3.3.4. Fonctionnement de la machine :	78
3.3.5. Angle d'enroulement :.....	79
3.3.5. Relation entre les différents paramètres (angle, vitesse de rotation du mandrin, vitesse de rotation de la vis) :.....	80
3.4 Conclusion :	81
4. Elaboration et caractérisation des tubes	83
4.1. Introduction	83
4.2. Caractéristiques de la résine et des renforts	83
4.3. Élaboration des tubes	85
4.3.1. Préparation du mandrin	85
4.3.2. Préparation de la résine	85

4.3.3. Préparation des paramètres de la machine et choix l'angle d'enroulement	86
4.3.4. Réalisation des tubes	87
4.3.5 Traitement thermique des tubes	89
4.4 Les essais mécaniques	90
4.4.1 Essai de rigidité " compression circonférentielle "	91
4.4.2 Essai de traction circonférentielle	92
5. Caractérisation des tubes.....	96
5.1. Essai de compression circonférentielle	96
5.1.1. Effet du type de fibres sur la compression circonférentielle pour les différents angles d'enroulement	96
5.1.2. Effet de l'angle d'enroulement α sur la compression circonférentielle pour les différentes fibres	103
5.1.3. Effet conjugué de l'angle d'enroulement α et les type des fibres sur la rigidité spécifique et le module d'Young pour la compression circonférentielle	105
5.2. Essai de traction circonférentielle.....	109
5.2.1. Effet de la nature des fibres sur la traction circonférentielle, pour différents angles α	109
5.2.2. Effet conjugué de l'angle d'enroulement α et du type de fibres sur la résistance à la traction, la déformation maximale et module d'Young en traction circonférentielle	116
5.3 Comparaison entre les modules d'Young en compression circonférentielle, Ecc, et en traction circonférentielle, Etc.....	117
5.4. Essai de traction axiale.....	119
5.5 Conclusion.....	120
Conclusion Générale :	121
Références Bibliographiques :	122

Liste des figures

CHAPITRE I

FIGURE.1.1 : MATERIAUX COMPOSITES [6].	17
FIGURE.1.2 : DIFFERENTES FAMILLES DE MATRICE [8].	18
FIGURE.1.3 : DIFFERENTES FAMILLES DE RENFORT [8].	25
FIGURE.1.4 : LES FIBRES DE VERRE [24].	26
FIGURE.1.5 : A) FIBRE DE CARBONE B) TISSU EN FIBRE DE CARBONE [24].	27
FIGURE.1.6 : FIBRES CERAMIQUE [4].	28
FIGURE.1.7 : GEOMETRIE DES FIBRES METALLIQUES [10].	29
FIGURE.1.8 : FIBRES SYNTHETIQUES [4].	30
FIGURE.1.9 : FIBRES VEGETALES [9].	31
FIGURE.1.10 : CLASSIFICATION DES FIBRES VEGETALES [6].	31
FIGURE.1.11 : MONO-FILAMENTS REUNIS EN MECHEs [2].	35
FIGURE.1.12 : CHAINE ET TRAME D'UN TISSU [2].	36
FIGURE.1.13 : LES PRINCIPAUX TYPES D'ARMURES UTILISEES POUR LE TISSAGE DES TISSUS [2].	37
FIGURE.1.14 : JUTE: A) VARIABILITE DUE AU CARACTERE NATUREL, B) VARIABILITE DUE A LA TECHNIQUE DE TISSAGE [7].	38
FIGURE.1.15 : PRINCIPE DU MOULAGE AU CONTACT [9].	40
FIGURE.1.16 : PRINCIPE DU MOULAGE PAR PROJECTION SIMULTANEE [9].	41
FIGURE.1.17 : PRINCIPE DE L'ENROULEMENT FILAMENTAIRE [7].	42
FIGURE.1.18 : MOULAGE SOUS VIDE [9].	43
FIGURE.1.19 : MOULAGE PAR INJECTION DE RESINE [9].	44
FIGURE.1.20 : PRINCIPE DU MOULAGE PAR COMPRESSION A FROID [4].	44
FIGURE.1.21 : PRINCIPE DU MOULAGE PAR COMPRESSION A CHAUD [4].	45
FIGURE.1.22 : MOULAGE PAR INJECTION [4].	46
FIGURE.1.23 : MOULAGE EN CONTINU DE PLAQUES [5].	47
FIGURE.1.24 : MOULAGE EN CONTINU DE PANNEAUX ONDULES [4].	47
FIGURE.1.25 : MOULAGE PAR CENTRIFUGATION [4].	48
FIGURE.1.26 : MACHINE RTM [9].	49
FIGURE.1.27 : CONSTITUTION D'UN STRATIFIE [4].	51
FIGURE.1.28 : DESIGNATION D'UN STRATIFIE [5].	51
FIGURE.1.29 : CONVENTION DE SIGNE POUR LA DESIGNATION DES STRATIFIES [4].	52
FIGURE.1.30 : POUTRE SOLLICITEE EN FLEXION [4].	53
FIGURE.1.31 : MATERIAUX SANDWICHES A AMES PLEINES [9].	54
FIGURE.1.32 : MATERIAUX SANDWICHES A AMES CREUSES [5].	55

CHAPITRE II

FIGURE.2.1 : RICHARD E. YOUNG, LE FONDATEUR D'ENROULEMENT FILAMENTAIRE [1].	58
FIGURE.2.2 : PRINCIPE D'ENROULEMENT HELICOÏDAL [2].	61
FIGURE.2.3 : ENROULEMENT HELICOÏDAL CONTINU [2].	61
FIGURE.2.4 : ENROULEMENT HELICOÏDAL [2].	62
FIGURE.2.5 : PRINCIPE D'ENROULEMENT CIRCONFERENCEL [2].	62
FIGURE.2.6 : ENROULEMENT CIRCONFERENCELLE [2].	63
FIGURE.2.7 : PRINCIPE D'ENROULEMENT POLAIRE [2].	64

FIGURE.2.8: ENROULEMENT POLAIRE [3].	64
---	----

CHAPITRE III

FIGURE.3.1 : MACHINE DES ENROULEMENTS FILAMENTAIRE A DEUX AXES (POLAIRE) [26].	71
FIGURE.3.2: SOUS-CHAINE CINEMATIQUE [23].	72
FIGURE.3.3: CHAINE CINEMATIQUE PROPOSEE [4].	73
FIGURE.3.4 : SCHEMA DESCRIPTIF DE LA MACHINE [24].	73
FIGURE.3.5: MECANISME DE ROTATION [24]	74
FIGURE.3.6: MECANISME DE TRANSLATION [24].	74
FIGURE.3.7: LE MANDRIN AVEC LE MOULE	74
FIGURE.3.8: BAIN DE RESINE [24]..	74
FIGURE.3.9: ASSEMBLAGE DE LA MACHINE AVEC « SOLIDWORKS » [24].	75
FIGURE.3.10 : SCHEMA DESCRIPTIF SUR LES DIFFERENTS PARAMETRES QUI INFLUENT SUR L'ANGLE D'ENROULEMENT [27].	77

CHAPITRE IV

FIGURE.4.1: COMPORTEMENT DE LA RESINE G 35 EN TRACTION [24].	80
FIGURE.4.2 : BAC D'IMPREGNATION [24].	82
FIGURE.4.3 : L'ANGLE D'ENROULEMENT A.	82
FIGURE.4.4: FIBRES PASSANT DANS LE BAIN DE RESINE [7].	83
FIGURE.4.5 : LA MACHINE EN ETAT DE MARCHE [7].	83
FIGURE.4.6 : EXEMPLE D'UN PRODUIT FINI.	84
FIGURE.4.7: L'EMPILEMENT DES COUCHES D'UN TUBE.	84
FIGURE.4.8 : SCHEMA DU DURCISSEMENT DES TUBES EN FONCTION DU TEMPS.	86
FIGURE.4.9 : MACHINE ET DISPOSITIF DE TEST DE COMPRESSION (RIGIDITE).	87
FIGURE.4.10 : COURBE FORCE-DEFLEXION.	88
FIGURE.4. 11 : DISPOSITIF DE TEST "SPLIT DISK" ET EPROUVETTE.	89
FIGURE.4.12 : L'ALLURE GENERALE DE LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION.	90

CHAPITRE V

FIGURE.5.1: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR A= 50°	92
FIGURE.5.2: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE A A =55°	93
FIGURE.5.3: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR A = 60°	94
FIGURE.5.4: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR A = 65°	95
FIGURE.5.5: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR A = 75°	96
FIGURE.5.6: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR A = 90°	97
FIGURE.5.7 : ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR CU/JUTE POUR DIFFERENTS ANGLES	98
FIGURE.5.8: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR VERRE /JUTE POUR DIFFERENTS ANGLES	99
FIGURE.5.9: ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELLLE POUR LE JUTE POUR LES DIFFERENTS ANGLES	99

FIGURE.5.10: EVOLUTION DE LA FORCE EN FONCTION DE L'ANGLE A.....	100
FIGURE.5.11: EFFET DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A ET DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RIGIDITE SPECIFIQUE A LA COMPRESSION CIRCONFERENCELE.....	101
FIGURE.5.12: EFFET DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A ET DE LA NATURE DES FIBRES SUR LE MODULE D'YOUNG A LA COMPRESSION CIRCONFERENCELE.....	102
FIGURE.5.13: L'EVOLUTION ECC EN FONCTION DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A ET DE LA NATURE DES FIBRES.....	103
FIGURE.5.14 : L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 50°.....	105
FIGURE.5.15 : L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 55°.....	106
FIGURE.5.16 : L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 60°.....	107
FIGURE.5.17 : L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 65°.....	108
FIGURE.5.18 : L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A =75°.....	109
FIGURE.5.19 : ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A =90°.....	110
FIGURE.5.20: EFFET DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A ET DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION CIRCONFERENCELE Σ TC(MPA).....	111
FIGURE.5.21 : EFFET DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A ET DE LA NATURE DES FIBRES SUR LE MOULE D'YOUNG EN TRACTION CIRCONFERENCELE, ETC (GPA).....	112
FIGURE.5.22 : L'EVOLUTION DE ECC ET ETC EN FONCTION DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A POUR LES TUBES A FIBRES DE JUTE.....	113
FIGURE.5.23 : L'EVOLUTION DU ECC ET ETC EN FONCTION DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A POUR LES TUBES HYBRIDES A FIBRES VERRE-JUTE.....	113
FIGURE.5.24 : L'EVOLUTION DU ECC ET ETC EN FONCTION DE L'ANGLE D'ENROULEMENT A POUR LES TUBES HYBRIDES A FIBRES CUIVRE-JUTE.....	114
FIGURE.5.25 : COURBES DE TRACTION AXIALE DE TUBE V-90°.....	115

Liste des tableaux

TABLEAU.1.1 : EXEMPLE DE QUELQUES CARACTERISTIQUES POUR LE POLYPROPYLENE ET LE POLYAMIDE [8].	19
TABLEAU.1.2 : CARACTERISTIQUES DES RESINES THERMODURCISSABLES ET DES RESINES THERMOPLASTIQUES [9].	20
TABLEAU.1.3 : PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES FIBRES DE VERRES (BEAUDOIN, 1982) [10].	27
TABLEAU.1.4 : UTILISATION MONDIALE DES FIBRES NON-BOIS DANS LA PRODUCTION DE LA PATE DE PAPIER [18].	33
TABLEAU.1.5 : PROPRIETES MECANIQUES D'UNE RESINE RENFORCEE PAR DES FIBRES NATURELLES ET FIBRES DE VERRE [9].	34
TABLEAU.1.6 : MONTRE LES PROPRIETES MECANIQUES DU MATERIAU COMPOSITE (FIBRES VEGETALES-PLASTIQUE) [19].	34
TABLEAU.1.7 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FIBRE DE JUTE [21].	38
TABLEAU.1.8 : PROPRIETES DE LA FIBRE DE JUTE EN COMPARAISON AVEC D'AUTRES FIBRES [21].	39
TABLEAU.4.1 : Caractéristiques de la résine.	79
TABLEAU.4.2 : CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE LA RESINE [24].	80
TABLEAU.4.3 : CARACTERISTIQUES DES FIBRES DE JUTE ET DE VERRE [24].	80
TABLEAU.4.4 : VITESSE DE ROTATION DU MANDRIN ET DE CHARIOT POUR CHAQUE ANGLE A. .	82
TABLEAU.4.5 : ARCHITECTURE DES DIFFERENTS TUBES REALISES.	85
TABLEAU.5.1 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE POUR A = 50°.	92
TABLEAU.5.2 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE A =55°	93
TABLEAU.5.3 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE POUR A = 60°.	94
TABLEAU.5.4 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE POUR A = 65°.	95
TABLEAU.5.5 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE POUR A = 75°.	96
TABLEAU.5.6 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE COMPRESSION CIRCONFERENCELE POUR A = 90°.	97
TABLEAU.5.7 : PARAMETRES DE L'ESSAI TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 50°.	105
TABLEAU.5.9 : PARAMETRES DE L'ESSAI DE TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 60°.	107
TABLEAU.5.10 : PARAMETRES DE L'ESSAI TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 65°.	108
TABLEAU.5.11 : PARAMETRES DE L'ESSAI TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A =75°.	109
TABLEAU.5.12 : PARAMETRES DE L'ESSAI TRACTION CIRCONFERENCELE POUR A = 90°.	110

Introduction générale

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants pris seuls ne possèdent pas.

Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc...) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Ils trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique.

Les composites étant le plus souvent élaborés à des fins structurales, ce sont souvent et surtout leurs propriétés mécaniques rehaussées, par rapport à celle des composants pris seuls, qui sont recherchées. Néanmoins, la description fine des composites du point de vue mécanique reste complexe de par la non-homogénéité du matériau.

Aussi, l'objectif de notre travail est d'élaborer des composites et de les caractériser mécaniquement. Pour cela nous avons utilisé le procédé d'enroulement filamentaire, qui consiste à réaliser des tubes à partir de fibres unidirectionnelles et enroulées autour d'un cylindre.

Pour ce faire, nous avons réalisé des tubes avec des fibres de natures différentes, imbibées de résine et enroulées sous différents angles. Les tubes ainsi conçus sont ensuite traités thermiquement afin d'accélérer le durcissement de la résine, puis caractérisés mécaniquement ; et ce, essentiellement par compression circonférentielle et traction circonférentielle.

La résine utilisée est du type Epoxy, qui est une matière thermodurcissable, alors que les fibres sont en jute, fibre naturelle, en cuivre ou en verre. Pour une grande partie, nos tubes sont hybrides dans le sens où nous avons réalisé des couches en fibres de cuivre de verre ou de cuivre, insérées entre des couches en fibres de jute.

Le présent mémoire se départage en deux grandes parties.

La première partie, théorique, regroupe, en gros, trois chapitres traitant des composites, des différents types d'enroulement filamentaire et de la machine d'enroulement filamentaire.

La seconde partie, expérimentale, présente en premier lieu les procédures et différents dispositifs expérimentaux afin de mettre en relief les différentes manipulations réalisées. Dans le second volet de cette partie, sont présentés en détails les résultats de notre travail, accompagnés des commentaires requis et d'éventuelles interprétations.

Nous terminons le travail par une conclusion générale où nos résultats sont résumés et des perspectives proposées.

CHPITRE 1
GENERALITES SUR LES MATERIAUX
COMPOSITES

1. Généralités sur les matériaux composites

Introduction

Un des objectifs de ce premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures. Etant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tous les types de composites.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents constituants des matériaux composites. Dans la deuxième partie, on va présenter le procédé de fabrication de ce type de matériaux.

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, libertés de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [1].

1.1. Définition d'un matériau composite

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait, l'appellation matériau 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, dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit « hybride ». La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant. La matrice assure la cohésion et l'orientation des renforts, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [2].

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [3].

1. 2 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.

1.2.1 Classification suivant la forme des constituants :

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux classes, les composites à fibres et les composites à particules.

1.2.1.1 Composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc...

L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques, suivant le cahier des charges imposées, en jouant sur [3]:

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres,

1.2.1.2 Composites à particules :

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse [4].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.2.2 Classification suivant la nature des constituants :

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines génie civil (béton), spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
- Les composites à matrices métalliques (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques [3].

1.3 Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes (matrice, renfort) comme le montre la **Figure 1.1**, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément [6].

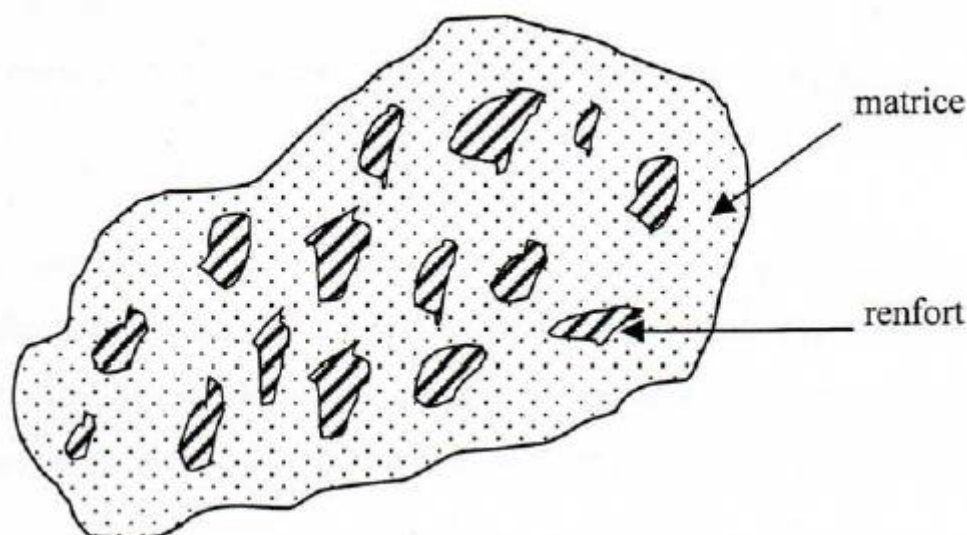


Figure 1.1 : matériaux composites [6].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.4 Matrices & Renforts :

La liaison entre renfort et matrice est créée pendant la phase d'élaboration du matériau composite.

1.4.1 Matrices :

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

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

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la **Figure 1.2** [7].

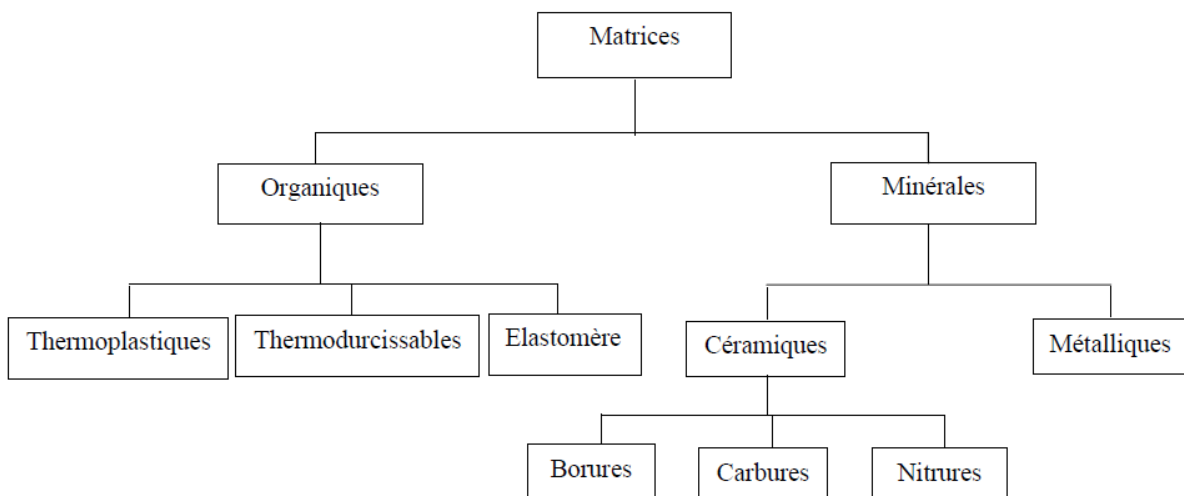


Figure 1.2 : Différentes familles de matrices [8].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.4.1.1 Les divers types de résines :

Les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc. Deux grandes familles de résines polymères existent :

- Les résines thermoplastiques.
- Les résines thermodurcissables.

Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée [4,5].

1.4.1.1.1 Les 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 oeuvre 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 oeuvre par injection.

Les résines thermoplastiques, dont la fabrication atteint de loin le plus gros tonnage du fait d'un faible coût, possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc [4,5].

Le **tableau 1.1** présente quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

Tableau 1.1 : Exemple de quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide [8].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m^3)	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 ($^{\circ}C$)	50 – 60	65 – 100

1.4.1.1.2 Les résines thermodurcissables :

Contrairement aux résines thermoplastiques, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites [4].

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois

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.,

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le **Tableau 1.2** [8].

Tableau 1.2: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [9].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Matrices	Thermoplastiques	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	difficile	Aisée
Moulage	Chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	réduite	Meilleure
Chute et déchets	recyclables	Perdus

1.4.1.1.3 Les 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 [4].

1.4.1.1.4 Les résines polyesters

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

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

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résine rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en oeuvre des matériaux composites sont du type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes [7] :

Masse volumique 1200 Kg/m³

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

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

Avantage

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé.
- Une bonne stabilité dimensionnelle.
- Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus.
- La facilité de 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.

Inconvénients

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

1.4.1.1.4 Les résines époxy

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

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxy, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc...) [7].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxy 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 époxy conduisent donc à un ensemble de performances élevées.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Avantage

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

Inconvénients

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

1.4.1.2 Les charge :

1.4.1.2.1 Charges renforçantes :

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en:

Charges sphériques :

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur forme sphérique qui évite les concentrations de contraintes et, par conséquent, diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques. Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères pleines ou creuses ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150 μm . Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.).

Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées [4,5].

Charges non sphériques :

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écailles de dimensions de 100 à 500 μm , et d'épaisseur de 1 à 20 μm . Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques [4,5].

Charges de faible coût :

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût.

Charges ignifugeantes :

Ces charges ajoutées aux résines ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Charges conductrices et antistatiques :

Les résines organiques sont des isolants thermiques et électriques. Pour certaines applications, il est donc nécessaire d'ajouter un élément conducteur.

1.4.1.2.2 Les 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.

1.4.1.3 Les additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme lubrifiants ou colorants entre autres [4].

1.4.1.3.1 Lubrifiants et agents de démoulage :

Ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.

1.4.1.3.2 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 (résine, plastifiant), pour une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté. Leur emploi est limité, du fait d'une mauvaise tenue chimique et thermique.

1.4.1.3.3 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 microfissurations 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 (additifs dits "low profile" et "lowshrink"), 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 de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.4.1.3.4 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 (phénomène de photo-oxydation).

1.4.2 Renforts :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est présentée sur la **figure 1.3** [4,5].

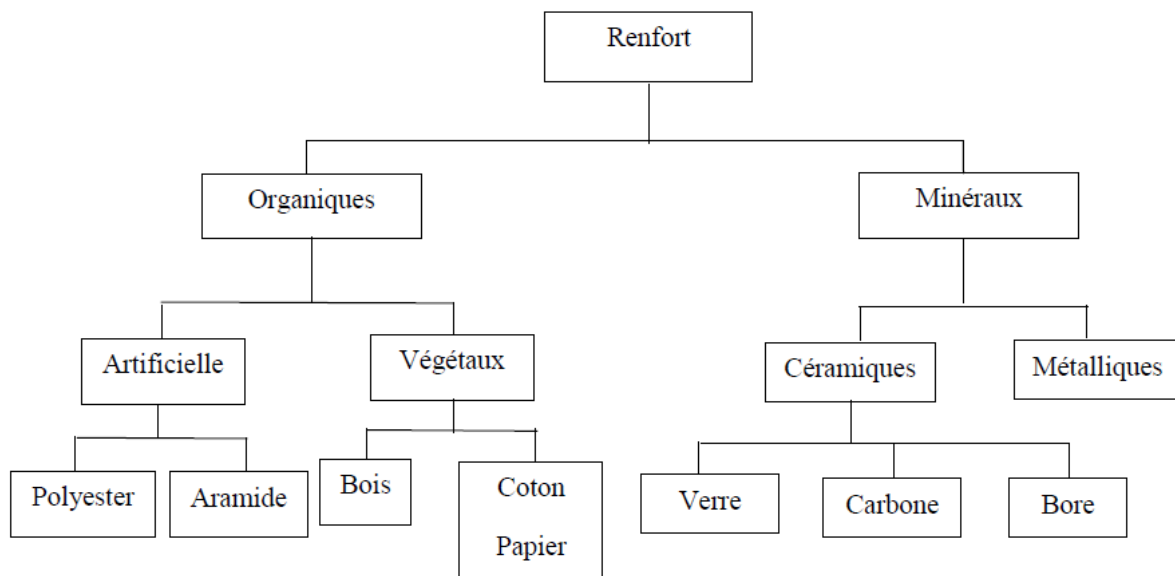


Figure 1.3 : Différentes familles de renfort [8].

1.4.2.1 Les principales fibres :

1.4.2.1.1 Les 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 (**Figure 1.4**) de faible diamètre (quelques dizaines de microns), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques (Baron et Ollivier, 1996). Ces fibres sont utilisées dans la confection des panneaux préfabriqués, murs rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton et enduit pour bloc de béton (Beaudoin, 1982) [10].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Le **tableau 1.3** montre les différentes propriétés des fibres de verre.

Tableau 1.3: Propriétés physiques et mécaniques des fibres de verres (Beaudoin, 1982) [10].

Fibre	Diamètre (µm)	Densité	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (GPa)
verre	5-500	2,4	2-3,5	80	2-3

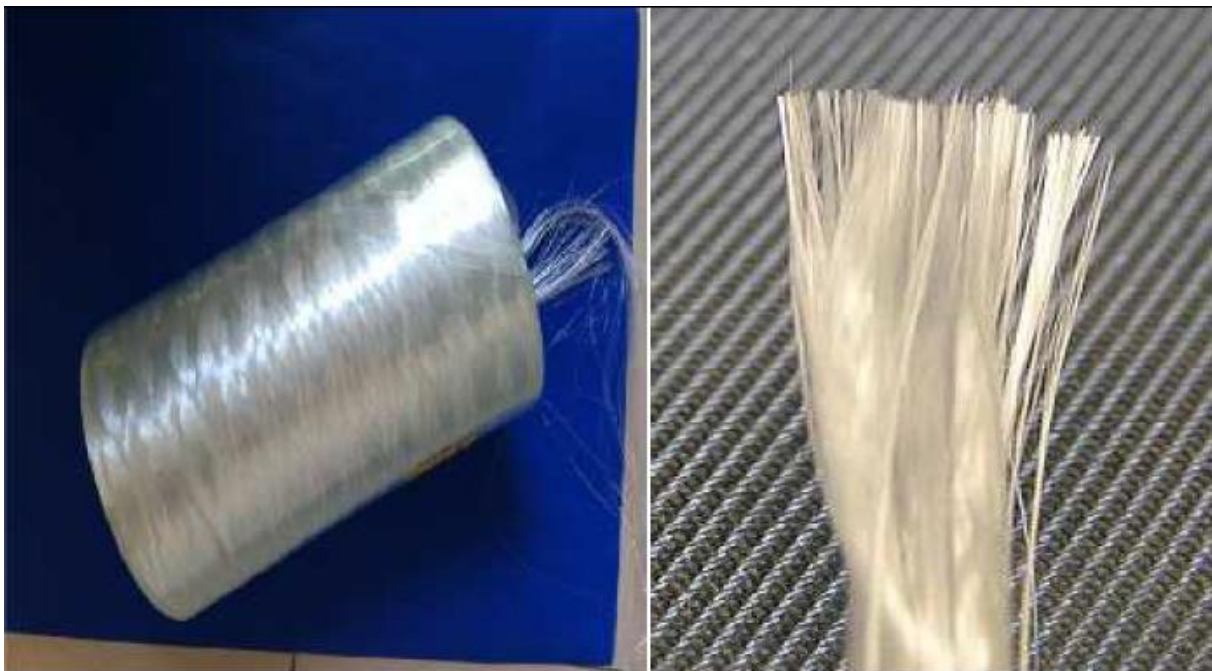


Figure 1.4 : Les fibres de verre [24].

1.4.2.1.2 Les fibres de carbone :

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre comme montre dans la **Figure 1.5**, et est composée principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre. L'alignement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante pour sa taille. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou tissé.

Ce matériau est caractérisé par sa faible densité (1,7 à 1,9), sa résistance élevée à la traction et à la compression, sa flexibilité, sa bonne conductivité thermique, sa tenue en température et son inertie chimique (sauf à l'oxydation).

Pratiquement trois types de fibres de carbones sont commercialisés :

□

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Les fibres hautement résistant (H.R.)

□ Les fibres à module intermédiaire (I.M.)

□ Les fibres à haut module (H.M.)

Les fibres de carbones sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage de béton de ces fibres très difficile [9].



Figure 1.5: a) fibre de carbone b) Tissu en **fibre** de carbone [24].

1.4.2.1.3 Les fibres céramiques :

Une fibre céramique est une fibre minérale définie comme toute fibre minérale (vitreuse) artificielle à orientation aléatoire et dont le pourcentage pondéral d'oxydes alcalins et d'oxydes alcalino-terreux ($[Na_2O] + [K_2O] + [CaO] + [MgO] + [BaO]$) est inférieur à 18 % [9].

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support, la **Figure 1.6** montre un exemple sur les fibres céramiques [4].



Figure 1.6: Fibres céramique [4].

1.4.2.1.4 Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques sont parmi les fibres les plus commercialisées, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (**Figure 1.7**). Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 (GPa), une masse volumique de 7,85 t/m³ et une résistance à la traction de 1 à 2 (GPa). Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élanement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6,4 à 76 mm L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur et de la forme a donné lieu à de nombreuses études [**10**].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

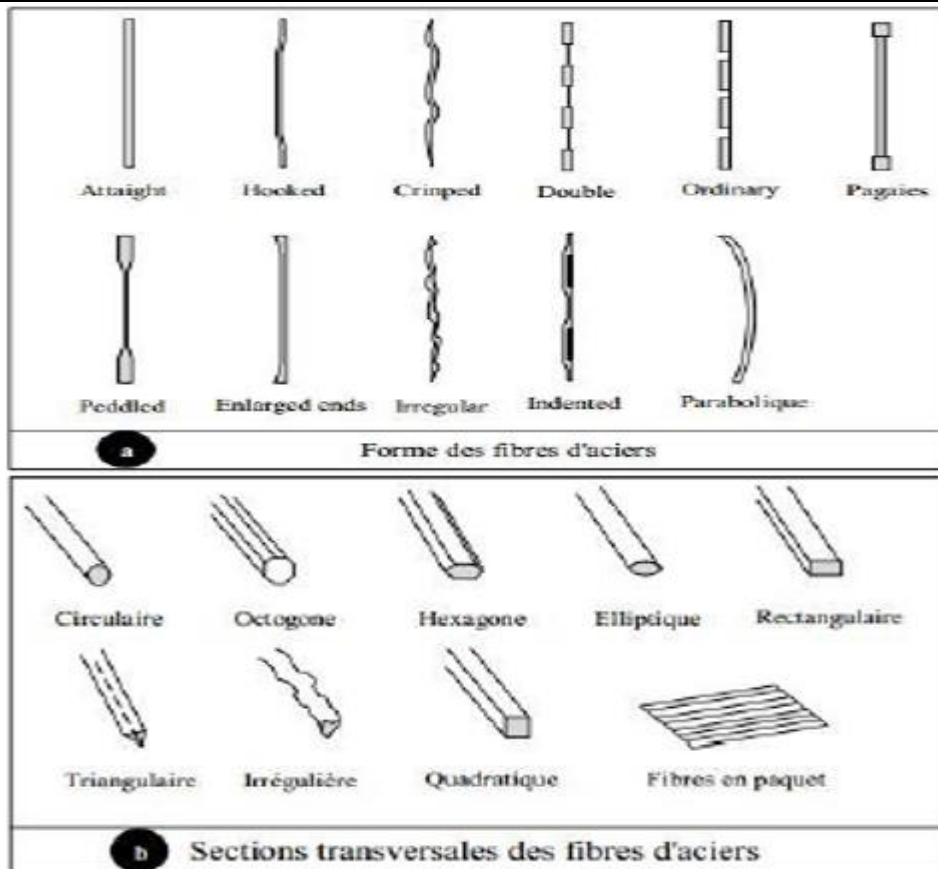


Figure 1.7 : Géométrie des fibres métalliques [10].

1.4.2.1.5 Les fibres synthétiques :

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, et qui conservent leurs caractéristiques mécaniques à températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont toutefois nettement plus faibles que celles des fibres usuelles. Elles sont utilisées dans les isolants électriques et thermiques, les protections thermiques : boucliers de missiles, cônes de rentrée de véhicule spatial (**Figure 1.8**), etc... [4].



Figure 1.8 : Fibres synthétiques [4].

1.4.2.2 Les fibres végétales :

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

1.4.2.2.1 Présentation des fibres végétales :

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement (comme on voyons dans la **Figure 1.9**) ou comme charges [9].

Dans le temps moderne (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'est le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales.

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales [9].



Figure 1.9 : Fibres végétales [9].

1.4.2.2 Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir : Les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface (**Figure 1.10**).

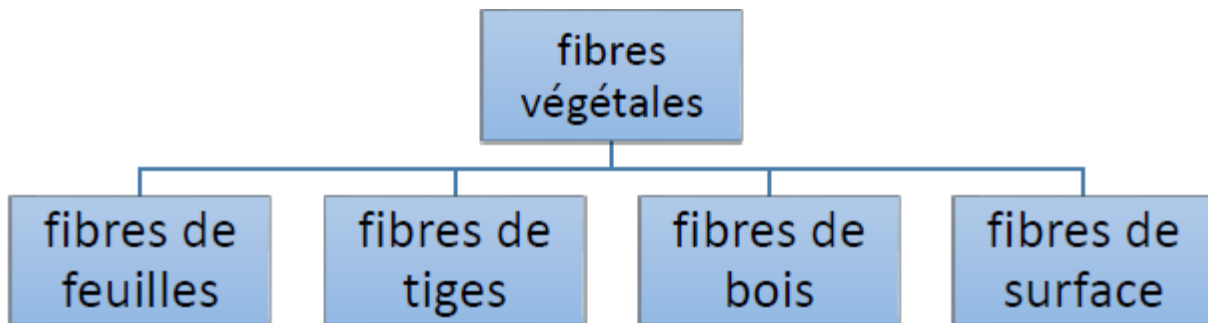


Figure 1.10: Classification des fibres végétales [6].

A. Les Fibres de feuilles :

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par un chevauchement de paquet qui entoure les feuilles pour les renforcer. Ces fibres sont dures et rigides. Les fibres de feuille les plus cultivées sont : la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca [9]. De ce fait, plusieurs chercheurs tels que : NILSSON [9] et AYYAD et al. [9] ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuille.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

B. Les fibres de tiges :

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges des plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sunn, de kennaf, de urena et de chanvre [13].

C. Les fibres de bois :

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

D. Les fibres de surface

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres.

Nous citons entre autre le coton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre [14,15]. Par ailleurs, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

1.4.2.2.3 Autres domaines d'utilisation des fibres végétales :

L'utilisation des fibres végétales est très ancienne. A titre d'exemple, la première utilisation des fibres végétales a été dans le domaine de textile et de production des cordes, en suite dans la production du papier et enfin dans la production de matériaux de construction composites [9].

A. Domaine du textile :

Plusieurs fibres végétales sont utilisées dans le domaine du textile. A titre d'exemple nous citons les fibres :

- De graine : tel que le coton et le kapok.
- De tige : tel que le lin, le chanvre et le jute.
- De feuille : tel que le sisal et le raphia.

B. Domaine de la production du papier :

Dans la production du papier plusieurs fibres végétales sont utilisées. A titre d'exemple le **Tableau 1.4** présente le taux d'utilisation des fibres non-bois (paille, bagasse, bambou, chanvre...) dans la production de la pâte du papier [18].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Tableau 1.4: Utilisation mondiale des fibres non-bois dans la production de la pâte de papier [18].

Type de Fibre	Utilisation mondiale (10 ³) tonnes / Année	
	1993	1998 (Estimation)
Paille	9566	10187
Bagasse	2984	3682
Bambou	1316	1850
Cotton, Roseau, Sisal, Jute, Chanvre, Abaca, Kenaf et fâ lax	6870	7742
Total	20736	23461

Il faut mentionner que l'Algérie utilise une fibre végétale appelée Alfa dans la production de la pâte de papier.

C. Domaine de l'Art :

Les fibres végétales sont très employées dans la production des objets d'art (Tapis, Chaises et Tables...) ainsi que dans la décoration des maisons.

D. Domaine des matériaux composites :

La production de nouveaux matériaux composites à base de fibres végétales est l'un des domaines les plus récemment exploités. En effet, plusieurs chercheurs révèlent que le renforcement d'une matrice à base de résine ou de plastique par des fibres végétales ou naturelles donne de bons résultats tant sur le plan économique que sur le plan mécanique. Le **Tableau 1.5** reproduit les résultats des travaux de BOLTON [16] et qui montre que le matériau composite à base des fibres végétale-plastique ou végétale-résine présente des propriétés mécaniques aussi intéressantes que celles des fibres de verre.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Tableau 1.5 : Propriétés mécaniques d'une résine renforcée par des fibres naturelles et fibres de verre [9].

Fibre-Matrice	Densité	Résistance à la flexion (GPa)	Module de flexion (GPa)	Fraction de fibres en Vol. (%)
Bois / Phénolique « répartition au hasard »	1.2	0.11	8.0	65
Jute / Polyster « tissé »	1.2	0.090	8.0	50
Jute/Polyster « filé »	1.2	0.1	10	60
Coton / Epoxy	1.36	0.170	8.0	35
Jute/Epoxy « parallèle »	1.2	0.450	43.5	70
Kenaf / Epoxy « parallèle »	1.2	0.420	39.0	70
Verre /Epoxy « bien rangé »	1.7	0.690	42.0	70
Verre /Epoxy « répartition au hasard »	1.9	0.172	10.3	70

En outre, LEAO et al. [17] et BLEDZKI et al. [19] montrent dans leurs travaux les possibilités d'améliorer les propriétés mécaniques des produits polymères (plastique) par leur renforcement par des fibres naturelles. Le produit ainsi obtenu trouve une large application dans l'industrie automobile, électronique et peut être largement utilisé dans la restauration des ouvrages.

Le **Tableau 1.6** montre les propriétés mécaniques du matériau composite (fibres végétales-plastique).

Tableau 1.6: montre les propriétés mécaniques du matériau composite (fibres végétales-plastique) [19].

Fibre/Matrice	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module de flexion (MPa)
Ramie/PP	34.67	3.43	29.33	3.02
Jute/PP	15.66	2.4	23.97	2.5
Curaua/PP	46.58	3.78	33.1	2.51

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.4.2.3 Architecture des fibres

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent des performances médiocres en compression et en cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts [2]:

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

1.4.2.3.1 Formes linéiques

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

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou mono-filament. Les mono-filaments sont ensuite réunis en fils ou mèches (**Figure 1.11**). Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique. Cette masse linéique dépend du diamètre et du nombre de mono-filaments.

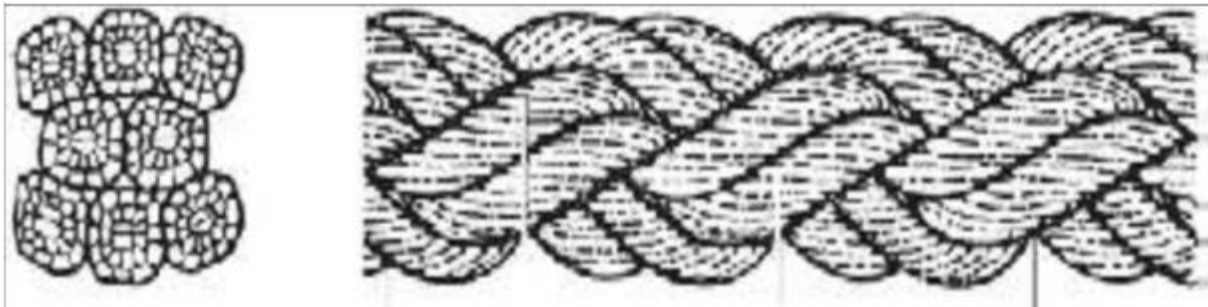


Figure 1.11 : Mono-filaments réunis en mèches [2].

1.4.2.3.2 Formes surfaciques

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

• Mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

• Tissus et rubans

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèche, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué (**Figure 1.12**).

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

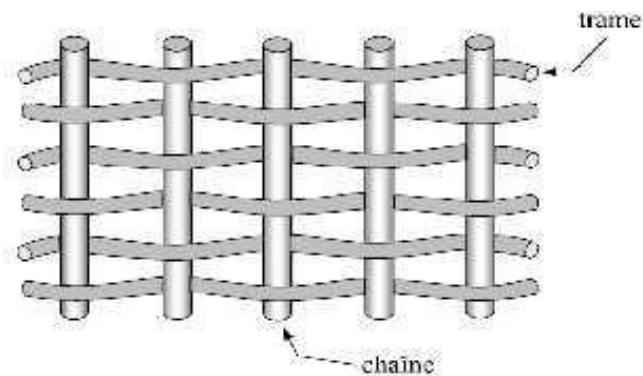


Figure 1.122 : Chaîne et trame d'un tissu [2].

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

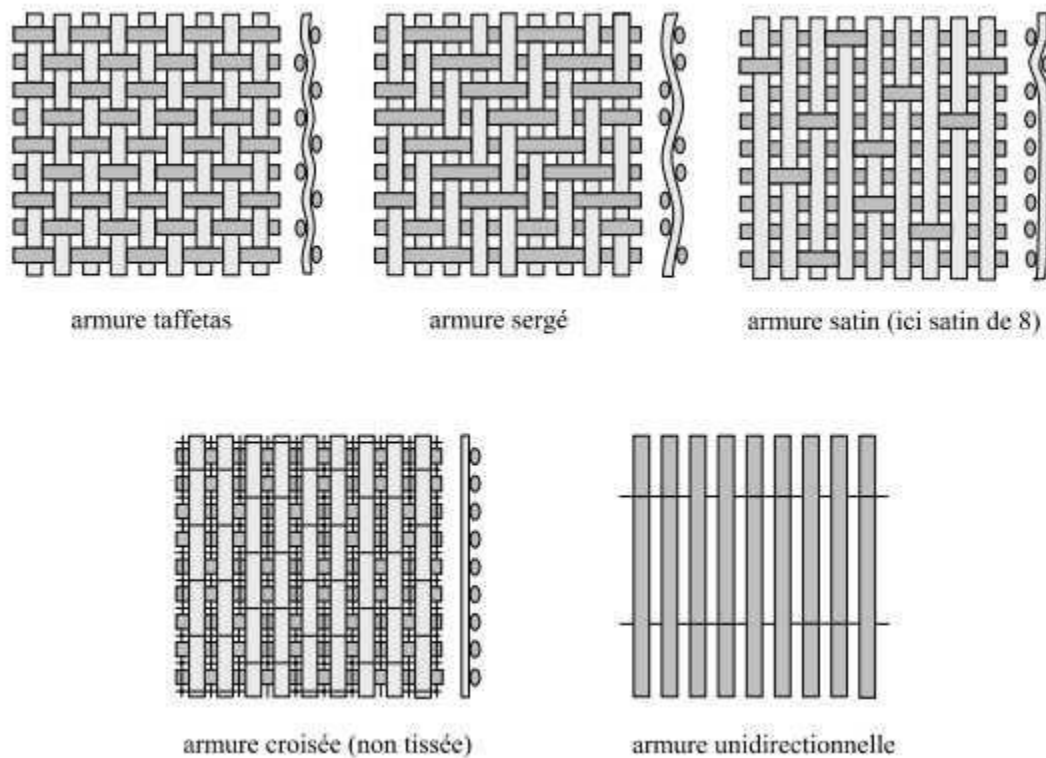


Figure 1.13 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus [2].

1.5 La fibre de jute :

1.5.1 Origine botanique de la fibre de jute :

Le jute est une plante des régions tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60% et 90% pour cent (genre *Corchorus*) qui appartient à la famille des liliacées (**Figure 1.14 a**). Le jute provient d'Asie du sud et plus particulièrement d'Inde et du Bangladesh, où se concentrent 95% des cultures mondiales.

Cette fibre végétale d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or » en raison de ses reflets (**Figure 1.14 b**). La fibre de jute exploitable correspond aux vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale [21].

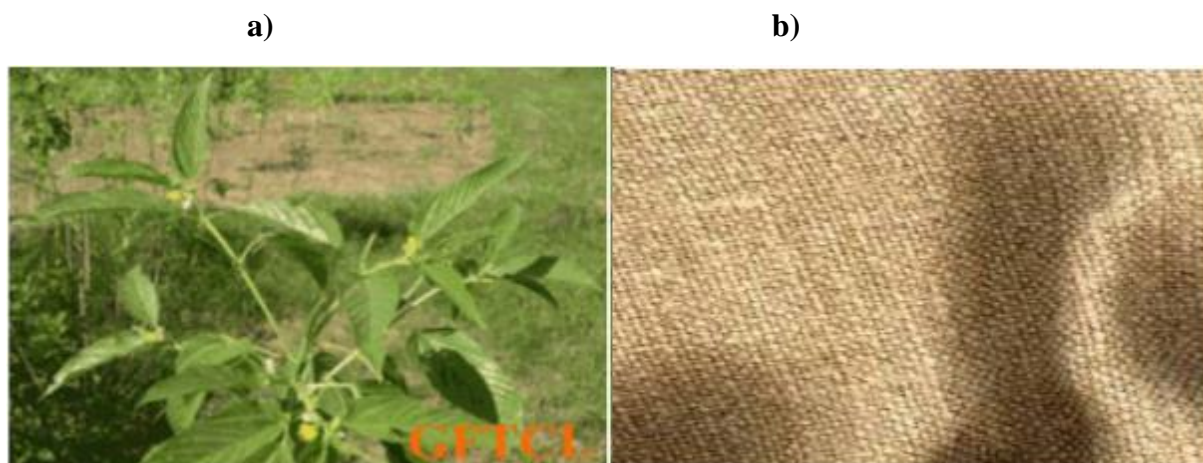


Figure 1.14 : Jute: a) variabilité due au caractère naturel, b) variabilité due à la technique de tissage [7].

1.5.2 Composition chimique de la fibre de jute :

Les propriétés de la fibre dépendent de plusieurs facteurs tels que la taille, la maturité, l'origine géographique et climatique. Les propriétés telles que la densité, la résistivité électrique, la résistance à la traction et le module initial, sont liés à la structure interne et à la composition chimique de la fibre [21]. La composition chimique et les propriétés de la fibre sont regroupées dans les tableaux 1.7 et 1.8.

Tableau 1.7: Composition chimique de la fibre de jute [21].

Constituants	Pourcentage (%)
Cellulose	60- 62
Hémicellulose	22- 24
Lignine	12 -14
Autres	1-2

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Tableau 1.8: Propriétés de la fibre de jute en comparaison avec d'autres fibres [21].

Fibre	Densité (g/cm ³)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Jute	1,3	26,5	393-773	1,5 – 1,8
Ramie	-	61,4- 128	400- 983	3,6 -3,8
Sisal	1,5	9,4- 22	511- 635	2- 2,5

1.5.3 Usage de la fibre de jute

Le jute est une fibre polyvalente ; avec la révolution industrielle, il a largement devancé le lin et le chanvre dans la fabrication des sacs et est utilisé dans les géotextiles, pour lutter contre l'érosion.

Le jute peut ainsi être utilisé pour produire des pièces de tissu, des couvertures et des vêtements. En Inde en 1978, des maisons et un silo ont été réalisés à Madras, en polyester renforcé par des fibres de jute.

Le composite jute-coco trouve une demande importante dans la fabrication des planches en contreplaqué, un potentiel dans les trains de chemin de fer (support de couchette), dans le bâtiment, portes et fenêtres et dans les secteurs de transport en tant que support et dossier des sièges.

Une application de mats non tissés de jute imprégnés de résine utilisé dans la fabrication des panneaux de portes de voitures, produit un matériau léger, mais solide. Les composites de jute extrudés trouvent des applications dans les tôles de toiture, supports de câbles, portes et cadres de fenêtres.

Le jute présente d'autres avantages : bon isolant, il est doté de propriétés antistatiques intéressantes et affiche une faible conductivité thermique; sa capacité de rétention de l'humidité est moyenne [22].

1.6 Mise en œuvre et Architecture des Matériaux Composites :

L'objectif de cette partie n'est pas de faire une étude approfondie de la technologie de mise en œuvre des matériaux composites. Il se propose simplement de dégager les principes de différents processus de mise en œuvre.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES 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. Cette technique générale appelée stratification, conduisant à l'élaboration de stratifiés, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites [4].

1.6.1 Mise en œuvre des matériaux composites :

1.6.1.1 Moulages sans pression :

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule.

Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur

[4].

1.6.1.1.1 Moulage au contact :

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée "gel coat"

La **Figure 1.15** présente le Principe du moulage au contact.

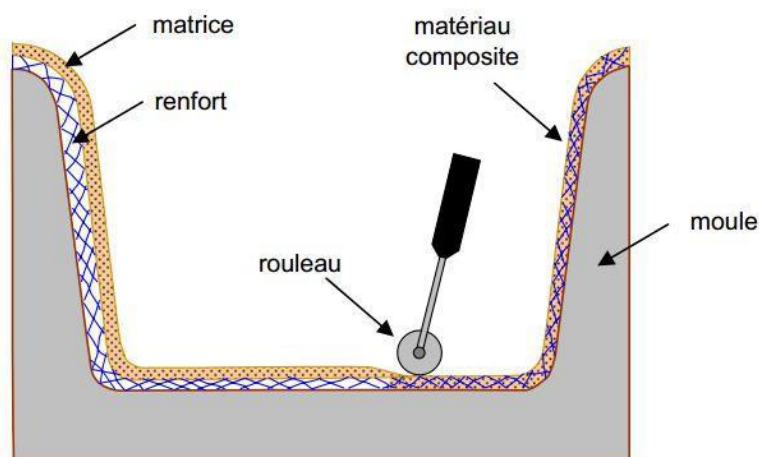


Figure 1.15: Principe du moulage au contact [9].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1. Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
2. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
3. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un bullage est effectué avec un rouleau cannelé.
4. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
5. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
6. La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
7. Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

1.6.1.1.2 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 stratifié 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 1.16**) [9].

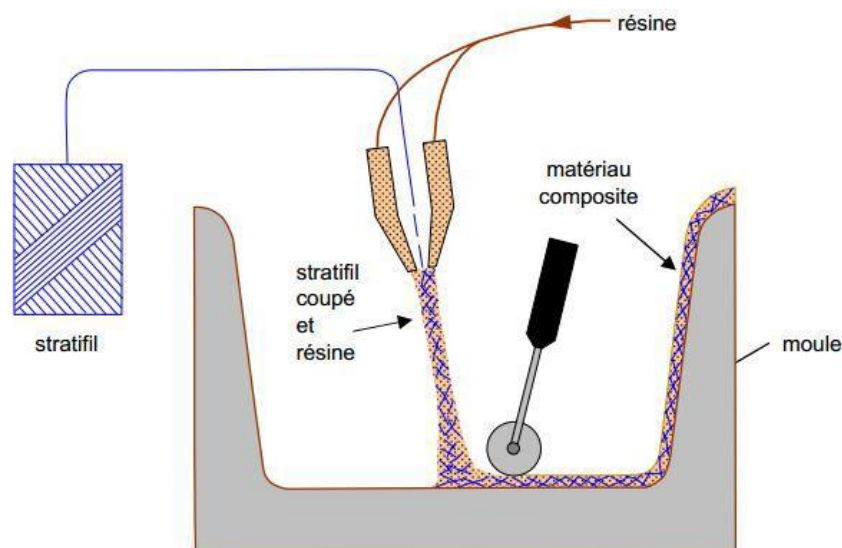


Figure 1.16: Principe du moulage par projection simultanée [9].

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

du matériau restent moyennes. Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques [4].

1.6.1.1.3 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 1.17**).

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

Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80% en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important [7].

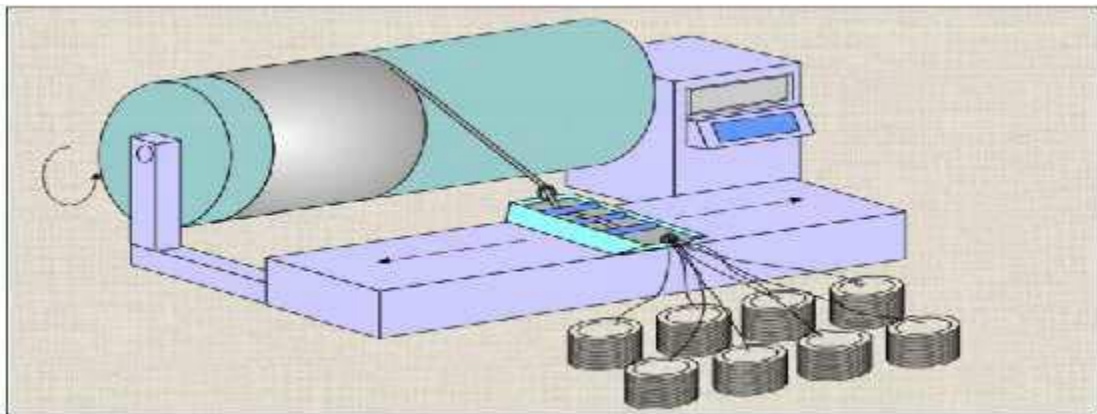


Figure 1.17 : Principe de l'enroulement filamentaire [7].

1.6.1.2 Moulage sous vide :

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique (**Figure 1.18**). 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 déballe la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

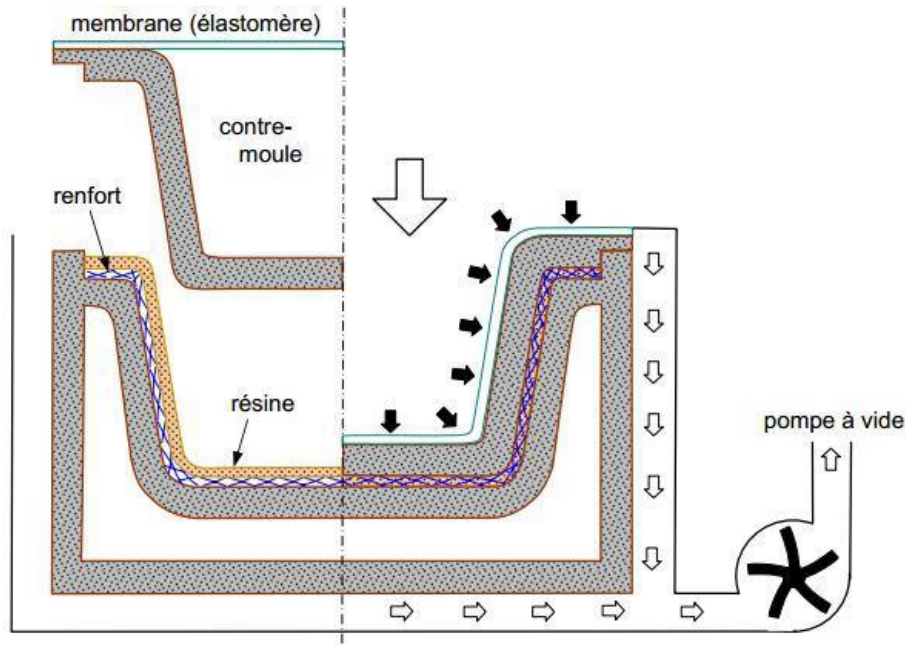


Figure 1.18 : Moulage sous vide [9].

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes [4,5].

1.6.1.3 Moulage par compression :

1.6.1.3.1 Moulage par injection de résine :

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 **Figure I.19** illustre un schéma du moulage par injection. [9]

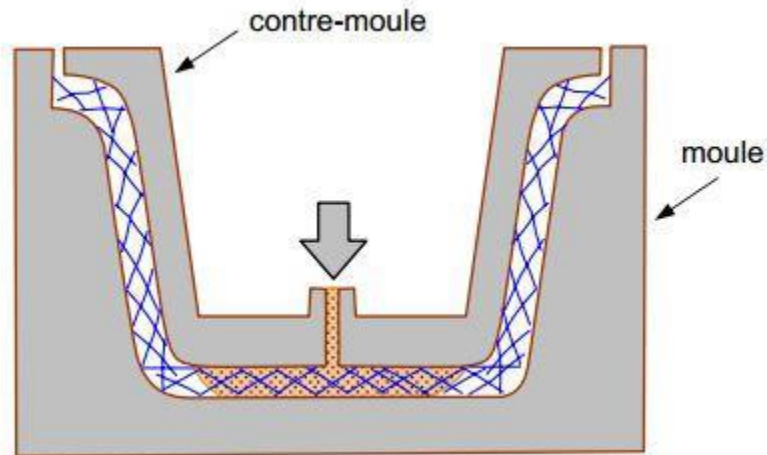


Figure 1.19: Moulage par injection de résine [9].

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

1.6.1.3.2 Moulage par compression à froid :

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule (**Figure 1.20**), en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent. Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de.

Gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contremoule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production [4,5].

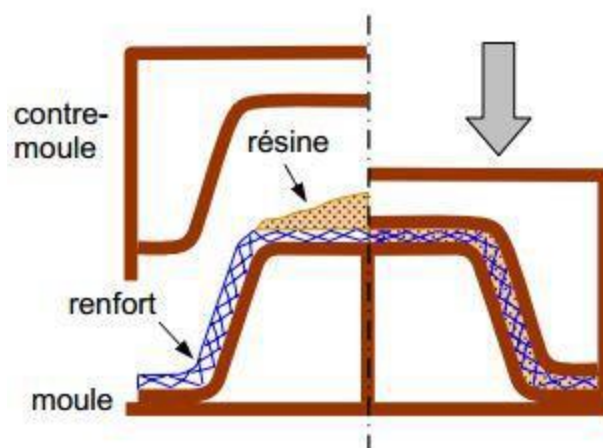


Figure 1.20: Principe du moulage par compression à froid [4].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud [4,5].

1.6.1.3.3 Moulage par compression à chaud :

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants (**Figure 1.21**). Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée [4,5].

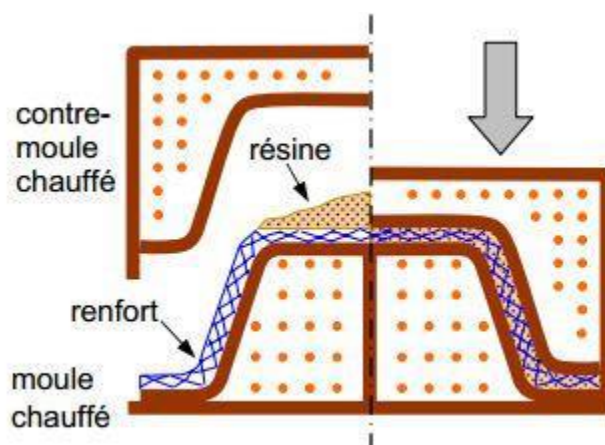


Figure 1.21: Principe du moulage par compression à chaud [4].

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [4,5].

1.6.1.3.4 Moulage par injection :

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques. Des granulés

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation la **Figure 1.22** présente le Moulage par injection [4,5].

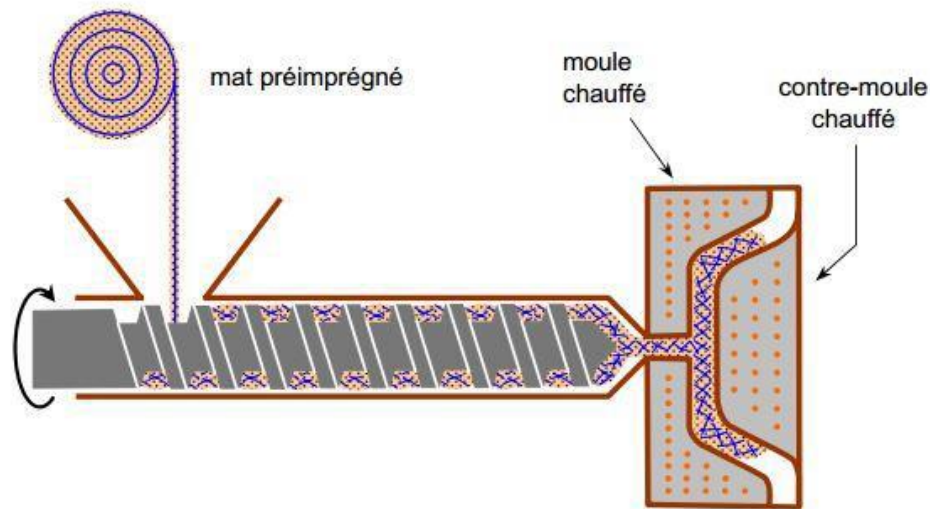


Figure 1.22 : Moulage par injection [4].

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé “plastiques renforcés” que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries [4,5].

1.6.1.4 Moulage en continu :

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (**Figure 1.23**), de panneaux ondulés pour toitures (**figure 1.24**), plaques nervurées, etc. Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases [4,5].

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
2. Une phase de mise en forme.
3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

4. Une phase de refroidissement et découpage.

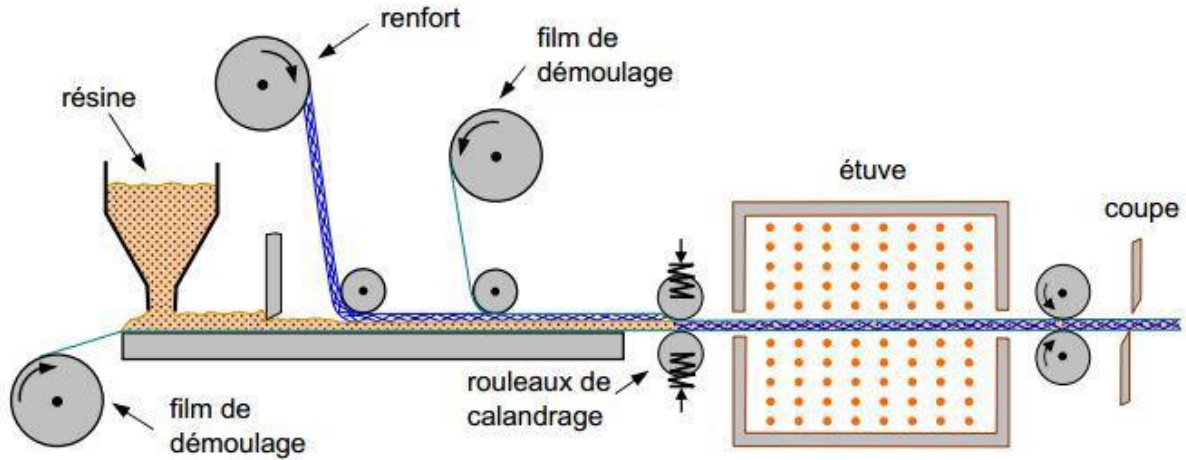


Figure 1.23: Moulage en continu de plaques [5].

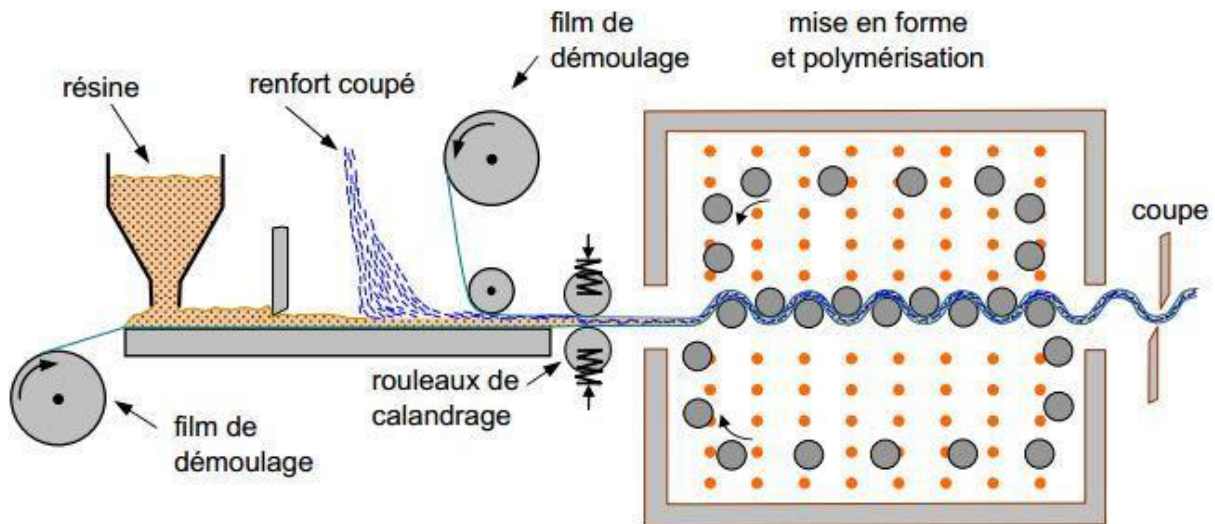


Figure 1.24 : Moulage en continu de panneaux ondulés [4].

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (**figure 1.23**), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (**figure 1.24**), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles. Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel [4,5].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.6.1.5 Moulage par centrifugation :

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (**figure 1.25**) 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 stratifié 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 stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort.

La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve. Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation [4,5].

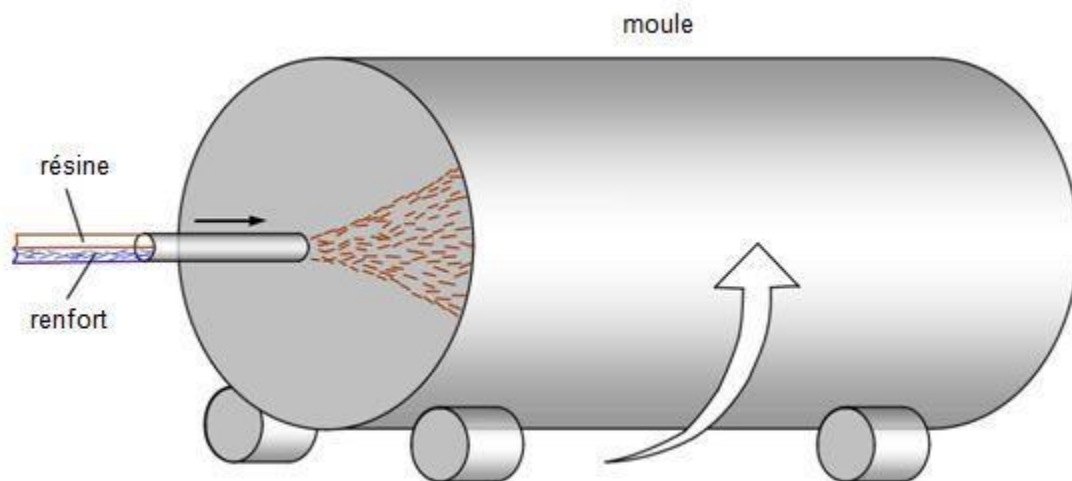


Figure 1.25 : Moulage par centrifugation [4].

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule [4,5].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.6.1.6 Moulage par la méthode RTM "Resin Transfer Molding":

Le principe du Moulage par Transfert de Résine RTM (en anglais Resin Transfer Molding) consiste à injecter le mélange réactif sous basse pression (1 à 10 bars) entre le moule et le contre-moule. Pour encore améliorer la pénétration du mélange réactif dans le moule et le renfort, le vide peut être créé dans le moule.

La préparation du moule est semblable à celle du moulage au contact : agent démoulant et gel-coat pour l'obtention des surfaces lisses. Les renforts fibreux secs sont placés dans le moule construit en résine ou métal. Les moules résine sont choisis pour des petites séries ; environ 500 pièces réalisables pour les polyesters, le double pour les époxydes. Les moules métalliques aluminium ou acier seront préférés pour de plus grandes séries au-delà de 20 000 pièces. Pour les séries intermédiaires on choisira des moules résines avec peau électroformée [9].

La résine est injectée sous pression, elle polymérise dans le moule puis la pièce durcie est évacuée lors de l'ouverture du moule. La machine d'injection est un prototype de laboratoire construit par la société MATRASUR. Elle est constituée d'une pompe qui permet d'injecter le liquide sous pression et vitesse constante dans un moule en acier. Le moule et le contre moule sont équipé d'un système de chauffe en se basant sur une circulation d'huile chaude (**figure 1.26**) L'injection du mélange époxyde/amine a été réalisée dans un moule rectangulaire de dimension (400 x 40 x 3) mm³ chauffé à 80 ° [9].



Figure 1.26 : Machine RTM [9].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

- (a) : Système de contrôle de pression d'air.
- (b) : Cuve contenant le mélange.
- (c) : Moule en acier ouvert couvert d'un contre moule en Plexiglas.
- (d) : Event.

Le renfort utilisé est un mat de fibres de palmier préparé sous presse (entre 2 à 6 tonnes de pression) sous une température allant de 50 à 70°C. Les fibres sont mises dans des gabarits en aluminium avec une orientation aléatoire. La masse des fibres telle que le pourcentage final dans le composite soit de 15% en poids. Les fibres PLD forment sous l'effet de la chaleur et de la pression exercée un mat fin. Celui-ci subit un découpage des bords puis mis dans le moule RTM [9].

Les fibres oxydées par TEMPO sont récupérées du milieu réactionnel puis sont lavées à l'eau et mises dans les gabarits en aluminium sous forme de suspension aqueuse de fibres.

Ces gabarits sont introduits dans l'étuve réglée à 60°C sous un flux d'air chaud pendant une nuit. Les mats son récupérés directement par cette méthode et mises dans le moule de la machine RTM. Une pression supplémentaire avec la presse peut être appliquée sur ses mats préformés. Cette technique de séchage n'est pas applicable dans le cas des fibres PLD vierges parce que les fibres ne forment pas une suspension stable dans l'eau [9].

1.6.2 Architecture des matériaux 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.

1.6.2.1 Stratifiés

Les stratifiés (**figure 1.27**) sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiés, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines [5].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

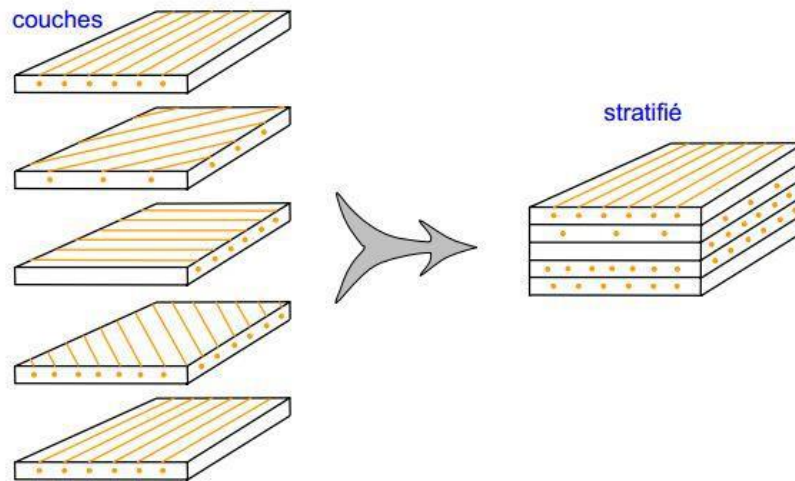


Figure 1.27 : Constitution d'un stratifié [4].

Nous étudions les divers types de stratifiés :

1.6.2.1.1 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 1.28) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche [4,5].

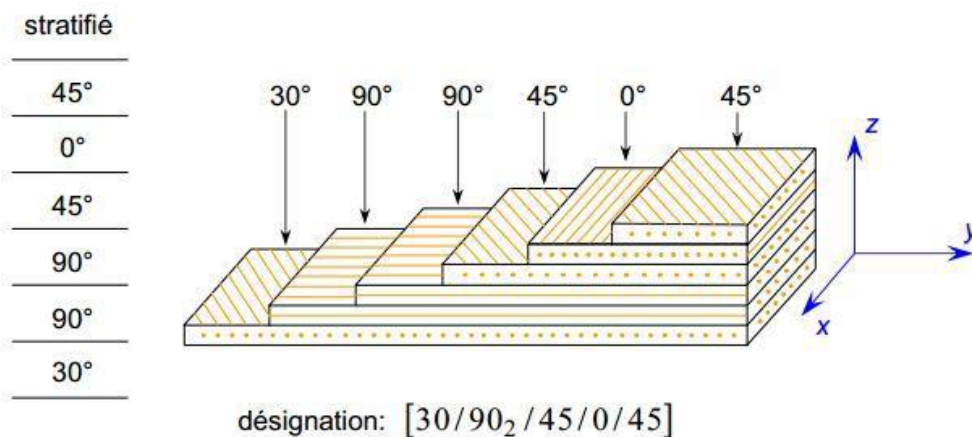


Figure 1.28 : Désignation d'un stratifié [5].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

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 1.29** [4].

- **Angles positifs et négatifs :**

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou - sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué (**figure 1.29**).

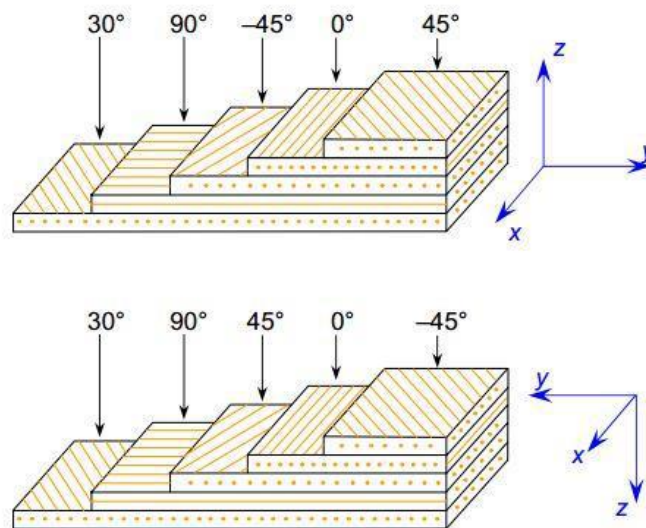


Figure 1.29 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés [4].

- **Stratifiés symétriques :**

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives [9].

- ✓ Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique.
- ✓ Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée.

- **Séquence :**

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

- **Stratifiés hybrides :**

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation.

1.6.2.1.2 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 [4,5].

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 imposé :

- 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 : par exemple (**figure 1.30**) couches unidirectionnelles dans la zone de traction, mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion.
- 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.

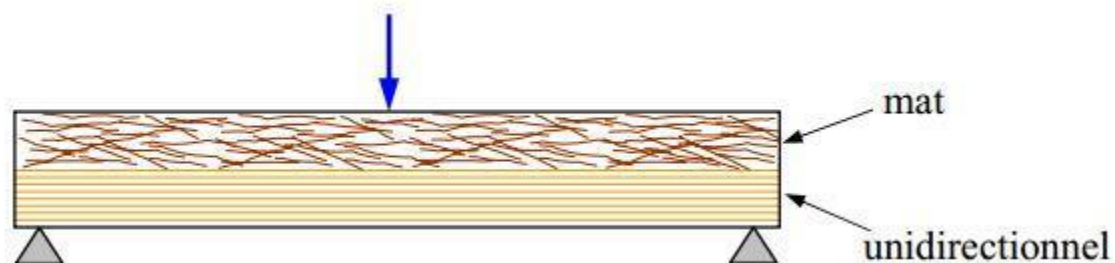


Figure 1.30 : Poutre sollicitée en flexion [4].

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

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.6.2.2 Composites sandwiches :

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme (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 [9].

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 1.31**) :
 - Le balsa ou bois cellulaire.
 - Diverses mousses cellulaires.
 - Des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques.

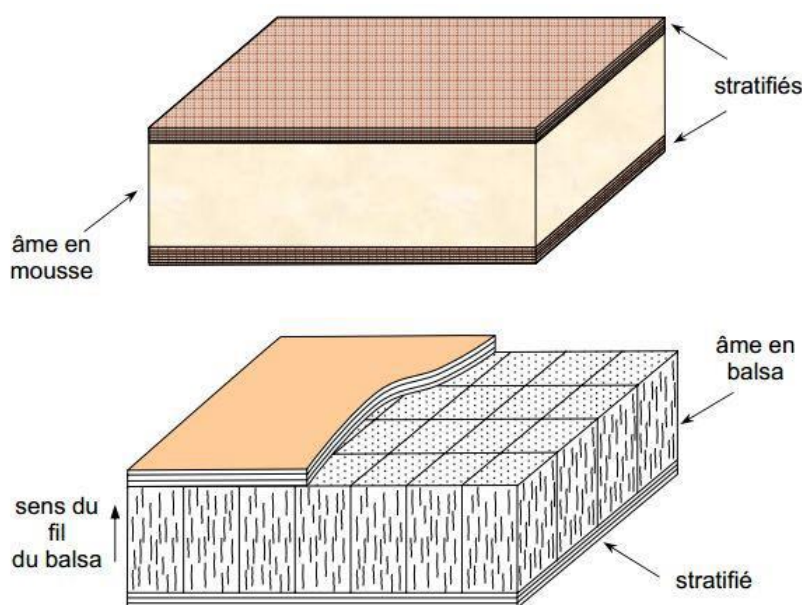


Figure 1.31 : Matériaux sandwichs à âmes pleines [9].

- Pour les âmes creuses (**figure 1.32**), essentiellement nid d'abeilles et profilés :
 - Des alliages métalliques légers.
 - Du papier kraft (enduit ou non de résine).
 - Du papier polyamide, type papier Nomex.

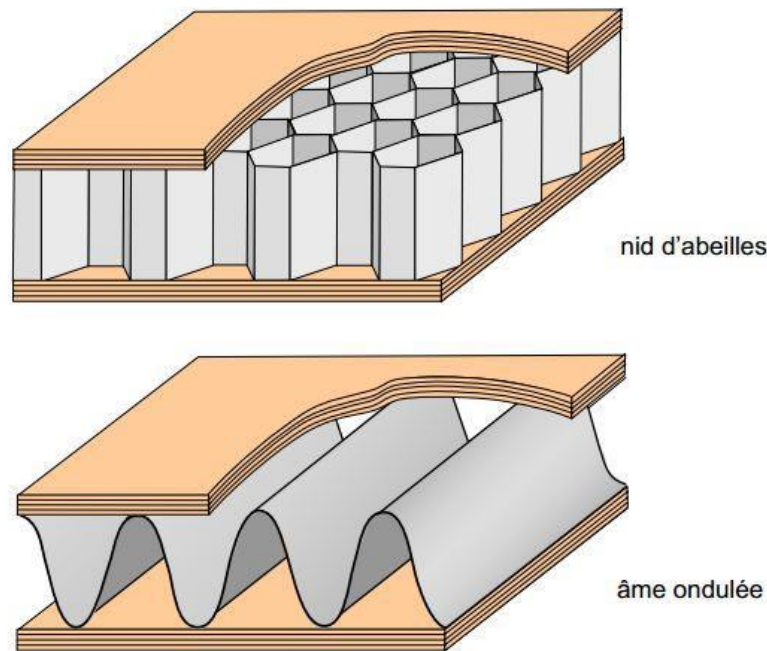


Figure 1.32 : Matériaux sandwiches à âmes creuses [5].

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 [5].

1.6.2.3 Autres architectures :

1.6.2.3.1 Plastiques renforcés :

Ces matériaux sont constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts de type :

- fibres courtes,
- billes pleines ou billes creuses,
- poudres : métalliques, de graphite.

Les renforts permettent généralement d'augmenter le module d'élasticité d'un facteur 2 à 5. Le comportement mécanique de ces matériaux peut être homogénéisé, et son étude est ramenée à celle d'un matériau usuel isotrope [4].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.6.2.3.2 Composites volumiques :

Les composites volumiques ont été introduits pour des besoins spécifiques de l'aéronautique. Ils sont élaborés à partir de tissages volumiques. Ces matériaux sont très onéreux. Outre des intérêts spécifiques, ils permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques très élevées, avec un comportement sensiblement isotrope en volume [4].

1.7 Avantages et inconvénients des composites

1.7.1 Avantages

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

1.7.2 Inconvénients

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.

- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place.
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de La plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage Ou les autres procédés sont très couteux et fournissent une matière de faible qualité.

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [8].

1.8 Conclusion :

Ce chapitre présente une analyse bibliographique réalisée dans le but de se familiariser avec les matériaux composites et les différentes structures. L'objectif est de constituer une base de connaissances qui pourra être utilisée par la suite pour le choix des différents matériaux nécessaires à la réalisation d'un matériau composite à base de constituants naturels. Tout d'abord, les notions et définitions principales relatives aux matériaux composites sont définies, ainsi que les différents éléments qui les composent. En plus des différentes matrices.

Une revue de la littérature concernant spécifiquement les renforts et les matrices est proposée. Les principales fibres sont détaillées surtout les fibres végétales, de ce fait, de récentes recherches sont en cours dans le but d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par ces fibres végétales, quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude de fibres végétales (fibre de palmier, Alfa, Abaca, Chanvre et Coton...), la valorisation de ces fibres dans les domaines pratiques n'est pas encore généralisée.

Cette valorisation est de nature à soutenir les secteurs industriels régionaux, et par la même à leur donner plus d'autonomie pour s'adapter intelligemment aux besoins locaux, en valorisant leurs propres ressources. La démarche que nous avons suivie s'inscrit dans la valorisation des fibres pour améliorer l'adaptation des produits existants aux conditions locales. Par la suite, les procédés de mise en oeuvre des matériaux composites les plus couramment utilisés sont présentés, ainsi que de nombreux types et architectures de renforts sont décrits.

La présente description nous permettra de donner une idée générale sur les matériaux composites et leurs procédés de mise en forme. Parmi ces procédés nous avons cité l'enroulement filamentaire qui fera l'objet de notre étude et sera donc traité plus en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

L'ENROULEMENT FILAMENTAIRE

2 L'ENROULEMENT FILAMENTAIRE

2.1 Introduction :

Parmi les processus de mise en œuvre des matériaux composites on s'intéresse à l'enroulement filamentaire. Ce type est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces (pièces creuse). Nous allons examiner de tous les types d'enroulement filamentaire utilise dans l'industrie moderne.

2.2 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 par Richard E. Young (**Figure 2.1**). 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).



Figure 2.1: Richard E. Young, le fondateur d'enroulement filamentaire [1].

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 le force 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.

Enfin, grâce aux innovations techniques, les ingénieurs ont pu concevoir des machines photo-optiques avec des systèmes hydrauliques. Pendant ce temps, la machine d'enroulement de filament est devenue de plus en plus sophistiquée dans la conception ; l'ajout d'un troisième axe de déplacement (ou chariot d'alimentation radial transversal), de rails profilés et d'arbres à billes associés à des réducteurs permet d'améliorer l'enroulement filamentaire lisse et plus précis. Au milieu des années 1970, les progrès de la technologie et l'introduction des servomoteurs entrèrent dans le domaine de la conception de ces machines, en utilisant des ordinateurs pour le traitement rapide des données, ce qui facilitait le déplacement et augmentait la précision de placement des fibres. De la technologie informatique. Les ordinateurs et les cartes de contrôle de mouvement sont devenus des éléments essentiels du matériel qui ont été inclus dans presque toutes les machines. Le contrôle de vitesse de la machine a été grandement amélioré, un certain nombre d'entreprises ont commencé à utiliser le développement de logiciels, et produisent des configurations plus complexes, telles que des arbres coniques, des pièces non-axisymétriques par enroulement filamentaire [1].

2.3 Enroulement filamentaire :

Le procédé d'enroulement filamentaire permet d'obtenir des pièces en matériau composite, par enroulement de fibres sur un mandrin. Il consiste à enrouler les fibres, par l'intermédiaire d'un guide-fil pour guidé les fibres.

Des fibres imprégnées de résine sur le mandrin (moule) et à faire polymériser la structure avec ou sans traitement thermique. Ce procédé permet de donner des pièces de très bonne caractéristique mécanique et chimiques mieux que les aciers pour certaine applications comme transport de pétrole et l'eau.

Le système de guidage de la nappe se déplace le long du mandrin par un mouvement de va-et-vient. Le réglage de cette vitesse de déplacement par rapport à la vitesse de rotation du mandrin permettra d'obtenir soit un [2].

- ✓ Enroulement circonférentiel (mèches déposées perpendiculairement à l'axe du mandrin).
- ✓ Enroulement hélicoïdal.

Le système de guidage de la nappe peut lui-même être animé d'un mouvement de rotation autour du mandrin pour obtenir :

- ✓ Enroulement satellite :

Le choix est basé sur la forme de la pièce et les orientations de renforcement nécessaires.

2.3.1 Enroulement hélicoïdal :

2.3.1.1 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... [2].

La **Figure 2.2** illustre le principe du modèle d'enroulement hélicoïdal.

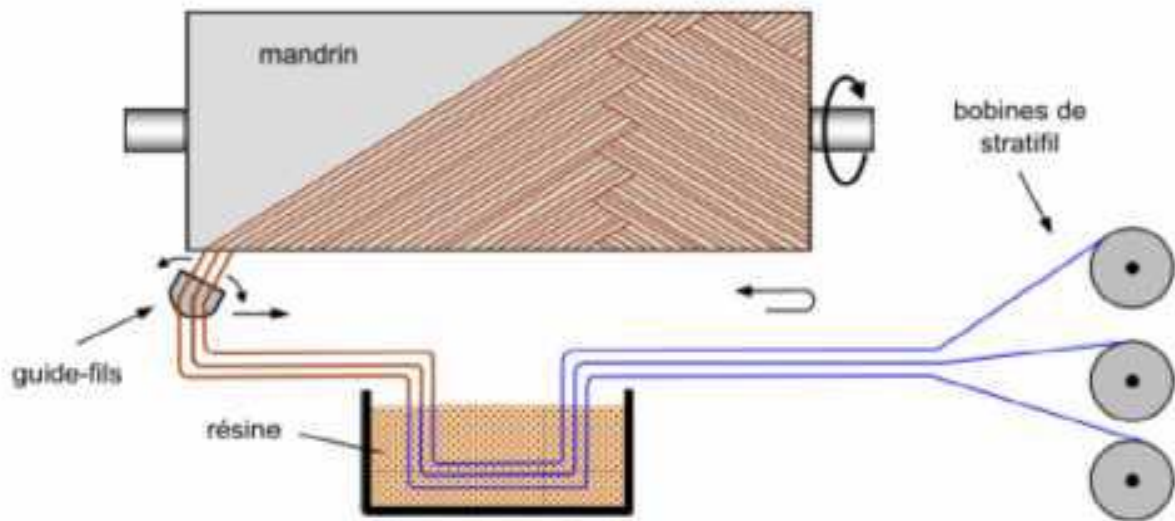


Figure 2.2 : Principe d'enroulement hélicoïdal [2].

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs. La Figure 2.3 montre ce type d'enroulement :

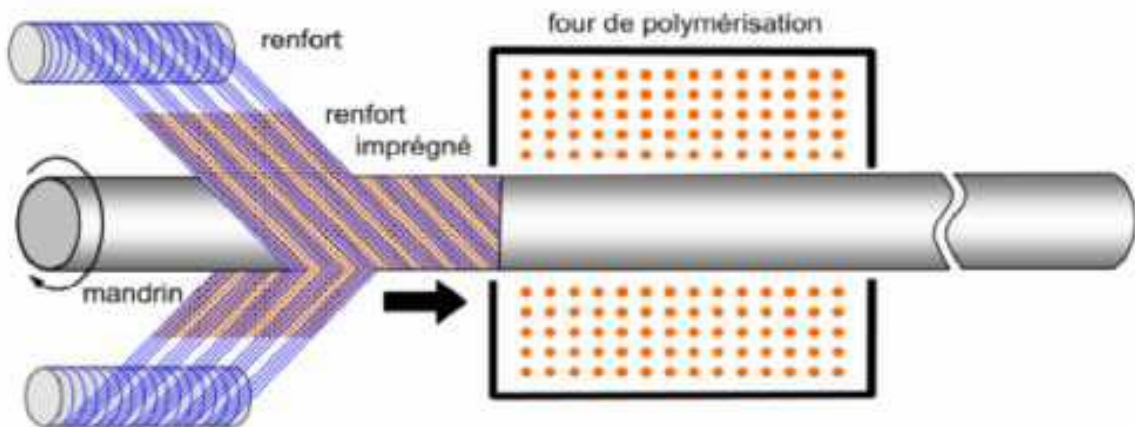


Figure 2.3 : Enroulement hélicoïdal continu [2].

L'enroulement hélicoïdal est utile pour l'enroulement des fibres avec des orientations d'angle entre 5° et 80° par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la Figure 2.4.

Avec ce mode d'enroulement il est possible de couvrir des surfaces cylindriques ou coniques, mais il est difficile de couvrir les extrémités. Par exemple des dômes de réservoirs [2].

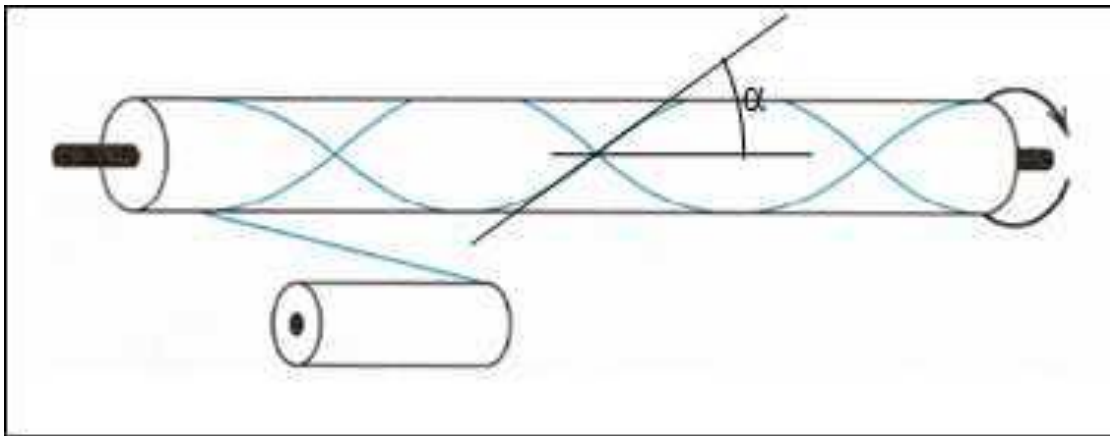


Figure 2.4 : enroulement hélicoïdal [2].

2.3.2 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 [2].

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé. La Figure 2.5 illustre le principe de l'enroulement circonférentiel.

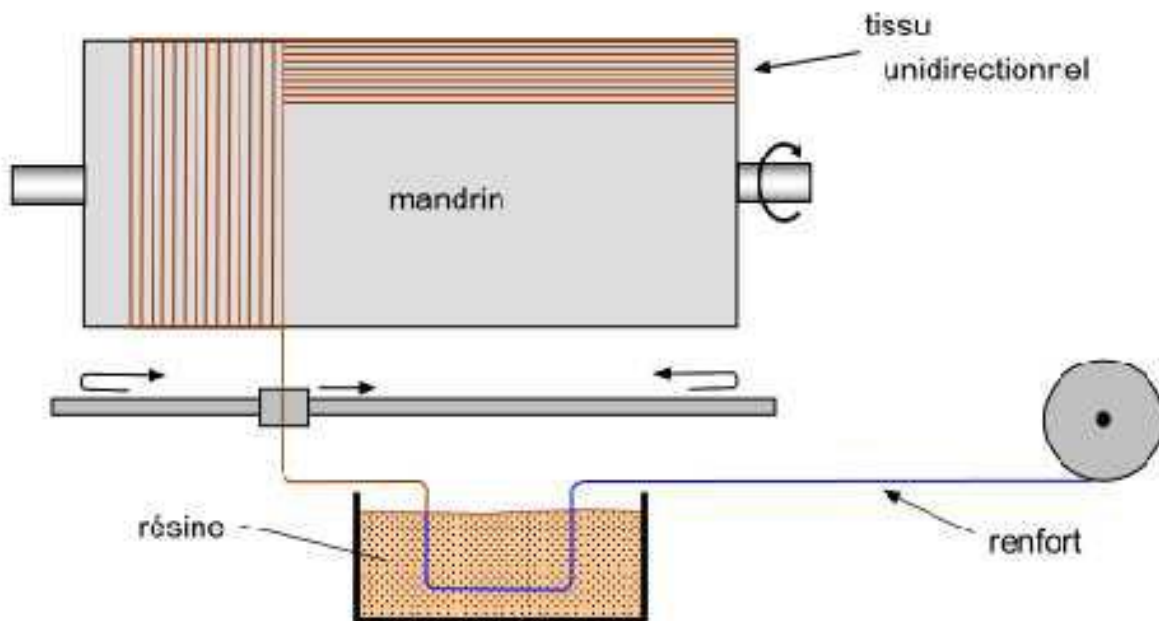


Figure 2.5 : Principe d'enroulement circonférentiel [2].

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 2.6**.

L'enroulement circonférentiel il confère une résistance tangentielle élevée [2].

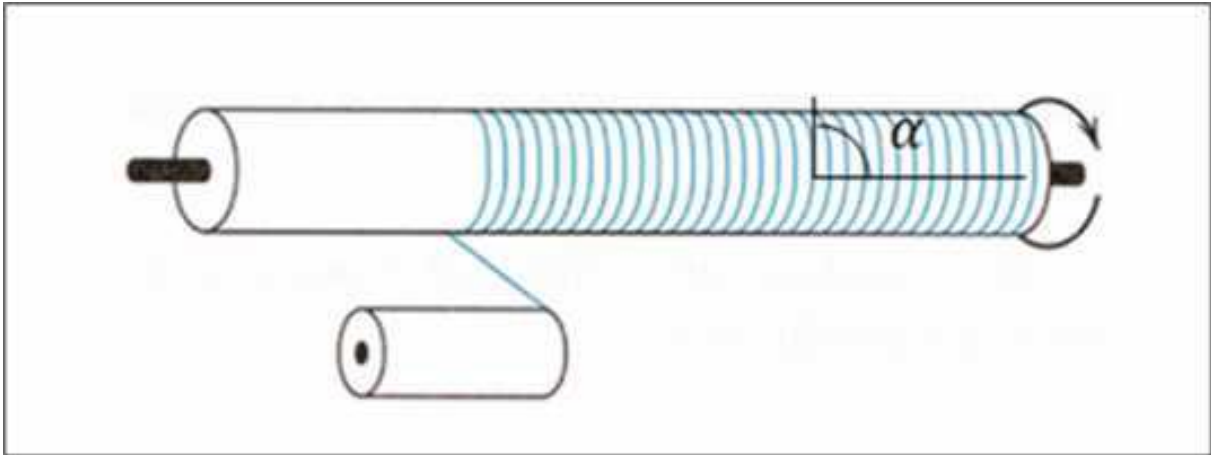


Figure 2.6: Enroulement circonférentielle [2].

2.3.3 Enroulement Polaire :

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

Ce type d'architecture est utilisé pour des orientations des fibres inférieure à 5° par rapport à l'axe longitudinal de la pièce. Avec ce type d'enroulement, il est possible de couvrir la totalité de la surface d'une pièce [3].

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc... [2].

La **Figure 2.7** illustre le principe d'enroulement polaire.

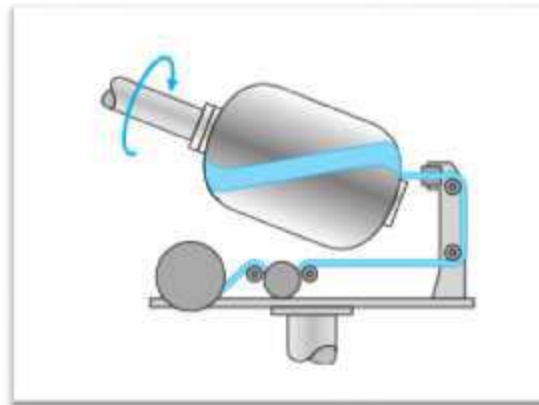


Figure 2.7 : Principe d'enroulement polaire [2].

Dans l'enroulement polaire, la fibre passe tangentielle à l'ouverture polaire à une proximité ou autour des pôles de mandrin, change de direction, et passe tangentielle 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 2.8** [3].

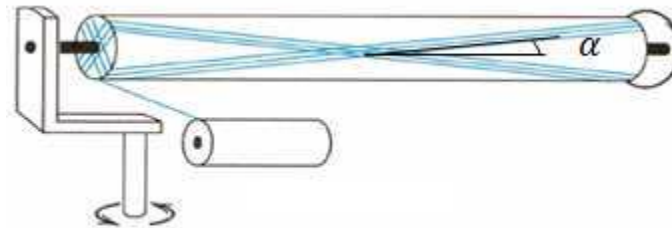


Figure 2.8 : Enroulement polaire [3].

2.4 Matériels :

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

- propriétés mécaniques de la fibre de base ;
- quantité de fibres dans le composite (fraction volumique de fibres) ;
- orientation des fibres dans le composite ;

– interaction de la surface de la fibre et de la résine (en fonction du degré de liaison entre les deux).

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

Le choix de dimensionnement dépend des performances souhaitées du composite, du type de fibre et de la façon dont les fibres vont être traitées. La quantité de fibres dans un composite détermine la résistance et la rigidité. En règle générale, la résistance et la rigidité d'un stratifié augmentent proportionnellement à la quantité de fibres. Cependant, au-dessus de 60 à 70% de fraction volumique de fibres, la rigidité à la traction augmente encore, alors que la force de stratifié atteint un pic et diminue lentement. Dans cette situation, la résine est trop peu présente et ne peut tenir suffisamment les fibres entre elles.

L'orientation des fibres dans un composite contribue grandement à la résistance globale.

Les fibres de renforcement sont conçues pour être chargées sur toute leur longueur, ce qui signifie que les propriétés du composite sont hautement spécifiques de direction. En plaçant les fibres dans les directions de sollicitation, la quantité de matériau mis dans des directions où il ya peu ou pas de charge peut être réduite au minimum.

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 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'aéronefs, 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 déforme.

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 [2].

2.5 Mandrins :

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage. Ils peuvent être [2] :

- 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.

2.6 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 [2].

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.

2.7 Applications :

On utilise les fibres de carbone dans le procédé d'enroulement filamentaire pour fabriquer

- 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 [5].

2.8 Avantages et inconvénients :

2.8.1 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.
- ✓ Pièce à haute résistance mécanique en termes de la résistance et de la rigidité et à haut taux de renforcement.
- ✓ Très grande latitude dimensionnelle.
- ✓ Part de la main d'œuvre réduite.
- ✓ Cadences de production élevées [5].

2.8.2 Inconvénients :

- ✓ Investissements relativement élevés.
- ✓ 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.
- ✓ Une seule face lisse [5].

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu l'historique de l'enroulement filamentaire et les différents types qui existent dans l'industrie moderne, procédé qui existe depuis 1950. On trouve leurs applications dans différents domaines : génie chimique, marine, aéronautique, mécanique etc....

CHAPITRE 3
MACHINE D'ENROULEMEENT
FILAMENTAIRE

3 Machine d'enroulement filamenteuse

3.1 Introduction

Début des années 1960, on a vu naître les premières bobineuses commerciales. Ces machines étaient encombrantes, l'équipement mécanique exigeait des changements de vitesse et des courroies / chaînes pour modifier l'angle du vent ou la longueur du vent et étaient principalement utilisées pour les tubes. Des machines spéciales ont été développées pour les récipients sous pression, y compris les enrouleurs «tumble» et polaires (sphériques).

Fin des années 1970, arrivent les premières machines à bobiner commandées par ordinateur. Pas très fiables et difficiles à programmer, les méthodes de programmation étaient un mélange de calcul, d'essais et d'erreurs et d'apprentissage.

Enfin, début des années 1980, les premières bobineuses à commande numérique font leur apparition. La technologie de contrôle se développait rapidement à partir d'entreprises comme Bosch, Fanuc, NUM & Siemens. Ces systèmes de contrôle étaient axés sur la coupe du métal (fraisage et tournage), mais leur utilisation générale pouvait être utilisée pour l'enroulement filamenteuse. La nécessité d'améliorer les méthodes de programmation pour tirer parti de la nouvelle technologie était évidente [25].

3.2 Les différents types de la machine

Les machines à bobiner les plus simples ont deux axes de mouvement, la rotation du mandrin et la course du chariot (généralement horizontale). Les machines à deux axes sont les mieux adaptées à la fabrication de tubes uniquement. Pour les récipients sous pression tels que les récipients GPL ou GNC (par exemple) comme démontre la **figure 3.1**, il est normal d'avoir une bobineuse à quatre axes. Une machine à quatre axes a en outre un axe radial (d'alimentation croisée) perpendiculaire à la course du chariot et une tête de distribution de fibre rotative montée sur l'axe d'alimentation transversale. La rotation de la tête de paiement peut être utilisée pour arrêter la torsion de la bande de fibres et ainsi varier en largeur pendant l'enroulement.

Les machines à plus de quatre axes peuvent être utilisées pour des applications avancées, les machines à bobiner à six axes ont généralement 3 axes linéaires et 3 axes de rotation. Les machines avec plus de 2 axes de mouvement ont un contrôle par ordinateur / CNC, mais de nos jours les nouvelles machines à 2 axes ont pour la plupart un contrôle numérique. Les machines d'enroulement à filament contrôlées par ordinateur nécessitent l'utilisation d'un logiciel pour générer les motifs d'enroulement et les trajectoires des machines, un tel logiciel peut normalement être fourni par des fabricants de bobineuses à filament ou en utilisant des produits indépendants tels que Cadfil. Le logiciel Cadfil peut être configuré pour n'importe quelle machine d'enroulement de filament commandée par ordinateur et également pour des robots à 6 axes d'usage général avec des adaptations mineures pour l'enroulement de filament [25].

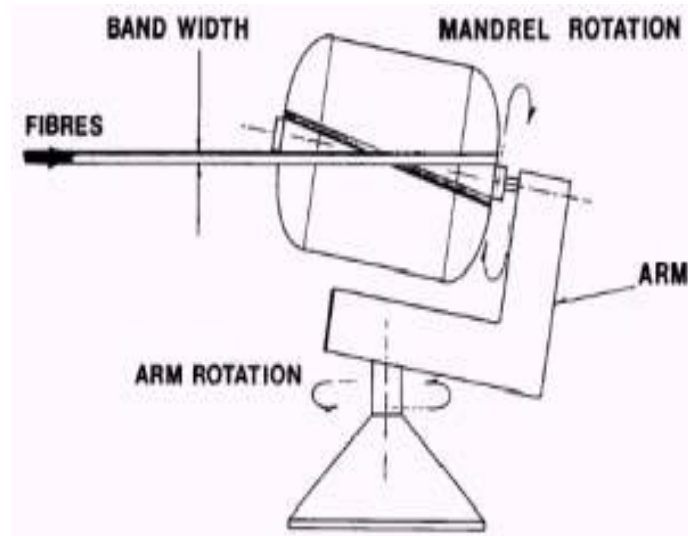


Figure 3.1 : machine des enroulements filamentaire à deux axes (polaire) [26].

Dans ce chapitre, on va présenter dans un premier temps la machine d'enroulement filamentaire que nous avons utilisée pour élaborer nos échantillons qui sont sous forme de tubes.

On a conçu ces tubes dans le but de faire une caractérisation, pour cela nous avons confectionnée 17 catégories de tubes, avec des fibres différentes enroulées sous différents angles.

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

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

3.3 Présentation de la machine

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

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

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

3.3.1 Chaîne cinématique de la machine

La documentation concernant la machine d'enroulement filamentaire fournit la sous-chaîne cinématique illustrée par la **Figure 3.2** On y trouve deux systèmes :

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

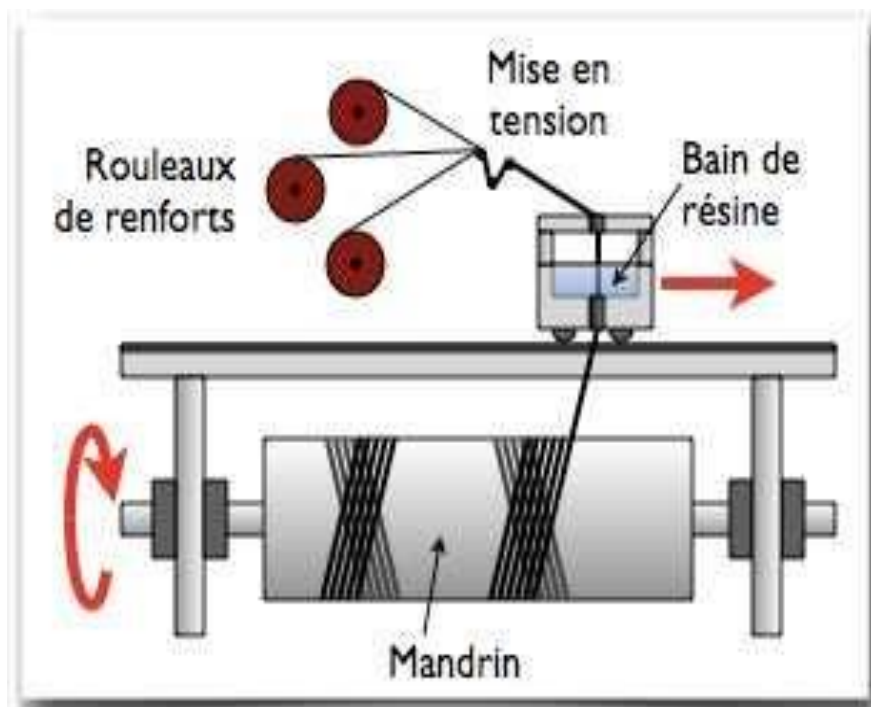


Figure 3.2 : Sous-chaîne cinématique [23].

Dans la littérature, on ne trouve pas la chaîne cinématique complète de la machine filamentaire, c'est-à-dire, les éléments qui la composent (moteurs, éléments de transmission de puissance ; etc...). Nous proposons alors la chaîne cinématique présentée dans la **figure 3.3**

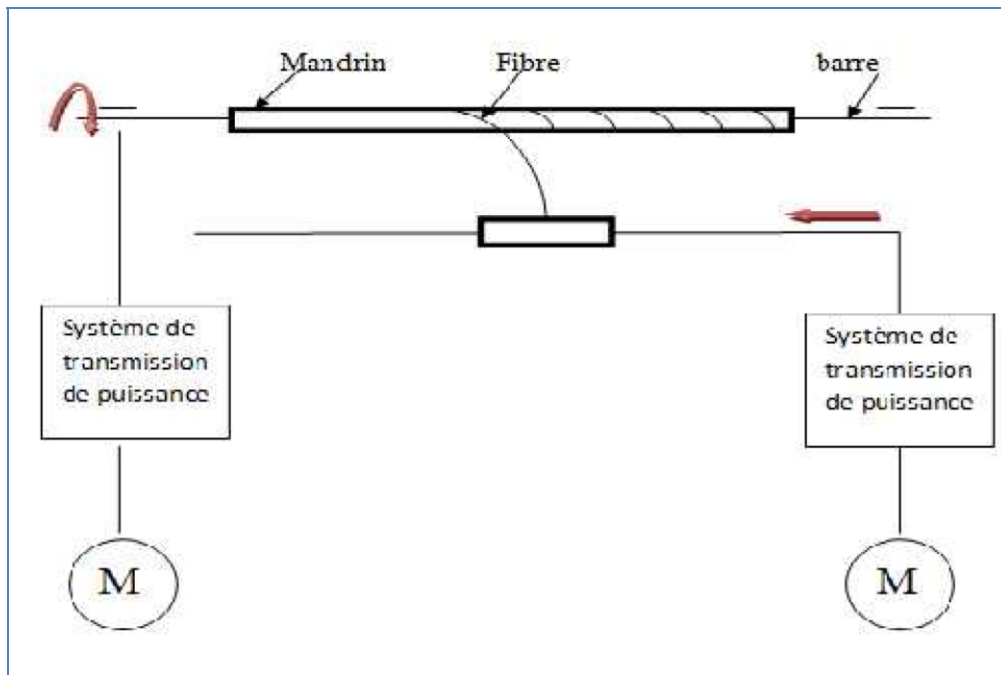


Figure 3.3 : Chaîne cinématique proposée [4].

3.3.2 Schéma descriptif de la machine :

La figure 3.4 illustre une description du système :

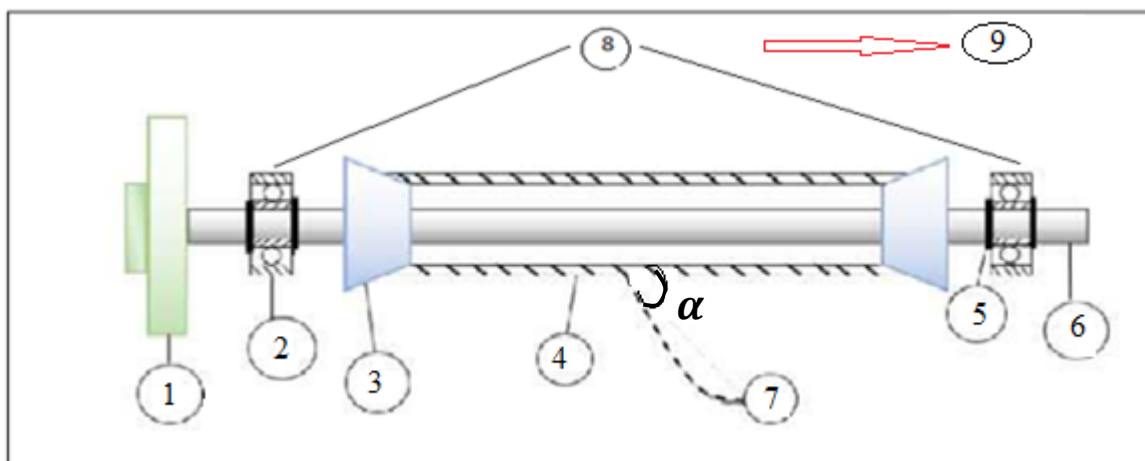


Figure 3.4 : schéma descriptif de la machine [24].

Légende :

- | | | |
|------------------------------------|--|-----------------------|
| 1 : Roue d'engrenage | 2 : Roulement à billes | 3 : Outil de fixation |
| 4 : Cylindre d'enroulement (moule) | 5 : Circlips | 6 : Barre |
| 7 : fil | | |
| 8 : deux capteurs | 9 : le sens du mouvement du bain de résine | |

III.3.3. Les différentes parties mécaniques de la machine :

Les figures 3.5, 3.8 présentent les différentes parties mécaniques de la machine

à l'aide du logiciel SolidWorks :

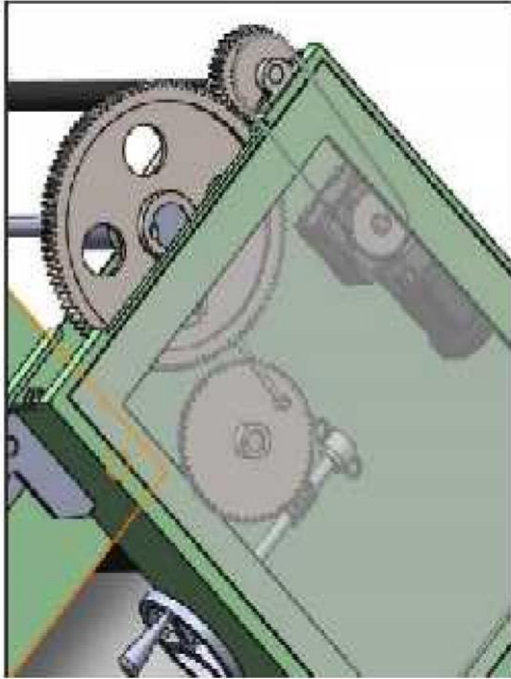


Figure 3.5: Mécanisme de rotation [24].

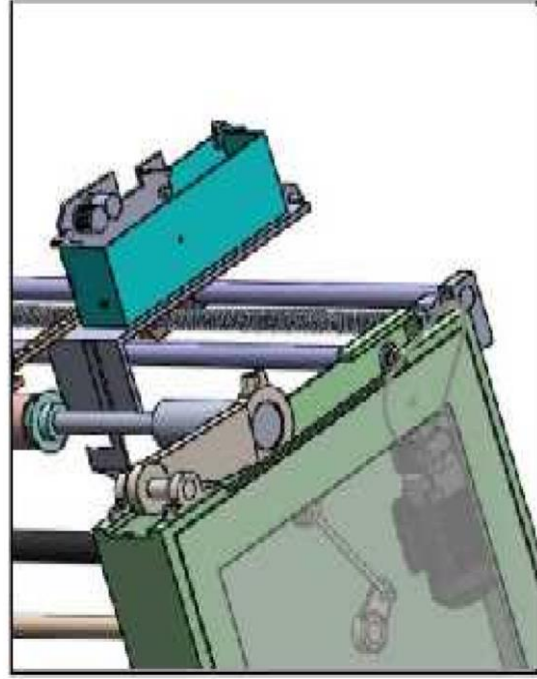


Figure 3.6: Mécanisme de translation [24].

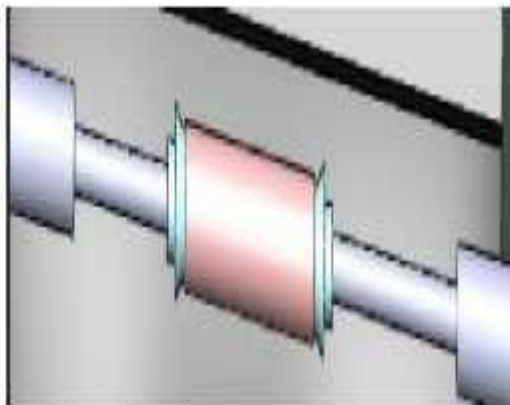


Figure 3.7: Le mandrin avec le moule [24]

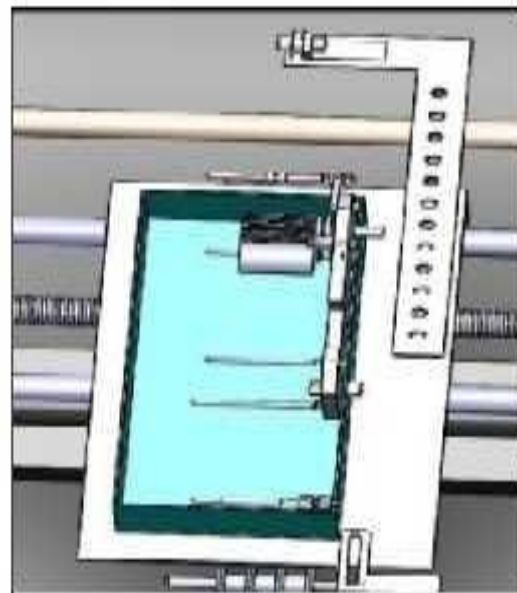


Figure 3.8: Bain de résine [24].

La **figure 3.9** représente l'assemblage de la machine :

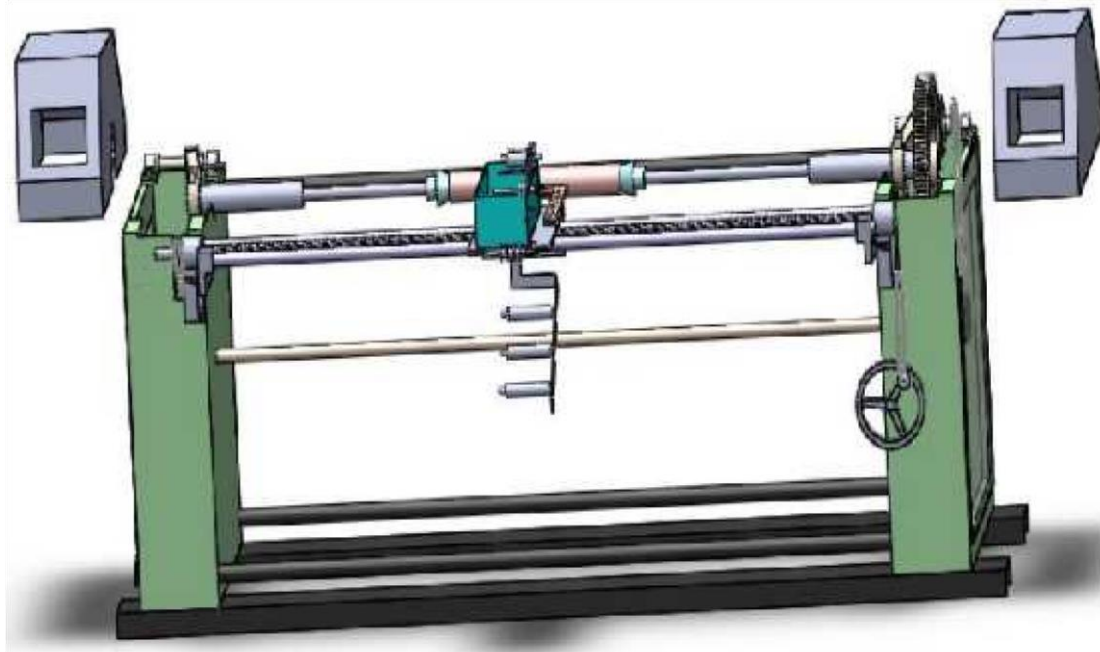


Figure 3.9 : Assemblage de la machine avec « SolidWorks » [24].

3.3.4. Fonctionnement de la machine :

Avant de démarrer la machine il faut :

- Mettre la machine sous tension.
- Vérifier l'état des capteurs et leurs emplacements.
- Placer le moule dans le mandrin.
- Placer les bobines de la fibre à leur emplacement.
- Faire des tests on mode manuel afin de 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 [24].

Remarque :

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

3.3.5. Angle d'enroulement :

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

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

- **Enroulement hélicoïdal** : l'angle est entre 5° 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 filamentaire utilisée la vitesse de rotation du mandrin et la vitesse de rotation de la vis varie en fonction des fréquences entrées pour obtenir la vitesse qui correspond à l'angle choisi. Pour que l'angle soit variable on utilise des variateurs de fréquence placé avant les moteurs :

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

3.3.5. Relation entre les différents paramètres (angle, vitesse de rotation du mandrin, vitesse de rotation de la vis) :

La variation de l'angle d'enroulement dépend de la vitesse de rotation de la vis et du mandrin, et la **figure 3.10** illustre les différents paramètres qui influencent sur la valeur de l'angle d'enroulement α .

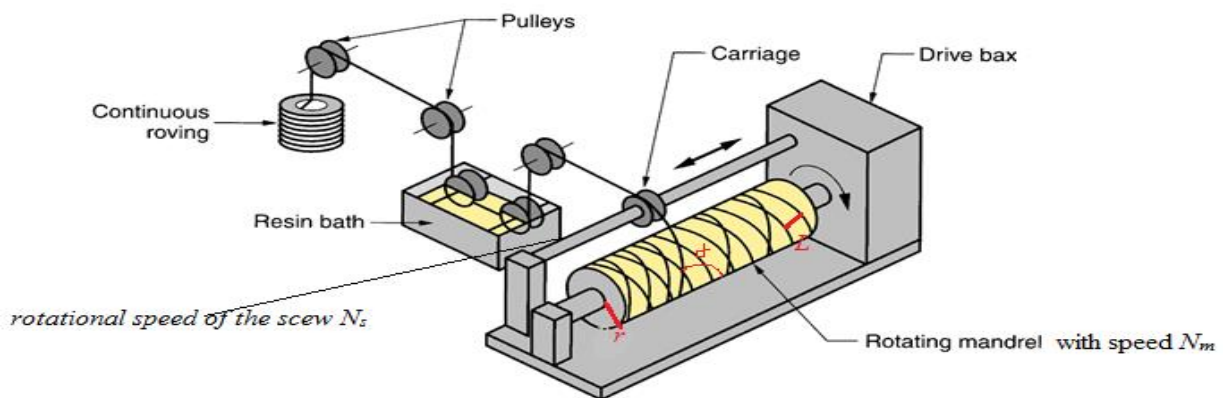


Figure 3.10 : schéma descriptif sur les différents paramètres qui influent sur l'angle d'enroulement [27].

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

Tel que :

N_s : vitesse de rotation de la vis ;

N_m : vitesse de rotation du mandrin ;

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 inconnues :

- 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 : $L = 6$ mm/tr

La fixation de ces paramètres dépend du constructeur.

3.4 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 filamentaire dépend de la vitesse de rotation du mandrin, ainsi que de la vitesse de rotation de la vis.

CHAPITRE 4
ELABORATION ET
CARACTERISATION DES TUBES

4. Elaboration et caractérisation des tubes

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode d'élaboration de tubes en composites, (résine + fibres), réalisés par le procédé d'enroulement filamentaire qui est une méthode bien adaptée aux pièces cylindriques (pipe) et sphériques.

Pour la réalisation des tubes nous avons utilisé trois types de renfort : fibres de jute, fibres de cuivre et fibres de verre.

Nous avons confectionné 13 catégories de tubes de même diamètre interne $DN = 91\text{mm}$. Ces tubes se composent de 4 couches de fibres, préalablement imbibées de résine, enroulées sous différents angles α (50° , 55° , 60° , 65° , 75° , 90°).

Les tubes ainsi réalisés sont traités thermiquement afin d'accélérer le durcissement de la résine, puis caractérisés mécaniquement.

Ce travail s'inscrit dans la continuité du projet de fin d'études de M. IDIR et I. ZEMOURI [7], qui ont, pour leur part, travaillé avec la même résine et les mêmes angles d'enroulement mais avec que des fibres de jute, sans aucun post-traitement thermique.

4.2. Caractéristiques de la résine et des renforts

Les tubes sont constitués de fibres de Jute, de fibres de cuivre ou de fibres de verre et de résine thermodurcissable.

4.2.1. Caractéristiques de la matrice en résine

La résine G35 utilisée (fiche technique en Annexe 1) est commercialisée sous le nom « LORN » et est à base de résine époxy et d'un durcisseur spécifique, le **Tableau 4.1** en présente quelques caractéristiques physiques.

Tableau 4.1 : Caractéristiques de la résine [7].

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%

A partir de cette résine, nous avons élaboré des éprouvettes, selon la norme ISO 527, afin d'en déterminer les caractéristiques mécaniques. Les essais de traction sont effectués sur une machine Zwick/Roel de capacité 10 KN, dotée d'un extensomètre de haute résolution.

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

La **Figure 4.1** présente les courbes de 3 essais de traction réalisés sur cette résine, et dont les caractéristiques mécaniques (module d'Young et contrainte maximale) sont présentées dans le **Tableau 4.2**

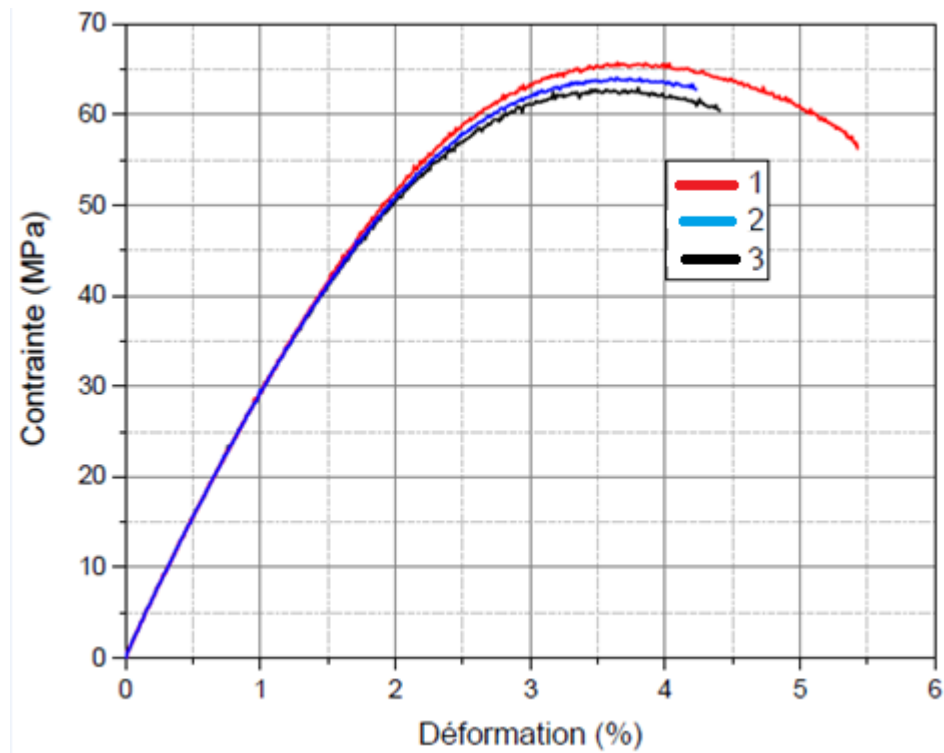


Figure 4.1 : Comportement de la résine G 35 en traction [24].

Tableau 4.2 : Caractéristiques mécaniques de la résine [24].

Paramètre	Module de Young (GPa)	Contrainte max (MPa)
Essai 01	2.84	65.67
Essai 02	2.85	63.87
Essai 03	2.84	62.97

4.2.2. Caractéristiques du renfort

Le **Tableau 4.3** présente quelques caractéristiques des fibres de jute et de verre utilisées comme renforts.

Tableau 4.3 : Caractéristiques des fibres de jute et de verre [24].

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

Renfort	Jute	Verre	Cuivre
Densité à 23°C	1.44	2.54	8,96
Module de Young (GPa)	26.5	72-73	128

4.3. Élaboration des tubes

Pour réaliser les 13 tubes sur lesquels portera notre étude, nous avons eu à procéder à quelques préparatifs.

4.3.1. Préparation du mandrin

- Créer une entaille le long du mandrin afin d'agrandir le diamètre du tube en mettant un fil métallique de faible diamètre 1 mm le long de cette entaille. Cet agrandissement sert à faciliter l'extraction du tube après durcissement de la résine.
- Utilisation du papier abrasif pour polir le mandrin.
- Utilisation d'un démoulant en essuyant le mandrin pour éviter l'adhérence avec le tube.

4.3.2. Préparation de la résine

- Préparer un mélange de 35% durcisseur et 65% de la résine époxy (% pondéral).
- Homogénéiser le mélange manuellement.

La résine préparée sera versée dans un bac allant sur la machine à enroulement (**Figure 4.2**), afin que les fibres en soient imprégnées avant d'être enroulés, pour réaliser le tube.

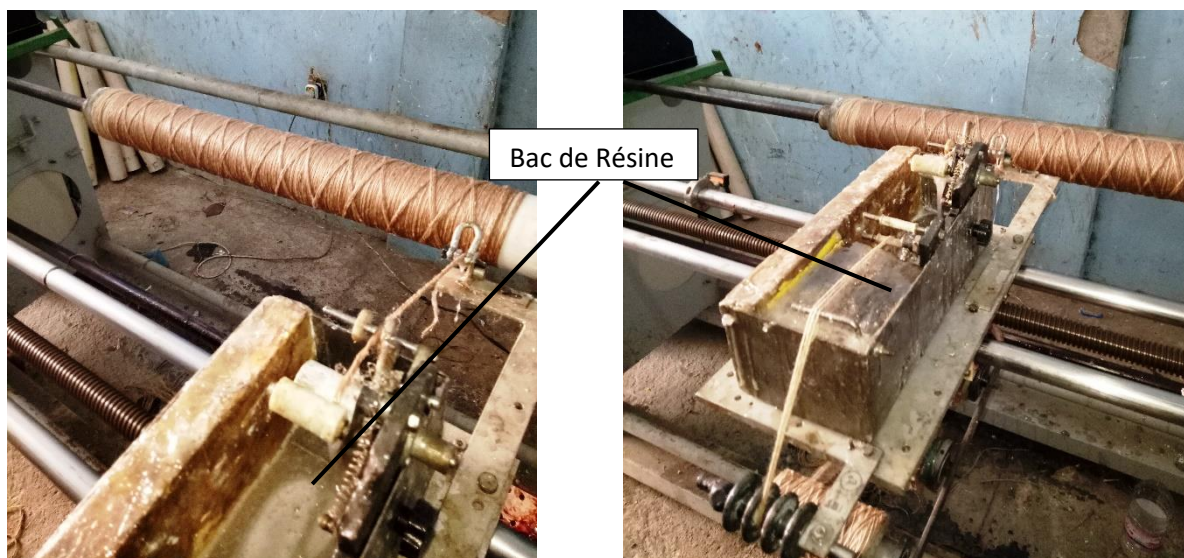


Figure 4.2 : Bac d'imprégnation [24].

4.3.3. Préparation des paramètres de la machine et choix l'angle d'enroulement

Après différents essais nous avons pu déterminer les fréquences adéquates du mandrin et de chariot pour chacun des angles choisis pour notre étude (**Tableau 4.4**). Ces fréquences sont par la suite réglées par nos soins avant le lancement automatique de la machine qui procèdera à l'enroulement des fibres.

Tableau 4.4 : Vitesse de rotation du mandrin et de chariot pour chaque angle α .

l'angle d'enroulement (α)	Vitesse de rotation du mandrin (trs/min)	Vitesse de translation de chariot (trs/min)
50°	43	73
55°	40	60
60°	56	60
65°	80	60
75°	50	50
90°	150	5.5

Ces deux paramètres définissent, en effet, l'angle d'enroulement α entre l'horizontal du tube et la direction du fil comme illustré sur la **Figure 4.3**

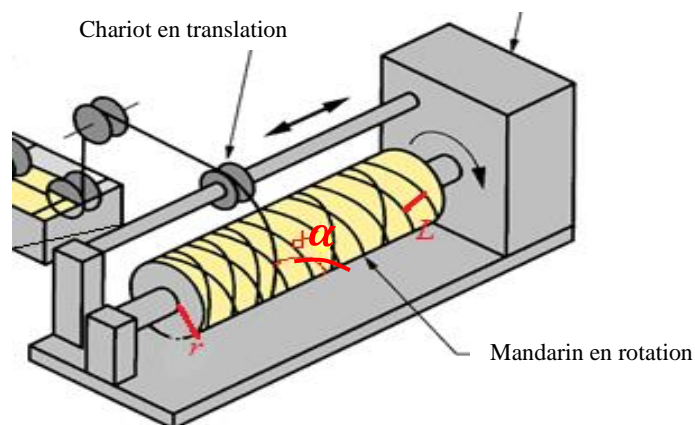


Figure 4.3 : L'angle d'enroulement α .

4.3.4. Réalisation des tubes

Pour réaliser nos tubes, il ne nous restait plus qu'à procéder comme suit :

- Remplir le réservoir avec de la résine mélangée
- Monté le fil sur les guide-fils et attacher le fil sur le mandrin.
- Lancer le mode automatique de la machine.

Les **Figures 4.4, 4.5 et 4.6** présentent respectivement les fibres passant dans le bain de résine, et la machine en état de marche fabriquant un tube, et un tube fini.

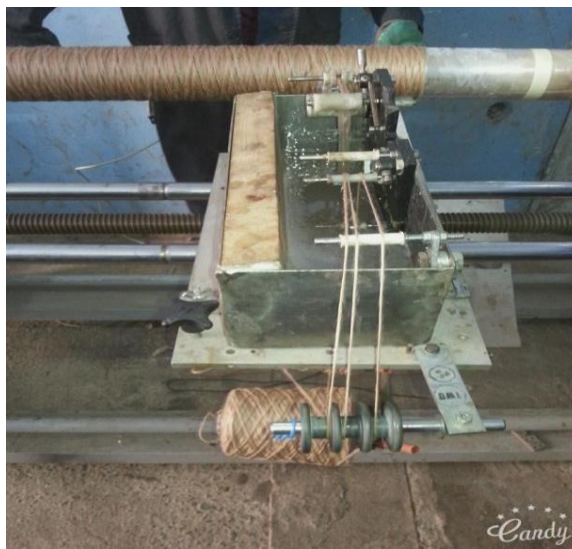


Figure 4.4 : Fibres passant dans le bain de résine [7].



Figure 4.5 : La machine en état de marche [7].



Figure 4.6 : Exemple d'un produit fini.

Les tubes confectionnés, comportant 4 couches de fibres imprégnées de résines, se présentent dans la structure d'empilement suivante (**Figure 4.7**) :

- la couche initiale et la couche de finition sont toujours en fibres naturels de jute, enroulées sous un angle de 90°
- la 2ème et la 3ème couche, entre la couche initiale et celle de finition, sont en fibres de jute (J), ou de verre (V), ou de cuivre (Cu), enroulés sous des différents angles, $\alpha = 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 90^\circ$.

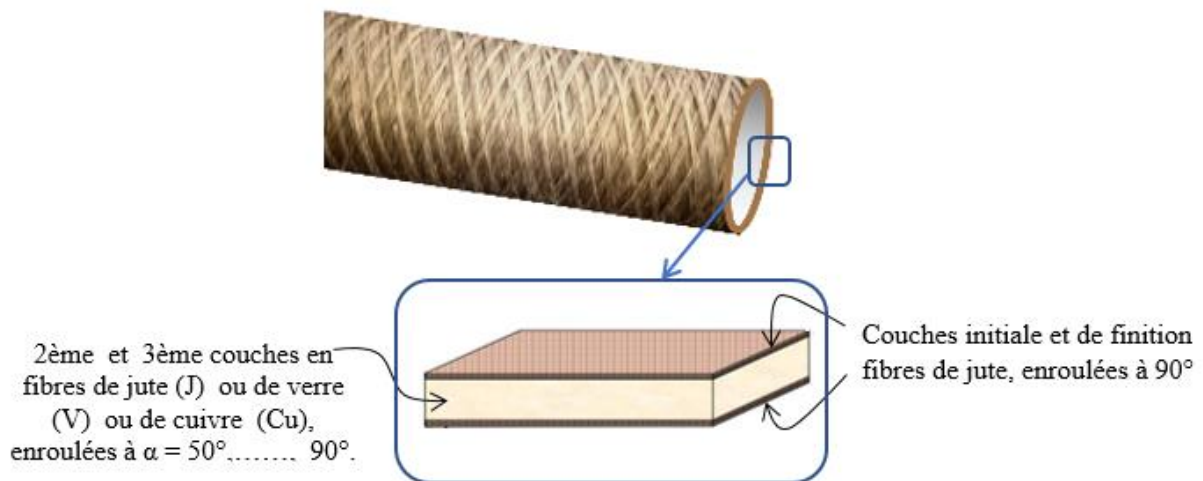


Figure 4.7 : L'empilement des couches d'un tube.

Le **Tableau 4.5** présente l'architecture des 13 catégories de tubes que nous avons réalisés, avec différentes fibres, sous différents angles α d'enroulement. Les tubes y sont notés de par le

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

type de fibres (J, V ou Cu) et l'angle α d'enroulement (50° , 55° , 60° , 65° , 75° , 90°), des 2^{ème} et 3^{ème} couches.

Tableau 4.5 : Architecture des différents tubes réalisés.

Angle A	Architecture : fibres de jute / fibres de cuivre / fibres de jute	Tube	Architecture : fibres de jute / fibres de verre / fibres de jute	Tube
50°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 50° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-50°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de verre à 50° + 1 couche de jute finition à 90°	V-50°
55°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 55° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-55°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de verre à 55° + 1 couche de jute finition à 90°	V-55°
60°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 60° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-60°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de verre à 60° + 1 couche de jute finition à 90°	V-60°
65°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 65° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-65°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de verre à 65° + 1 couche de jute finition à 90°	V-65°
75°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 75° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-75°	1 couche de jute primaire de 90° + 2 couches de verre de 75° + 1 couche de jute finition à 90°	V-75°
90°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de cuivre à 90° + 1 couche de jute finition à 90°	Cu-90°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de verre à 90° + 1 couche de jute finition à 90°	V-90°
Architecture : fibres de jute / fibres de jute / fibres de jute				
90°	1 couche de jute primaire à 90° + 2 couches de jute à 90° + 1 couche de jute finition à 90°			J-90°

4.3.5 Traitement thermique des tubes

Les tubes élaborés, laissés sécher et durcir à l'air, restaient malléables. Nous avons donc, pour activer le durcissement de la résine et obtenir un produit totalement fini, procédé à un traitement thermique à la température $T = 85^\circ\text{C}$ pendant $t = 48$ heures ; les paramètres T et t ont été arrêtés par essais et erreurs. Ce traitement thermique amène à une augmentation de la réticulation par la création de nouvelles liaisons covalentes au niveau de la résine, augmentant ainsi sa rigidité.

Nous avons effectivement constaté, manuellement, qu'au court des premières 24 heures les tubes restaient flexibles, mais au court des deuxièmes 24 heures le durcissement atteint sa valeur maximale, comme c'est schématisé dans la **Figure 4.8**.

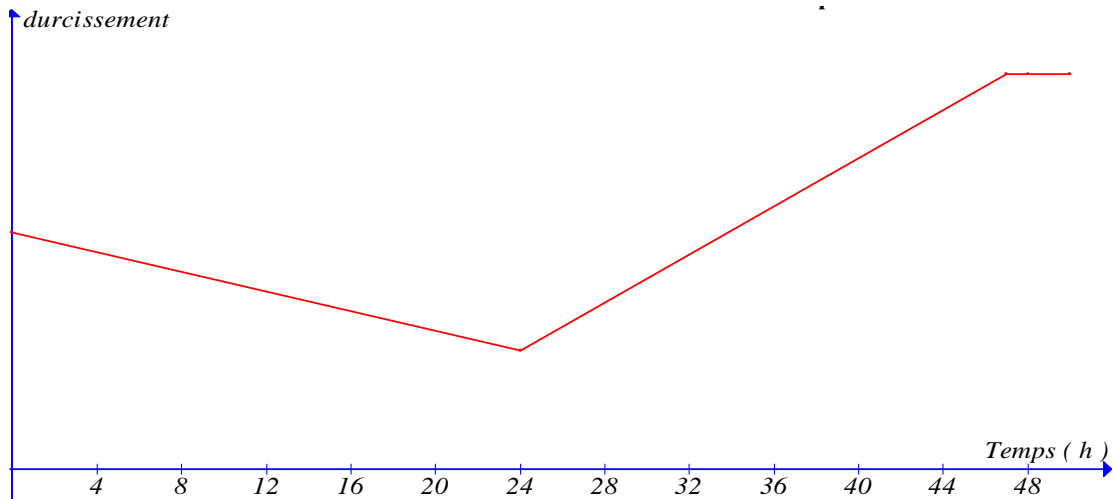


Figure 4.8 : Schéma du durcissement des tubes en fonction du temps.

En effet, les matières thermodurcissables, comme c'est le cas de notre résine, sont des réactifs dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Elles sont mises en forme et se réticulent selon la forme souhaitée.

La mise en œuvre, sous l'action de la chaleur, correspond à la création de nouvelles réticulations. Cette transformation chimique est irréversible ; les nouvelles liaisons sont covalentes et il faut, pour les détruire, des énergies très importantes. Au cours de la mise en œuvre, les produits de base qui étaient liquides deviennent solides, les résines solides qui étaient fusibles et solubles deviennent infusibles et insolubles [32].

4.4 Les essais mécaniques

Nous avons fait trois types de tests mécaniques dans le laboratoire du MEGHREB PIPE (zone Industrielle de m'silla) la seule usine en Algérie qui a fabriqué des tuyaux en utilisant la méthode d'enroulement filamentaire. Les trois essais sont :

- Essai de rigidité " compression circonférentielle "
- Essai de traction circonférentielle
- Essai de traction axiale.

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

Malheureusement pour le dernier essai, de traction axiale, bien que nous ayons fait les tests sur 3 échantillons différents pour chaque tube, toutes les courbes obtenues restent instables voire aberrantes, donc impossible à dépouiller et tout aussi impossible à interpréter.

4.4.1 Essai de rigidité " compression circonférentielle "

Cette méthode d'essai consiste à déterminer les caractéristiques des tuyaux sous l'effet du chargement de plaques parallèles. Cette méthode d'essai se déroule conformément aux normes EN 1228 et ASTM D2412, en utilisant une machine de test de flexion annulaire STM YL-28, dotée d'une cellule de charge de 65KN (**Figure IV.9**).

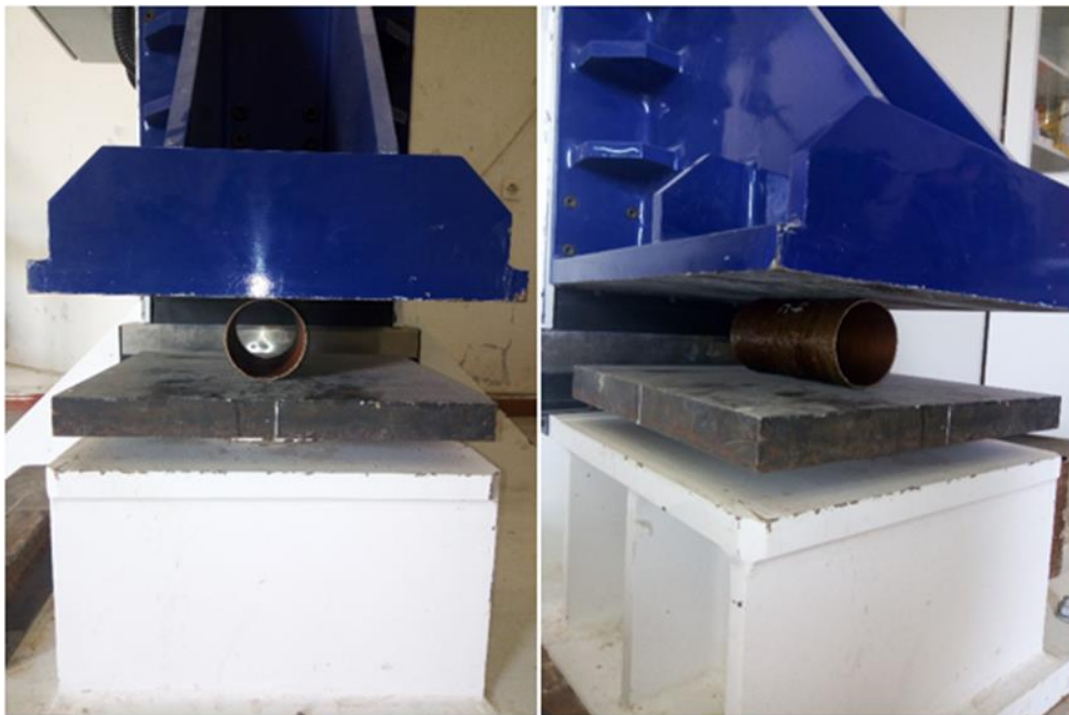


Figure 4.9 : Machine et dispositif de test de compression (rigidité).

Les caractéristiques déterminées par cette méthode d'essai sont :

La rigidité spécifique de la conduite, S

La charge spécifique de flexions circonférentielle, F

Le module d'élasticité en flexion circonférentielle, E_{cc}

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

L'éprouvette façonnée d'une courte longueur de tuyau (du diamètre du tuyau) est chargée entre deux plaques parallèles à une vitesse contrôlée. Les données charge-déflexion sont obtenues et enregistrées. La rigidité spécifique de la conduite est donnée par :

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

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

et :

- $y = D \cdot d / 100$ ($d = 5\%$ déflexion maximale admissible à long terme) " en mm ".
- $D =$ diamètre moyen ($D = 91$ mm)
- $F =$ la force correspondante à la déflexion maximale y " en N ".
- $L =$ longueur de l'éprouvette " $L = 200$ mm ".
- $t =$ Epaisseur de l'éprouvette " en mm ".

Le Module d'élasticité en compression circonférentielle E_{cc} , est donné par :

$$E_{cc} = SD^3 / I \text{ (en N/m}^2\text{)} \quad \text{avec } I = t^3 / 12$$

La **Figure IV.10** présente une courbe force-déflexion telle qu'obtenue.

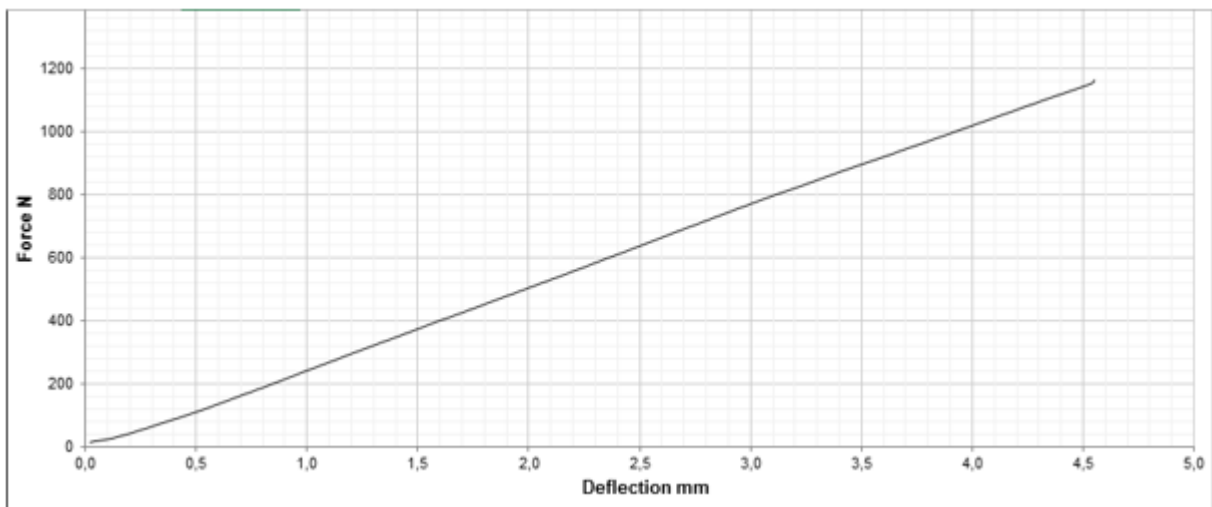


Figure 4.10 : Courbe force-déflexion.

Et d'après la fiche technique d'essai de compression présentée en Annexe 2 on détermine la valeur du module de compression circonférentielle EHF (Elastic Hoop Flexural modulus).

4.4.2 Essai de traction circonférentielle

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

L'essai de traction circonférentielle se déroule en accordance avec les spécifications de la norme EN 1394 et la norme ASTM D2290, en utilisant un accessoire de test Split disque

“Deux demi-disques” (**Figure 4.11**), pouvant accueillir différents diamètres de tuyaux. La machine d'essai est d'un type capable de produire la séparation progressive des deux demi-disques, comprenant les composants suivants :

- une partie fixe;
- une partie mobile ;
- un mécanisme d'entraînement, capable de communiquer une vitesse constante à la partie mobile, tel que la rupture soit atteinte entre 1 et 3 min (2.5 mm/min);
- un indicateur de charge permettant le mesurage de la force appliquée.



Figure 4. 11 : Dispositif de test “Split disk” et éprouvette

La résistance de traction circonférentielle apparente σ est calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\sigma_{tc} = F_{\max}/(2*t*b)$$

où :

F_{max} est la force ultime, exprimée en Newtons ;

b : est la largeur moyenne de l'éprouvette, exprimée en millimètres ;

t : est l'épaisseur de l'éprouvette, exprimée en millimètres.

CHAPITRE 4 : ELABORATION ET CARACTERISATION DES TUBES

Le module d'élasticité circonférentielle est calculé à partir de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation (**Figure 4.12**) :

$$E_{tc} = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

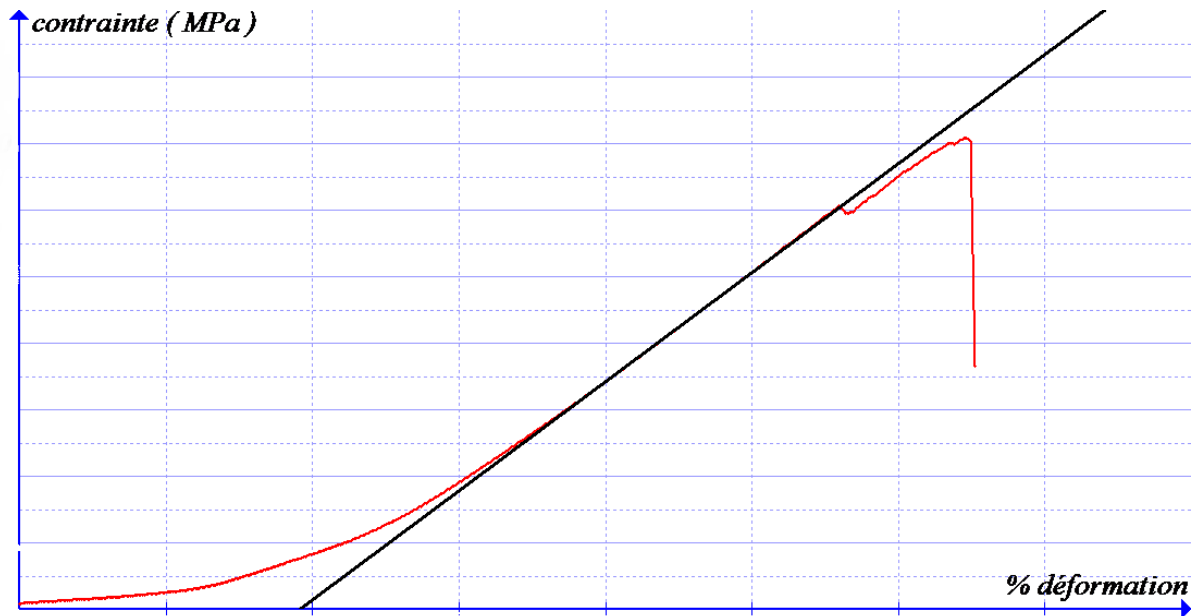


Figure 4.12 : L'allure générale de la courbe contrainte-déformation

CHAPITRE 5
RESULTATS ET DISCUSSION

5. Caractérisation des tubes

Après élaboration des tubes, avec différents types de fibres (jute, verre, cuivre), par le procédé d'enroulement filamentaire, nous avons déterminé leurs caractéristiques mécaniques, et fait une comparaison avec les résultats obtenus dans le cadre du PFE-2017 réalisé par M. IDIR et I. ZEMOURI, qui ont, pour leur part, travaillé qu'avec les fibres de jute, mais avec les mêmes angles que nous-mêmes.

Pour cela on a fait des essais de compression circonférentielle (un seul essai pour chaque tube), des essais de traction circonférentielle (trois essais pour chaque tube) et des essais de traction axiale (quatre essais pour chaque tube).

Ces essais sont effectués au niveau de l'entreprise MAGHREB PIPE Industries, M'silla, Les résultats de la caractérisation nous permettent de tracer les courbes « force – déformation » et « contrainte – allongement » afin d'en dégager les caractéristiques mécaniques des tubes élaborés.

Pour chacun des tubes on a déterminé les 3 paramètres suivants : module de Young, la contrainte maximale et l'allongement à la rupture.

5.1. Essai de compression circonférentielle

L'essai de compression circonférentielle consiste à faire une déformation de 5% pour chaque tube pour obtenir, par le biais de la fiche technique de l'essai présentée en figure 2 de l'Annexe :

- La force correspondante à la déflexion maximale, $F(N)$;
- La rigidité spécifique, $S (N/m^2)$;
- Le Module d'élasticité en compression circonférentielle, $E_{cc} (N/mm^2)$

5.1.1. Effet du type de fibres sur la compression circonférentielle pour les différents angles d'enroulement

Les **Figures 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6** présentent l'évolution de la force en fonction de la déflexion du diamètre des tube jusqu'à la déformation de 5% imposée, alors que les **Tableaux 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6** présentent Les forces correspondante à la déflexion maximale $F (N)$, La rigidité spécifique $S (N/m^2)$ et Les Modules d'élasticité en compression circonférentielle $E_{cc} (GPa)$.

Pour $\alpha = 50^\circ$

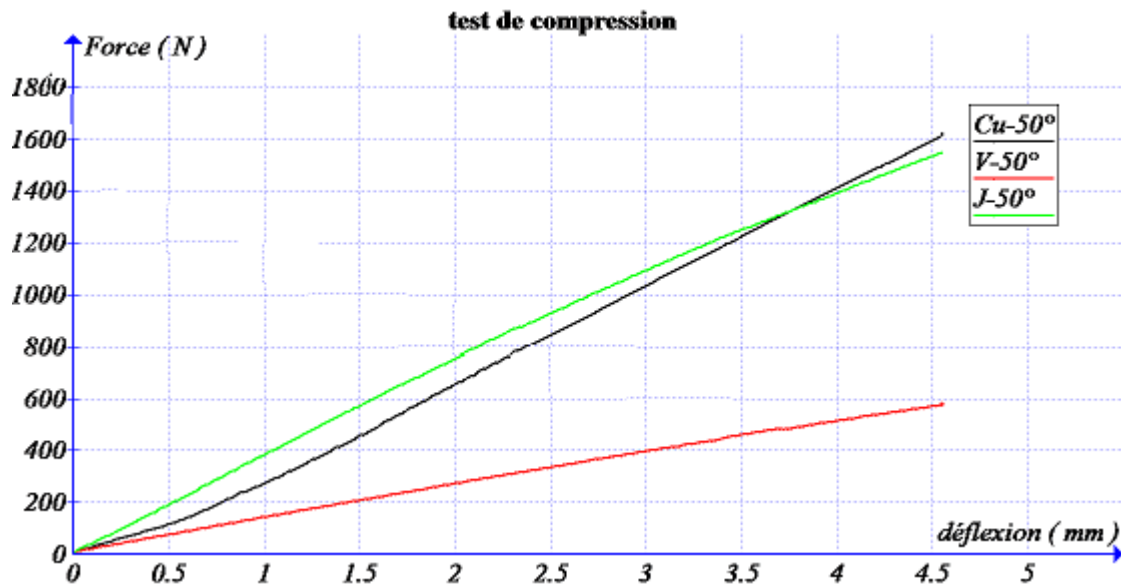


Figure 5.1 : Essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 50^\circ$.

Tableau 5.1 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 50^\circ$.

Tube	F (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-50°	1555	34262	13,007
Cu-50°	1166	25700	4,73
V-50°	562	12512	4,619

Pour $\alpha = 55^\circ$

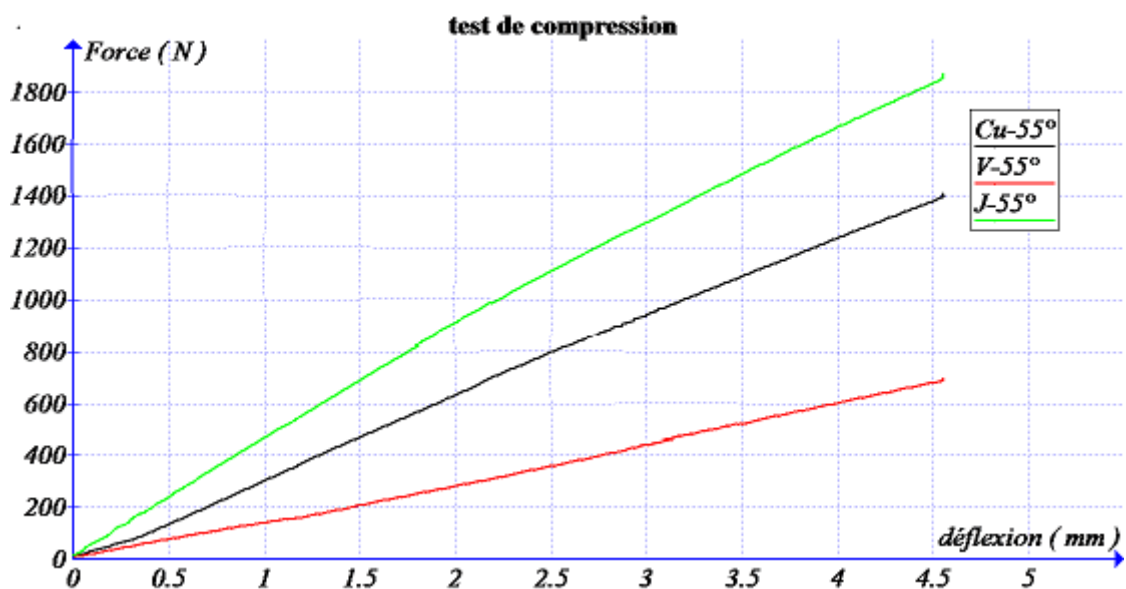


Figure 5.2 : Essai de compression circonférentielle à $\alpha = 55^\circ$.

Tableau 5.2 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle $\alpha = 55^\circ$.

Tube	F (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-55°	1873	41280	12,452
Cu-55°	1413	31300	4,586
V-55°	696	15340	4,581

Pour $\alpha = 60^\circ$

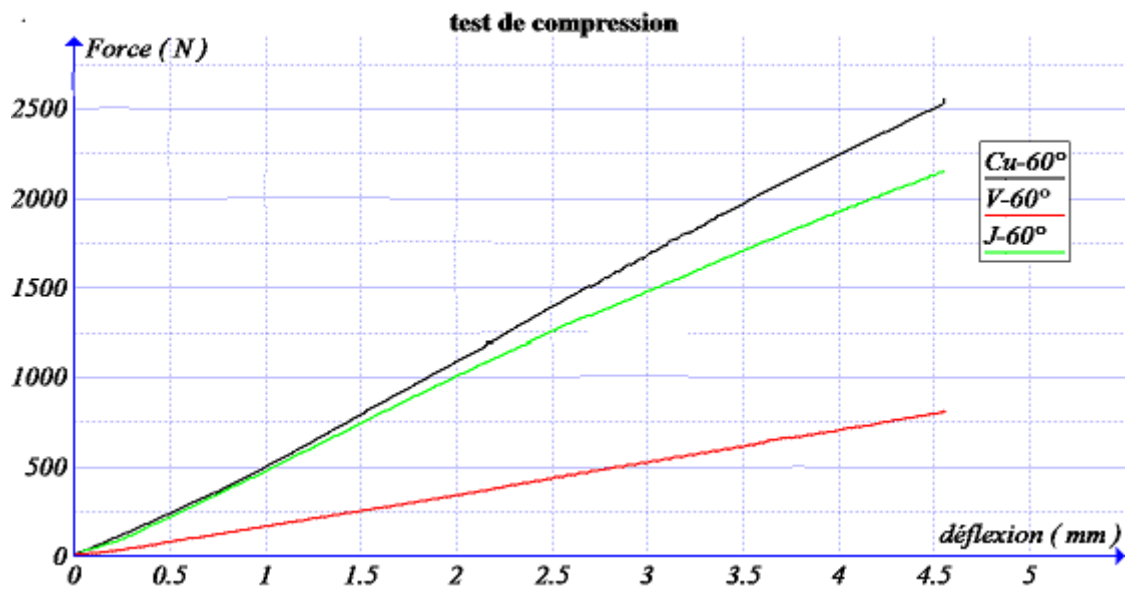


Figure 5.3 : Essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 60^\circ$.

Tableau 5.3 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 60^\circ$.

Tube	F (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-60°	2158	47726	10,116
Cu-60°	2553	57069	4,491
V-60°	814	17941	4,13

Pour $\alpha = 65^\circ$

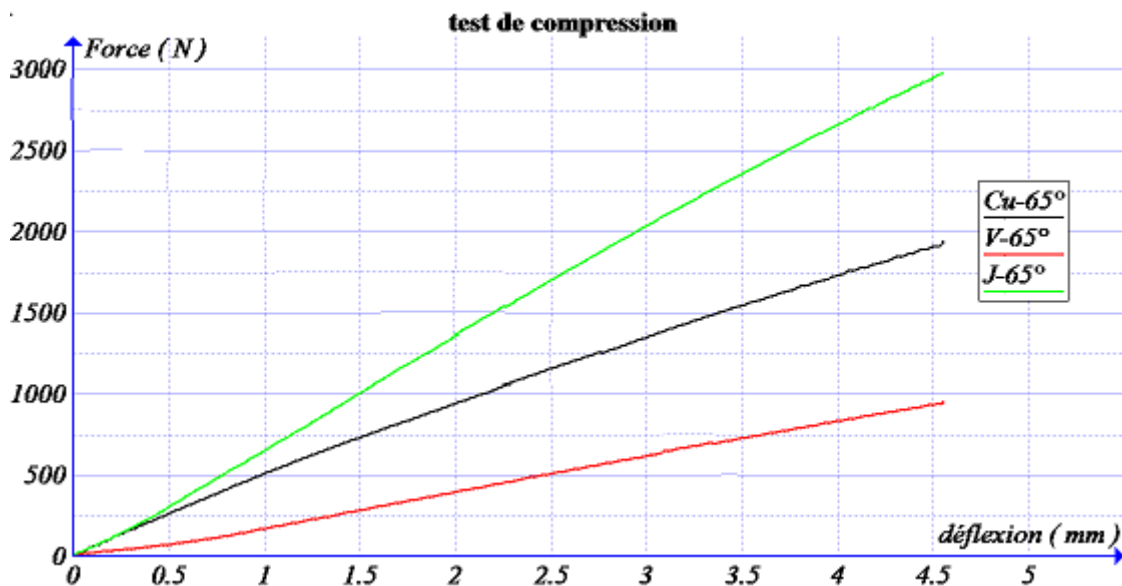


Figure 5.4 : Essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 65^\circ$.

Tableau 5.4 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 65^\circ$.

Tube	F (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-65°	2987	65737	10,587
Cu-65°	1943	42825	5,112
V-65°	958	21496	4,662

Pour $\alpha=75^\circ$

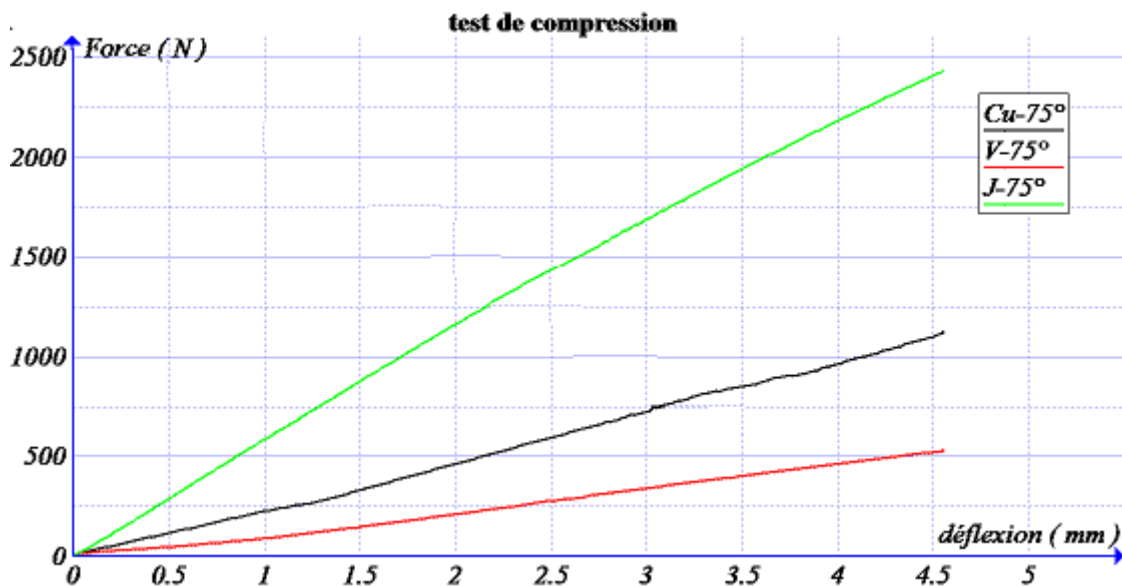


Figure 5.5 : Essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 75^\circ$.

Tableau 5.5 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 75^\circ$.

Tube	F (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-75°	2436	54352	11,566
Cu-75°	1129	24884	4,151
V-75°	534	11853	4,297

Pour $\alpha = 90^\circ$

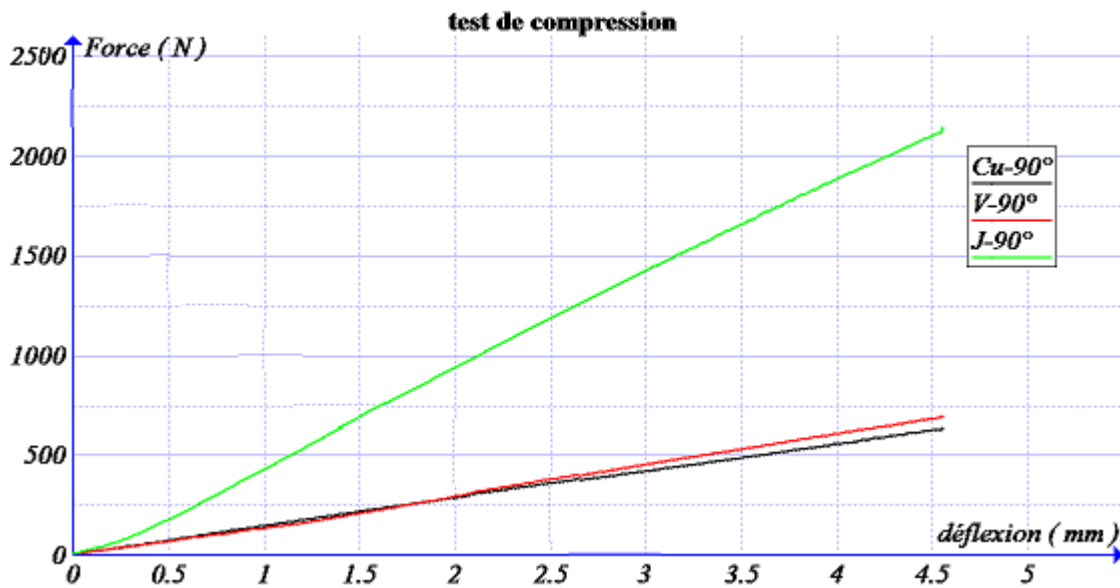


Figure 5.6 : Essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 90^\circ$.

Tableau 5.6 : Paramètres de l'essai de compression circonférentielle pour $\alpha = 90^\circ$.

Tube	Fcc (N)	S (N/m ²)	Ecc (GPa)
J-90°	2145	47937	5,253
Cu-90°	640	14321	3,26
V-90°	701	15766	5,14

On remarque que :

- Les tube du jute est plus résistant à la compression circonférentielle quel que soit l'angle d'enroulement sauf à l'angle 60° , où c'est le système hybride Cu/Jute qui présente la meilleur reistance.
- Le système hybride V/Jute est le moins résistant à la compression circonférentielle quel que soit l'angle d'enroulement sauf à l'angle $\alpha = 90^\circ$.

5.1.2. Effet de l'angle d'enroulement α sur la compression circonférentielle pour les différentes fibres

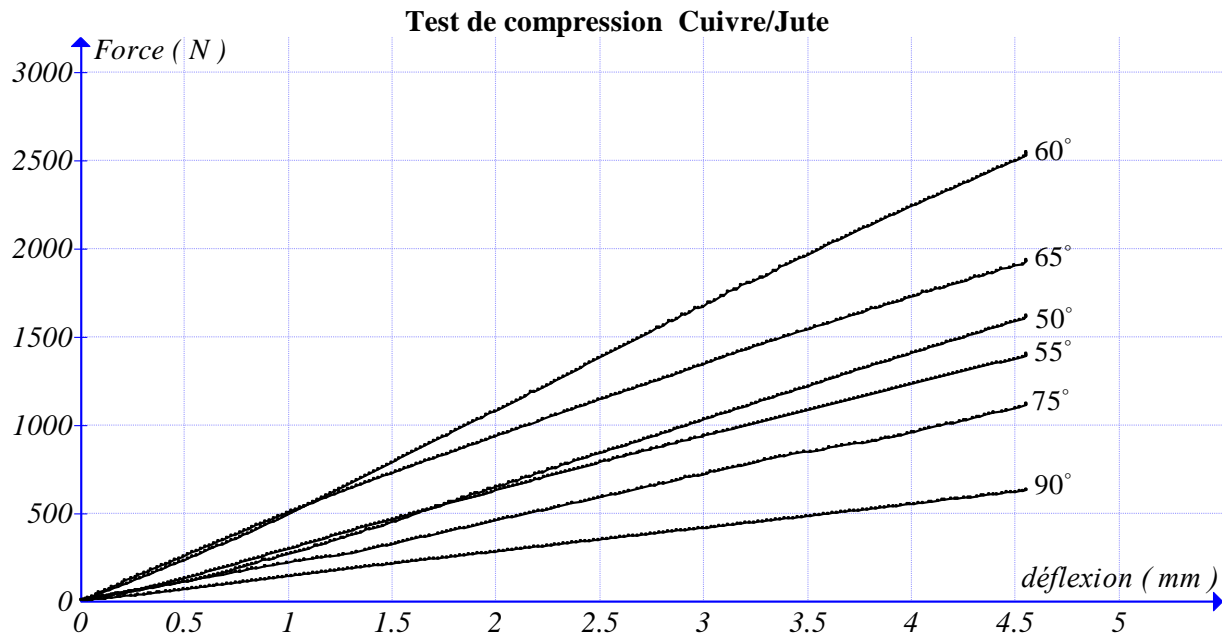


Figure 5.7 : Essai de compression circonférentielle pour Cu/jute pour différents angles α .

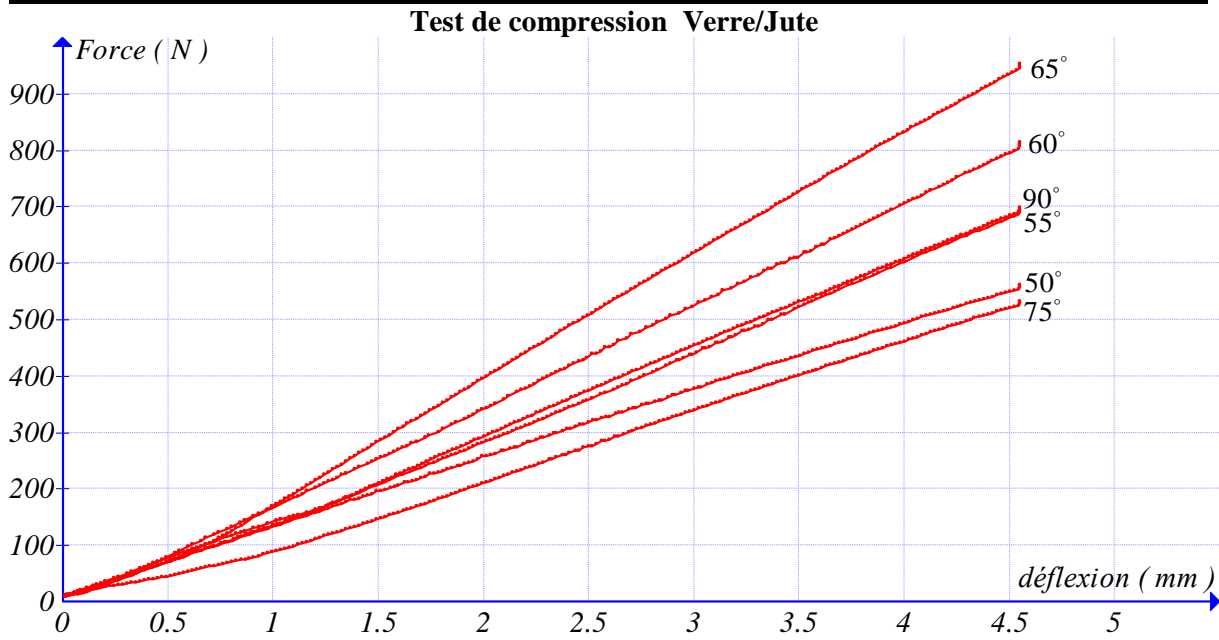


Figure 5.8 : Essai de compression circonférentielle pour Verre /Jute pour différents angles α .

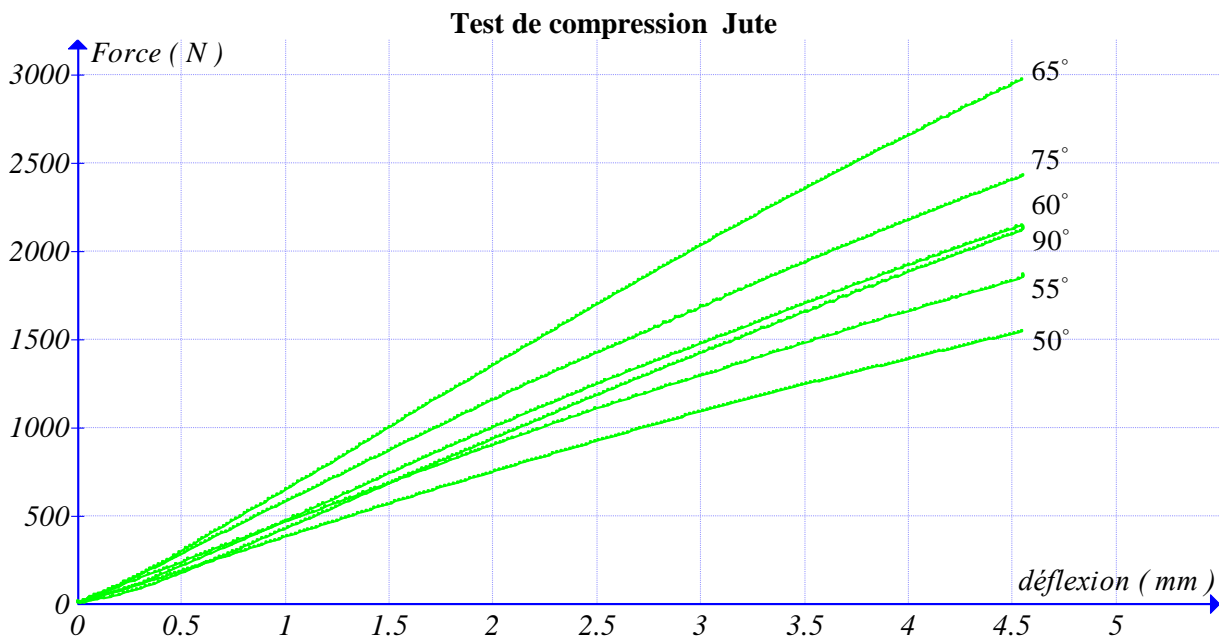


Figure 5.9: Essai de compression circonférentielle pour le Jute pour les différents angles α .

D'après Les Figures 5.7, 5.8, 5.9 nous concluons que l'angle d'enroulement sur la résistance à la compression circonférentielle a un effet certain, et ce quel que soit le type du renfort.

La Figure 5.10 présente l'évolution de la force à 5% de déformation imposée en fonction de l'angle d'enroulement α .

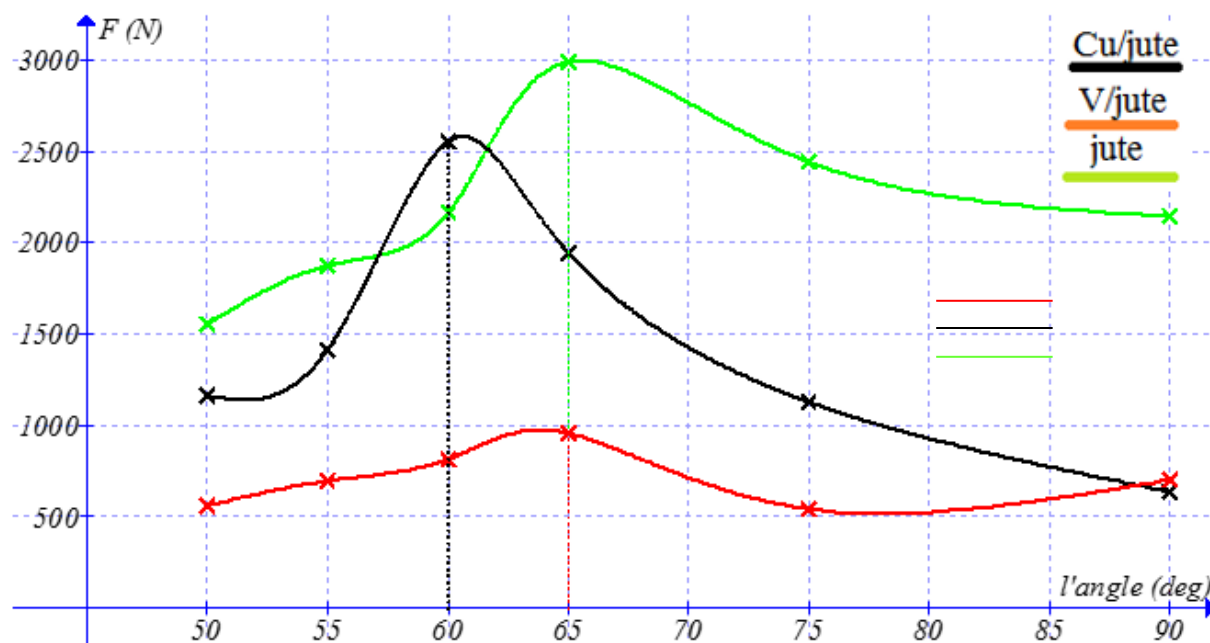


Figure 5.10 : Evolution de la force en fonction de l'angle α

Toutes les courbes de la force maximale en fonction de l'angle d'enroulement α ressemblent à des cloches de différentes étendues telles que forces maximales pour 5% de déformation pour les différents tubes sont :

- Pour le jute 3000 N à 65°
- Pour Cu/jute 2600 N à 60°
- Pour V/jute 1000 N à 65°

5.1.3. Effet conjugué de l'angle d'enroulement α et les type des fibres sur la rigidité spécifique et le module d'Young pour la compression circonférentielle

a) Effet sur la rigidité spécifique

La Figure 5.11 présente l'effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur la rigidité spécifique à la compression circonférentielle.

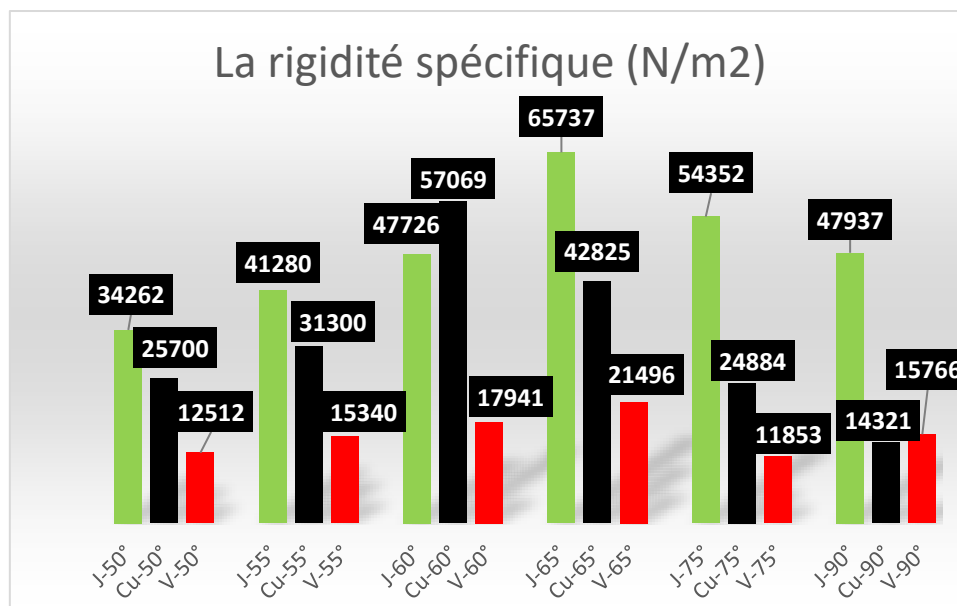


Figure 5.11 : Effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur la rigidité spécifique à la compression circonférentielle.

Nous remarquons que la rigidité spécifique présente une variation en cloche pour les trois types de fibre en fonction de leur angle d'enroulement α . Chaque type de fibre présente une valeur maximale de la rigidité spécifique pour une valeur donnée de α , et diminue notablement de part et d'autre de cet angle.

Il est à noter, par ailleurs, pour les tubes avec les fibres de verre, l'écart entre les rigidités spécifiques en fonction de l'angle α , n'est pas aussi marqué pour les tubes avec les fibres de jute et ceux avec les fibres de cuivre.

La **Figure 5.11** montre que :

- Pour les tubes à fibres de Jute, c'est le **J-65°**, donc pour les fibres enroulées sous un angle de 65°, qui présente la rigidité spécifique la plus élevée de **65737 N/m²**
- Pour les tubes à fibres de Cu, c'est le **Cu-60°**, donc pour les fibres enroulées sous un angle de 60°, qui présente la rigidité spécifique la plus élevée de **57069 N/m²**
- Pour les tubes à fibres de verre, c'est le **V-65°**, donc pour les fibres enroulées sous un angle de 65°, qui présente la rigidité spécifique la plus élevée de **21496 N/m²**.

b) Effet sur le module d'Young

La **Figure 5.12** présente, quant à elle, l'effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur le module d'Young à la compression circonférentielle.

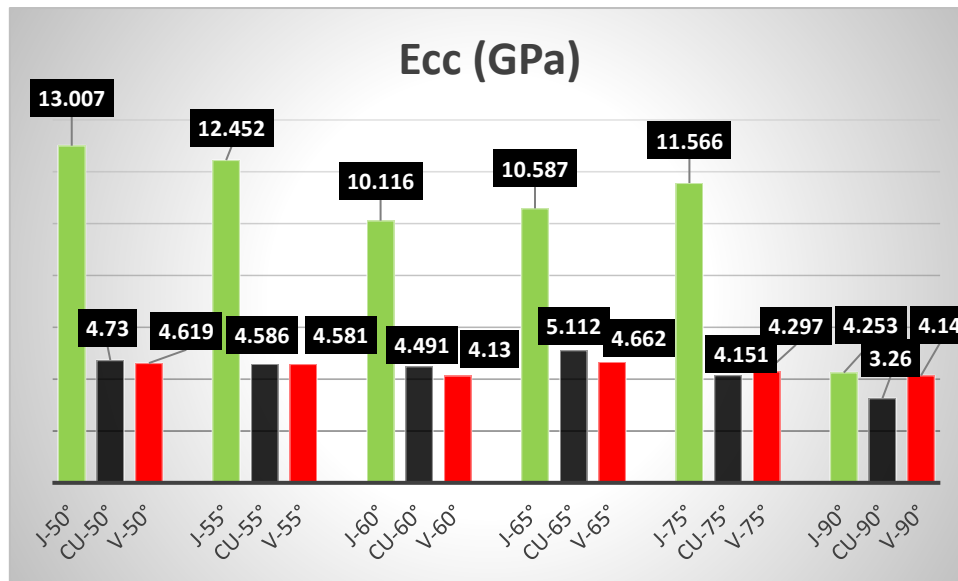


Figure 5.12 : Effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur le module d'Young à la compression circonférentielle.

Nous constatons, de par la **Figure 5.12**, que le module d'Young **Ecc** reste nettement plus élevé pour les tubes à fibres de jute et ce quel que soit l'angle α , avec une valeur maximale pour le J-50° de 13,007 GPa pour l'angle d'enroulement de 50°. Pour les autres types de fibres, cuivre et verre, les valeurs du module d'Young restent beaucoup faibles, et là aussi quelle que soit la valeur de l'angle d'enroulement α .

La **Figure 5.13**, regroupant les résultats de la **figure 5.12**, présente la variation du module d'Young à la compression circonférentielle E_{cc} en fonction de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres enroulées.

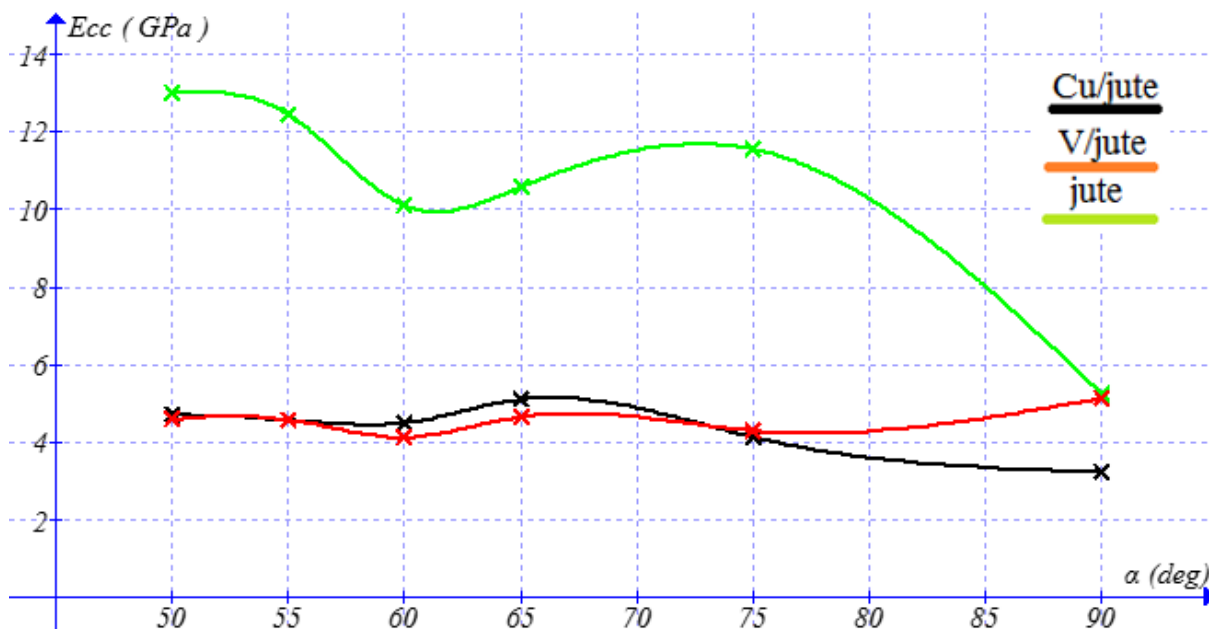


Figure 5.13 : l'évolution E_{cc} en fonction de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres.

D'après la **Figure 5.13** :

- Le système hybride cuivre /jute et le système hybride verre/jute donnent presque les mêmes valeurs du module d'élasticité pour l'essai de compression, E_{cc} , dans l'intervalle $[50^\circ-75^\circ]$
- La variation du module d'élasticité pour l'essai de compression, E_{cc} , en fonction de l'angle dans les tubes du jute est notable.

- La variation du module d'élasticité pour l'essai de compression, E_{cc} , en fonction de l'angle dans le système hybride cuivre/jute et hybride verre/jute est faible par rapport au système jute seulement.

Nous constatons que, dans l'ensemble, les meilleurs résultats pour la rigidité spécifique (**Figure 5.11**), et le module d'élasticité pour la compression circonférentielle, E_{cc} , (**Figure 5.12**) sont données par les fibres de jute, puis vient l'hybride cuivre /jute, et l'hybride verre/jute vient en dernier et ça quel que soit la valeur de l'angle d'enroulement α .

Ceci peut s'expliquer par l'adhérence des couches les unes aux autres. En effet, en terme de fibres, quand les couches sont de même nature l'adhérence est bien meilleure que lorsque les couches sont de natures différentes et donc avec une certaine fragilisation. Des fibres de natures différentes font qu'il y a toujours une hétérogénéité, qui fait que l'adhérence n'est pas toujours des meilleures.

Nos résultats montre la faiblesse d'adhérence dans le système hybride, qui va se répercuter sur les performances du composite.

5.2. Essai de traction circonférentielle

On a fait l'essai de traction circonférentielle pour calculer quelques caractéristiques mécaniques tels que :

- la résistance à la traction circonférentielle, σ_{tc} ;
- la déformation maximale en traction circonférentielle, ϵ_{tc} (%) ;
- le module d'Young en traction circonférentielle, Etc.

Le logiciel auquel est soumise la machine de traction nous donne une courbe de traction circonférentielle du type contrainte en fonction du temps, $\sigma = f(t)$, comme présenté sur la fiche technique de l'essai (figure 1 de l'Annexe).

Aussi pour évaluer le module d'Young en traction circonférentielle, Etc , il nous faut dessiner la courbe contrainte-déformation, $\sigma = f(\epsilon)$; dont la pente de la partie linéaire représente justement Etc (comme illustre par la **Figure 4.12**, en chapitre 4) :

$$\text{Etc} = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

En procédant comme suit : $v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow dx = v \cdot dt$ et comme $v = 2.5$ mm/min on calcule la déformation $\epsilon = dx/D$, avec $D = 91$ mm : diamètre moyen, on aboutit à la courbe $\sigma = f(\epsilon)$.

5.2.1. Effet de la nature des fibres sur la traction circonférentielle, pour différents angles α

Les figures 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, et 5.20 représentent les courbes de contrainte-déformation de traction circonférentielle pour différents angles α suivi par les tableaux 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 et 5.12 qui contiennent les valeurs de : la contrainte à la compression circonférentielle (MPa), la déformation (%) et module de YOUNG de traction circonférentielle (GPa).

Pour $\alpha=50^\circ$

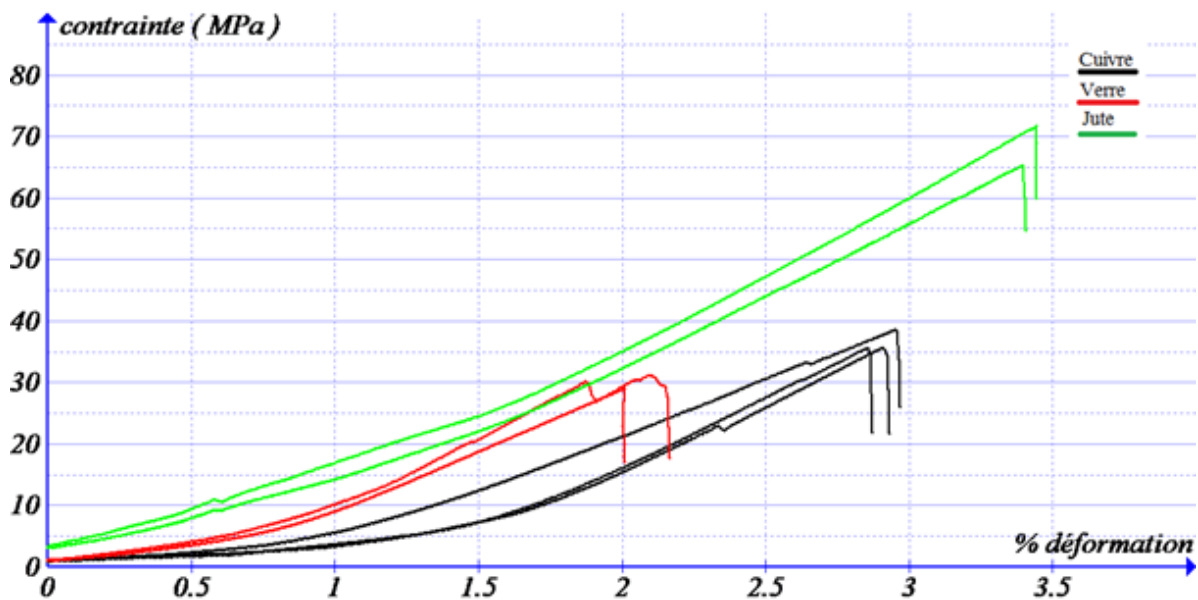


Figure 5.14 :L'essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 50^\circ$.

Tableau 5.7 : Paramètres de l'essai traction circonférentielle pour $\alpha = 50^\circ$.

Tube	σ_{tc} (MPa)	ϵ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-50°	67,2	3,42	2,54
Cu-50°	36,41	2,917	1,86
V-50°	29,2	3,07	2,57

Pour $\alpha=55^\circ$

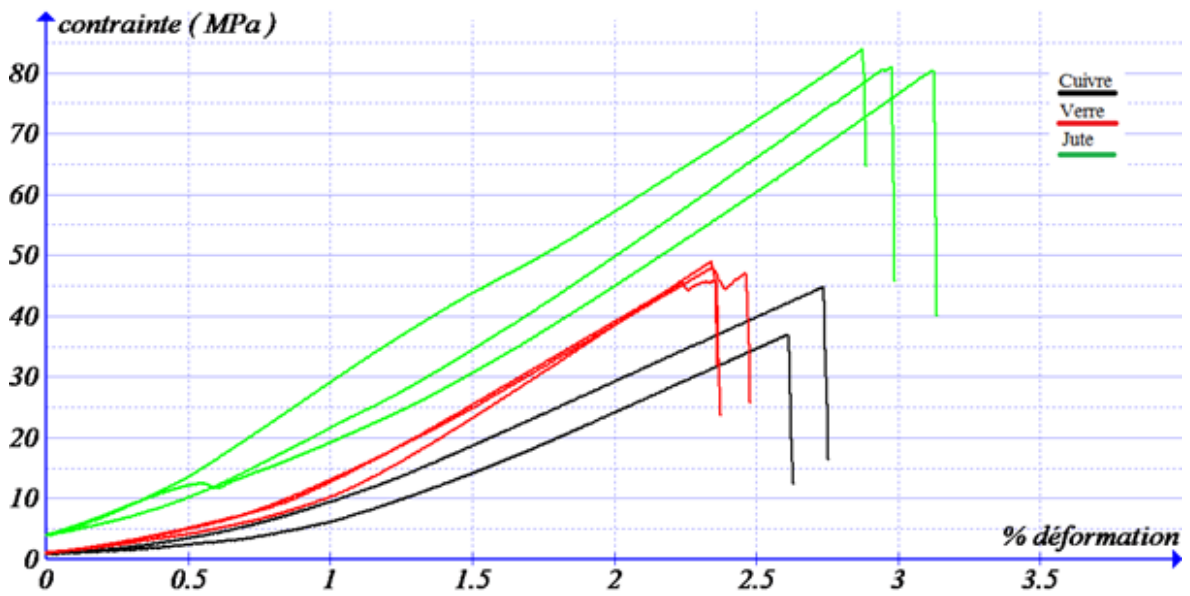


Figure 5.15 : Essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 55^\circ$.

Tableau 5.8 : Paramètres de l'essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 55^\circ$.

Tube	σ_{tc} (MPa)	ϵ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-55°	82,30	2,993	3,31
Cu-55°	39,67	2,67	2,11
V-55°	47,37	2,41	2,73

Pour $\alpha=60^\circ$

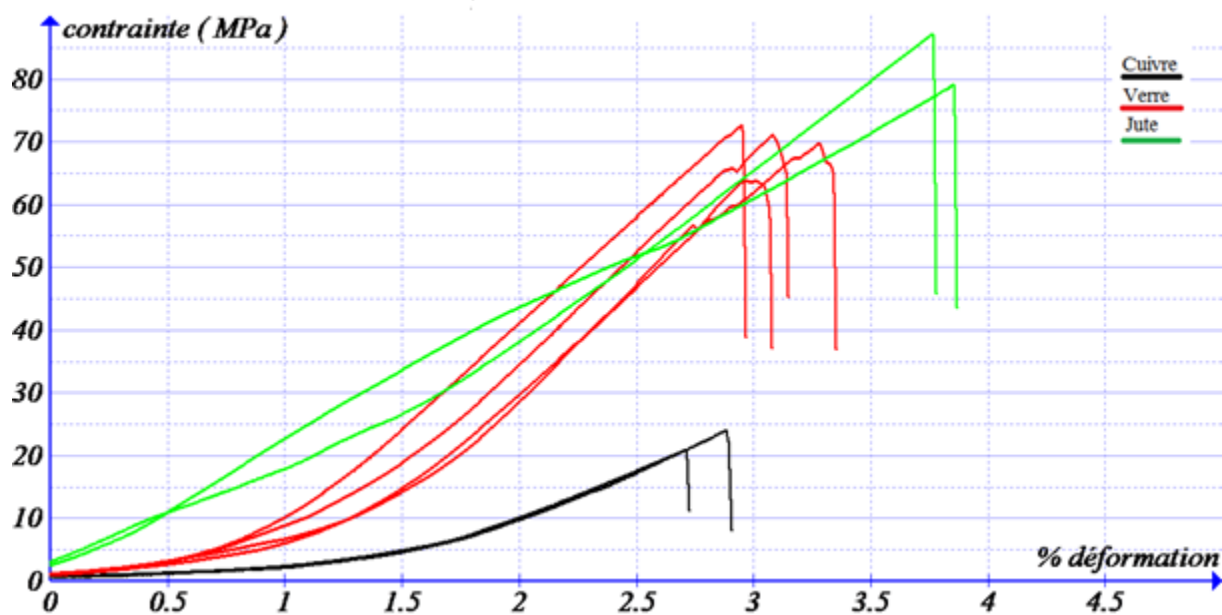


Figure 5.16 : Essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 60^\circ$.

Tableau 5.9 : Paramètres de l'essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 60^\circ$.

Tube	σ_{tc} (MPa)	ξ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-60°	83,19	3,82	2,83
Cu-60°	21,91	2,79	1,75
V-60°	68,98	3,06	3,48

Pour $\alpha=65^\circ$

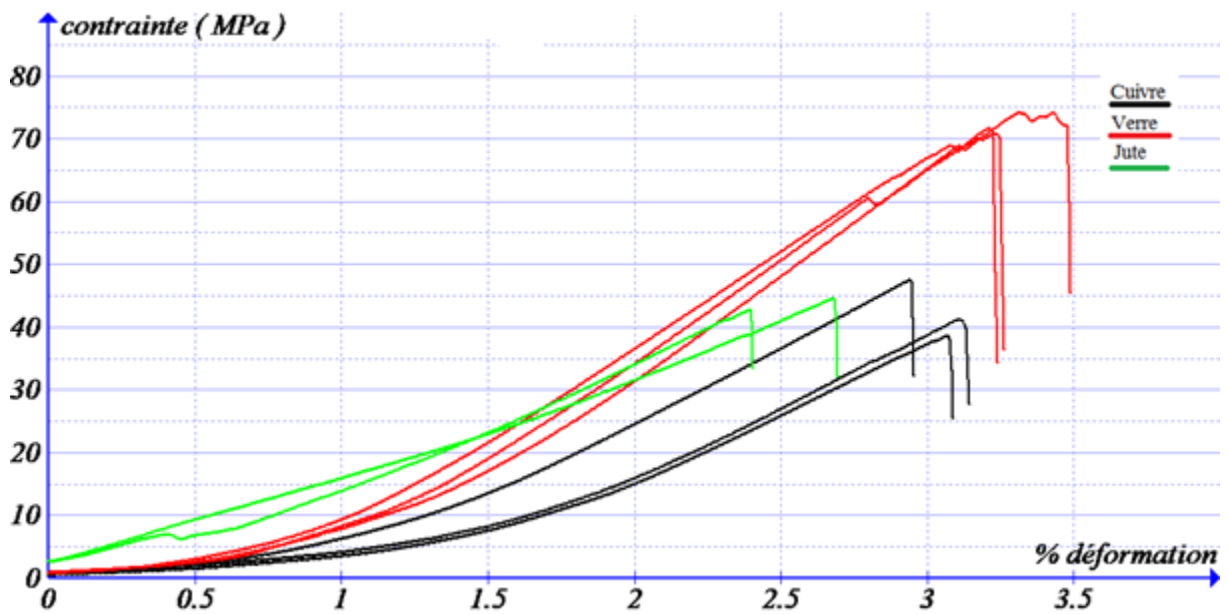


Figure 5.17 :L'essai de traction circonférentielle pour $\alpha =65^\circ$.

Tableau 5.10 : Paramètres de l'essai traction circonférentielle pour $\alpha = 65^\circ$.

Matériaux	σ_{tc} (MPa)	ϵ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-65°	43,52	2,51	2,29
Cu-65°	42,63	3,031	2,48
V-65°	71,94	3,36	3,41

Pour $\alpha=75^\circ$

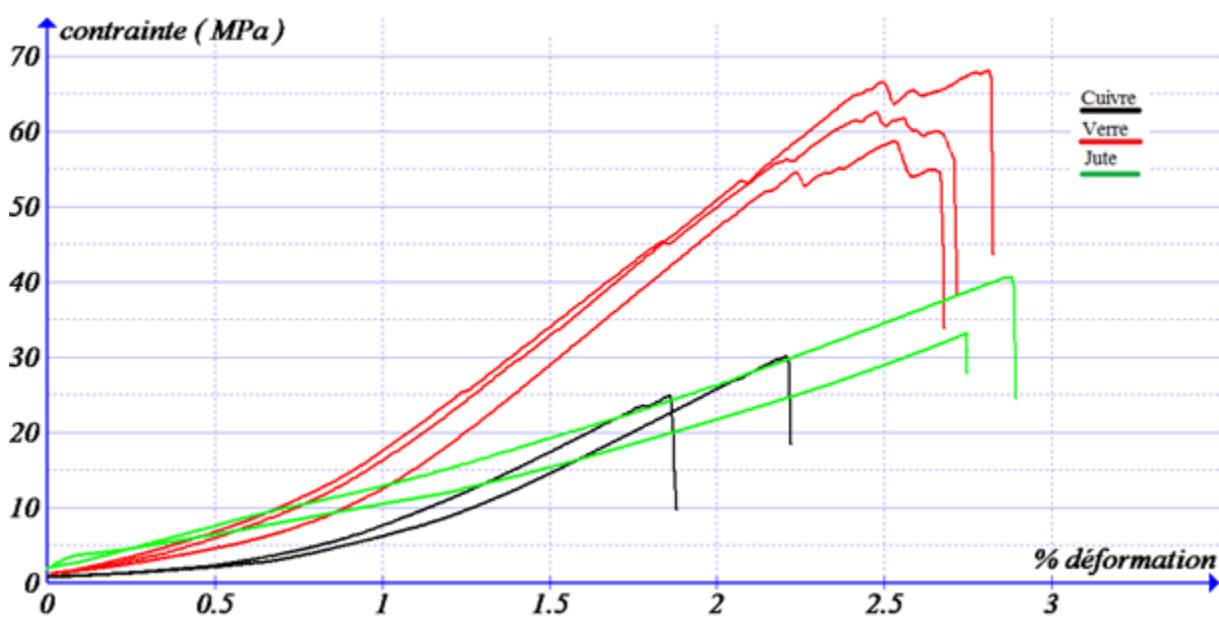


Figure 5.18 : L'essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 75^\circ$.

Tableau 5.11 : Paramètres de l'essai traction circonférentielle pour $\alpha = 75^\circ$.

Matériaux	σ_{tc} (MPa)	ϵ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-75°	36,51	2,18	1,59
Cu-75°	27,14	2,029	2,26
V-75°	60,94	2,735	3,66

Pour $\alpha=90^\circ$

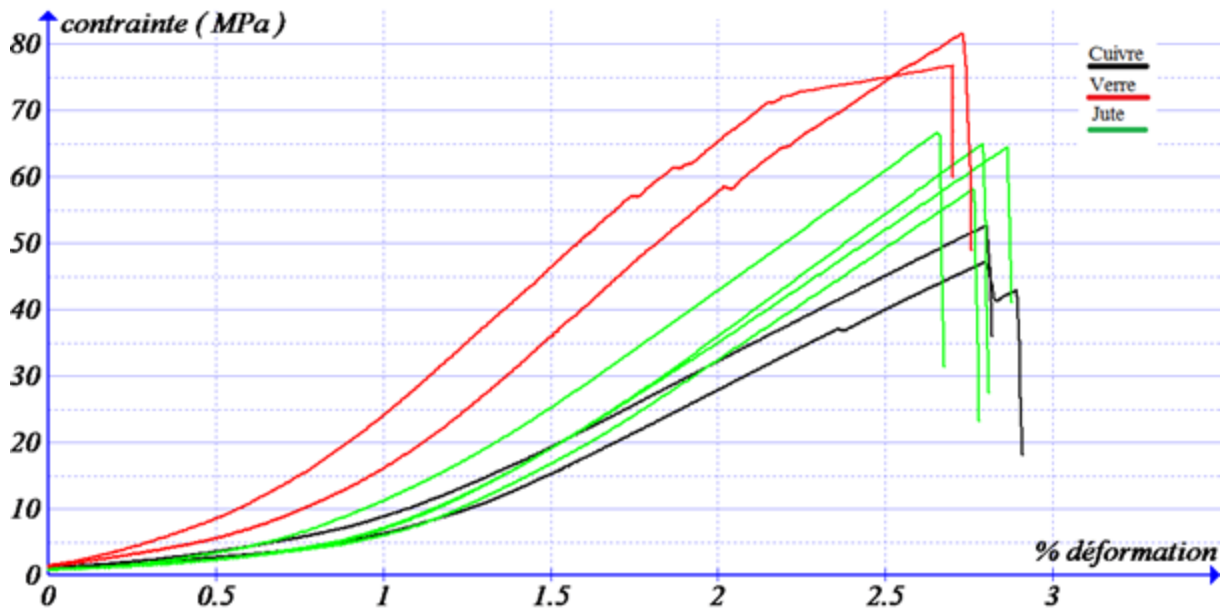


Figure 5.19 : Essai de traction circonférentielle pour $\alpha = 90^\circ$.

Tableau 5.12 : Paramètres de l'essai traction circonférentielle pour $\alpha = 90^\circ$.

Tube	σ_{tc} (MPa)	ϵ_{tc} (%)	Etc (GPa)
J-90°	61,51	2,777	3,58
Cu-90°	49,21	2,852	2,56
V-90°	79,13	2,719	3,38

On remarque :

- Si l'angle d'enroulement $55^\circ < \alpha \leq 60^\circ$

La résistance à la traction circonférentielle apparente, σ_{tc} , des tubes à fibre de jute est supérieure à celle des tubes à fibres de verre et des tubes à fibres de cuivre.

- Si l'angle d'enroulement $60^\circ < \alpha < 90^\circ$

La résistance à la traction circonférentielle apparente, σ_{tc} , des tubes à fibres de verre est supérieure à celle des tubes à fibres de jute et des tubes à fibres de cuivre.

Ce qui peut s'expliquer par la différence entre le diamètre de fibre de jute $D_j = \text{mm}$ et le diamètre de fibre de verre $D_v = \text{mm}$.

5.2.2. Effet conjugué de l'angle d'enroulement α et du type de fibres sur la résistance à la traction, la déformation maximale et module d'Young en traction circonférentielle

a) Effet sur la résistance à la traction circonférentielle, σ_{tc}

La Figure 5.20 présente l'histogramme des contraintes maximales, σ_{tc} (MPa), en fonction de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres.

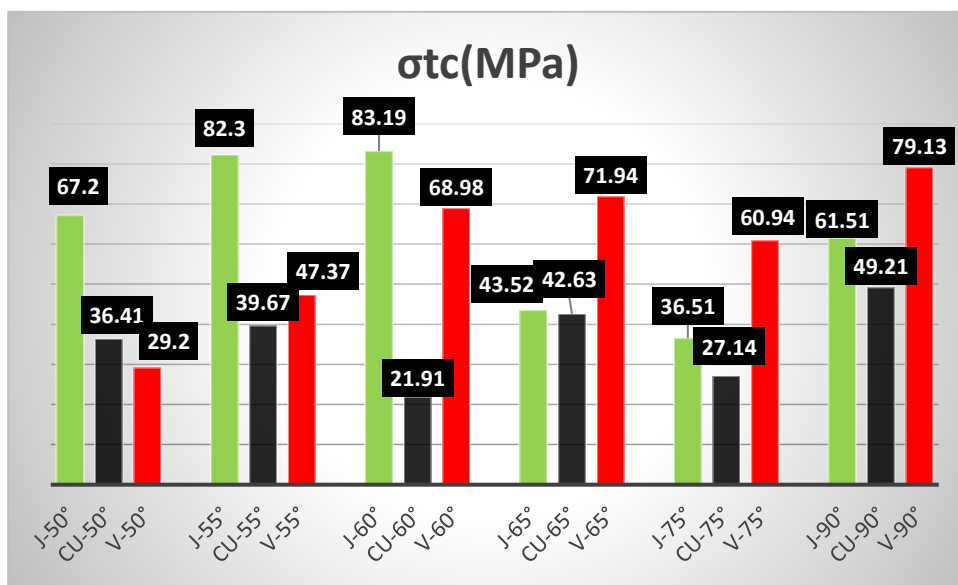


Figure 5.20 : Effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur la résistance à la traction circonférentielle σ_{tc} (MPa).

Pour presque tous les angles d'enroulement l'hybride jute/cuivre est celui qui présente la σ_{tc} le plus basse.

Ceci est du probablement à cause du taux d'absorption de résine faible par les fibres de cuivre donc on peut dire que la résistance à la traction circonférentielle apparente, σ_{tc} , augmente proportionnellement avec le taux d'absorption de résine.

Aussi, il faut éviter les fibres métalliques pour obtenir une σ_{tc} élevée. Puisque ils fait une cisaillement des matrices de la résine

b) Effet sur module le d'Young en traction circonférentielle, Etc (GPa)

La **Figure 5.21** présente l'histogramme des modules d'Young, où d'élasticité, en traction circonférentielle, Etc (GPa), en fonction de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres.

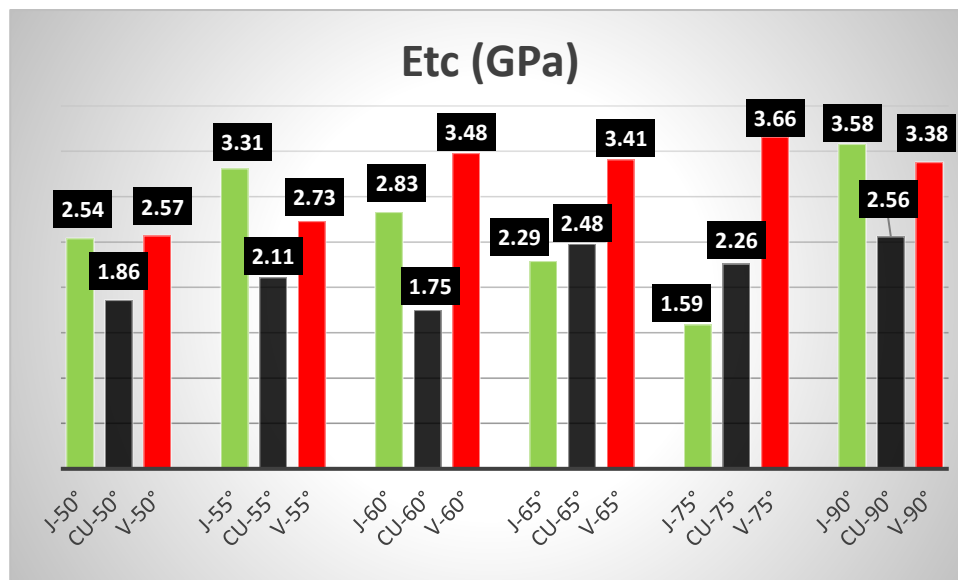


Figure 5.21 : Effet de l'angle d'enroulement α et de la nature des fibres sur le module d'Young en traction circonférentielle, Etc (GPa).

On remarque que le module d'élasticité en traction circonférentielle pour les tubes aux fibres de verre est élevé par rapport à celle des tubes aux fibres de jute et de cuivre, pour presque tous les angles d'enroulement, contrairement à ce que nous avons observé en compression circonférentielle (**Figure 5.12**), où c'étaient les tubes à fibres de jute qui présentaient les modules de compression circonférentielle les plus élevés.

Le module d'élasticité, Etc, des tubes aux fibres de verre varie de manière tout à fait aléatoire, en fonction de l'angle d'enroulement α et présente la valeur maximale de 3,66 GPa pour $\alpha = 75^\circ$

5.3 Comparaison entre les modules d'Young en compression circonférentielle, Ecc, et en traction circonférentielle, Etc.

Les **Figures 5.22, 23 et 24** présentent l'évolution de Ecc et Etc en fonction de l'angle d'enroulement α pour, respectivement, les tubes à fibres de Jute, les tubes hybrides à fibres de Verre et jute et les tubes hybrides aux fibres de cuivre et jute.

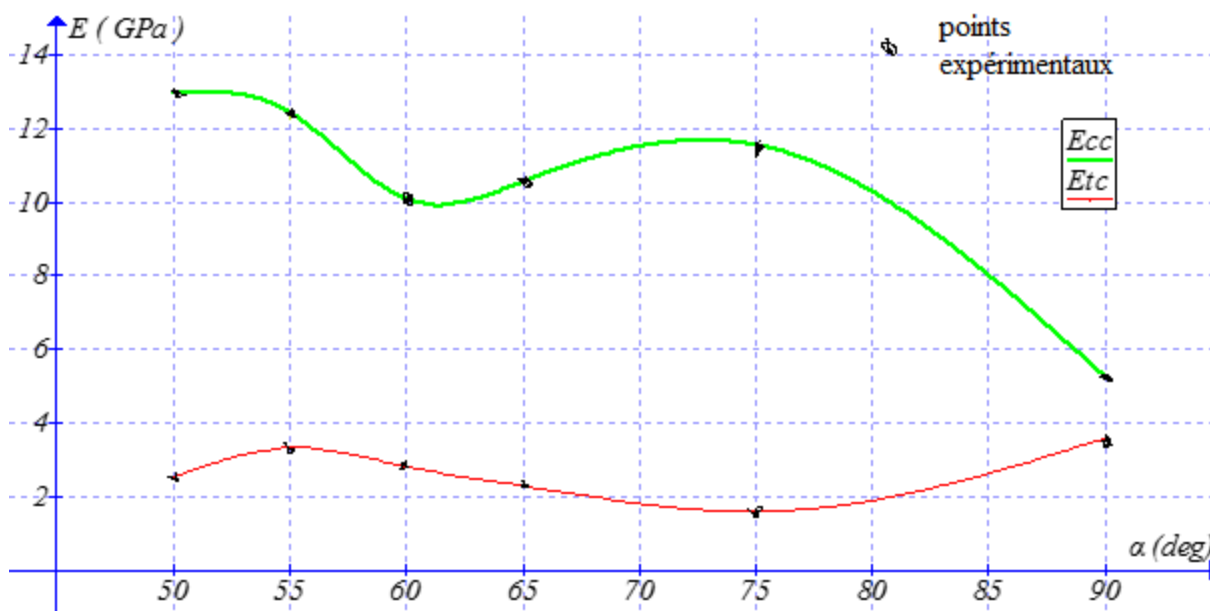


Figure 5.22 : L'évolution de Ecc et Etc en fonction de l'angle d'enroulement α pour les tubes à fibres de jute.

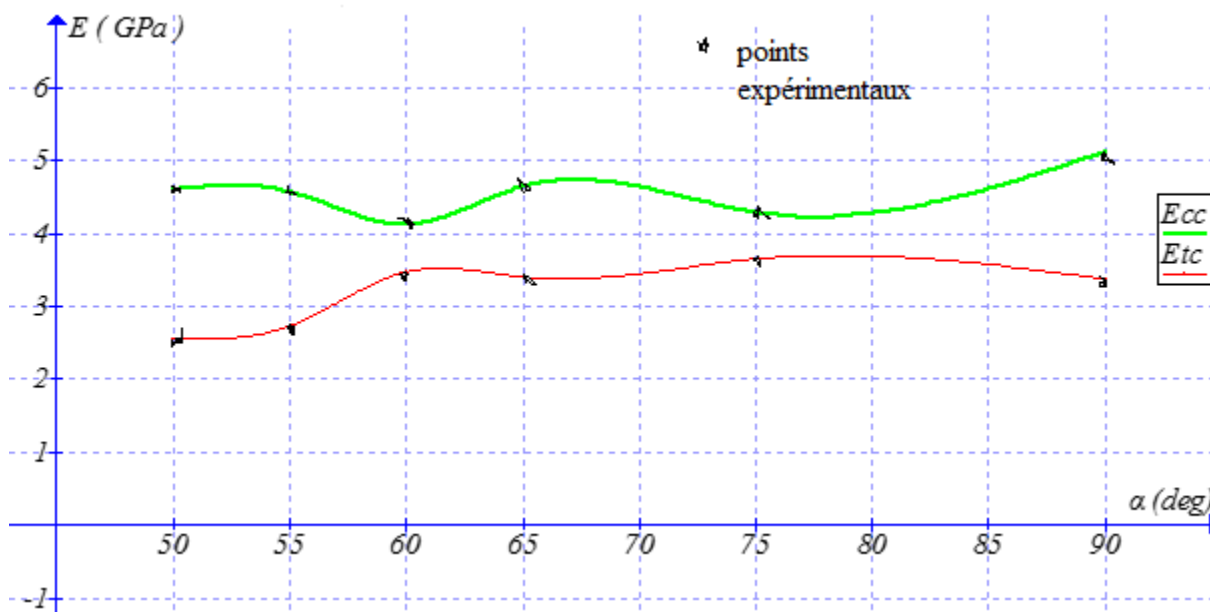


Figure 5.23 : L'évolution du Ecc et Etc en fonction de l'angle d'enroulement α pour les tubes hybrides à fibres verre-jute.

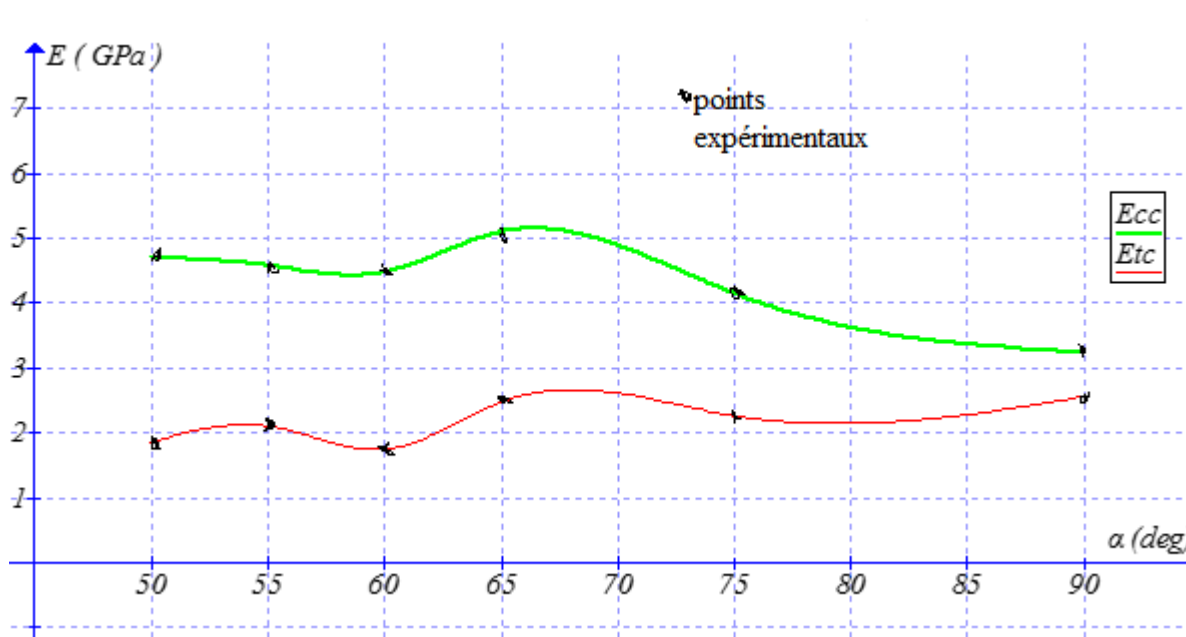


Figure 5.24 : L'évolution du Ecc et Etc en fonction de l'angle d'enroulement α pour les tubes hybrides à fibres cuivre-jute.

On constate que dans les trois systèmes (jute, verre-jute et cuivre-jute) le Ecc est toujours supérieure à Etc quel que soit le type de fibres et quel que soit l'angle d'enroulement α .

Il est clair que la contrainte maximale pour casser une surface convexe est supérieure à la contrainte maximale pour casser la même surface concave et selon la loi de Hooke, $\sigma = E \cdot \epsilon$, la contrainte est proportionnelle au module d'Young, et c'est pour ça que $E_{cc} > E_{tc}$ car la forme géométrique de tubes est cylindrique.

5.4. Essai de traction axiale

La **Figure 5.25** présente la courbe de traction axiale d'un échantillon prélevé sur le tube V-90°, donc avec des fibres de verre, en plus des fibres de jute, enroulées sous l'angle 90°.

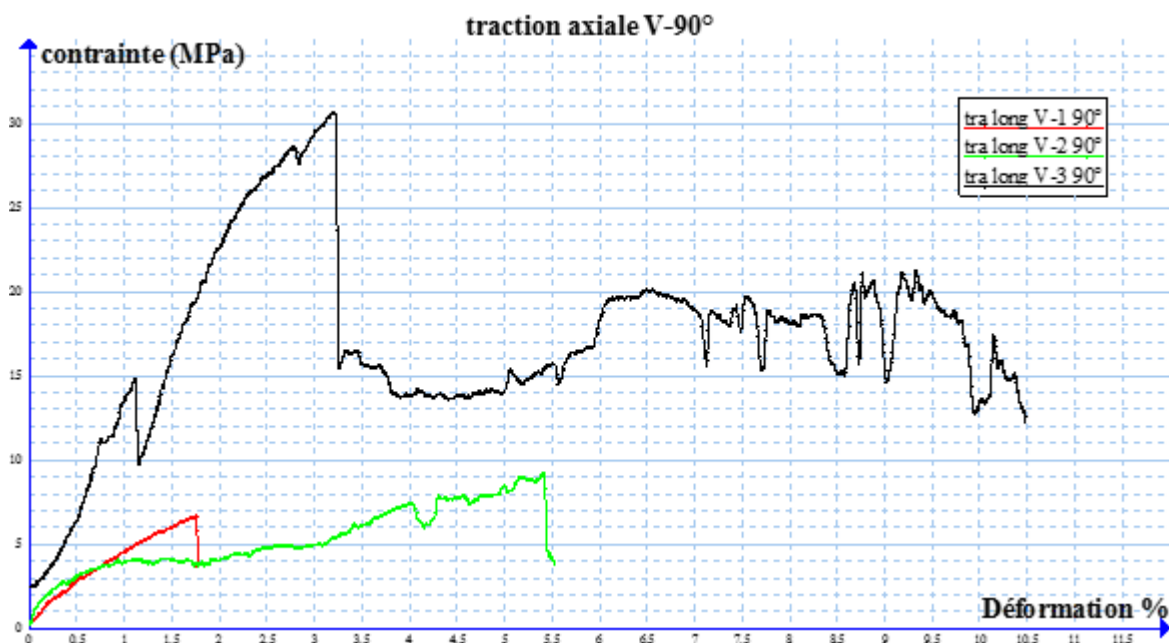


Figure 5.25 : Courbes de traction axiale de tube V-90°.

Les courbes de traction axiale sont totalement perturbées à cause du glissement de l'échantillon pendant le test, et donc ne donnent aucun résultat de vraiment fiable.

5.5 Conclusion

Les résultats obtenus pour la force maximale appliquée lors de la compression circonférentielle en fonction de l'angle d'enroulement α , illustrée par la figure **Figure V.10**, montre que toutes les courbes se ressemblent et sont en forme des cloches de différentes étendues.

Pour tous les tubes (jute, verre-jute et cuivre-jute) , quel que soit l'angle d'enroulement, le module d'Young en compression circonférentielle, Ecc, est toujours supérieure au module d'Young en traction circonférentielle, Etc ; et ils ont la même variation comme démontre **Figure 5.22**, **Figure 5.23** et **Figure 5.24**.

Conclusion Générale :

Au terme de ce travail sur les caractéristiques des tubes en matériaux composite que nous avons élaborés par le procédé filamentaire, avec différents types de fibres (jute, cuivre et verre) enroulées sous différents angles ($\alpha=55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 90^\circ$), nous concluons que les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent de la direction sous laquelle elles sont évaluées. En effet, la valeur de la résistance à la traction circonférentielle n'est pas égale pas à celle de la résistance à la compression circonférentielle, et ceci parce que les matériaux composites sont hétérogènes et donc anisotropes.

La rigidité spécifique de tous les tubes est élevée pour les angles d'enroulement α de l'intervalle $[55^\circ : 70^\circ]$; et, de part et d'autre de cet intervalle les valeurs s'effondrent. Néanmoins, la valeur de α pour laquelle on a un pic dans la courbe de rigidité dépend de la nature des fibres utilisées, par exemple pour les tubes hybrides à jute/verre et pour les tubes à jute seulement c'est sous l'angle d'enroulement 65° que nous avons la valeur la plus élevée, alors que pour le tube hybride à jute/cuivre la valeur maximale est atteinte pour l'angle de 60° .

Le système hybride a un effet négatif sur la résistance à la rigidité, et à la résistance à la compression circonférentielle, et ce à cause de l'hétérogénéité des couches enroulées d'une part et de la faible adhérence entre les fibres de natures différentes d'autre part et surtout dans le cas les fibres en cuivre, ceci probablement à cause de leur taux d'absorption de résine très faible comparativement à celui des fibres de jute et de verre.

Le choix de fibres pour élaborer un tube dépend des propriétés que l'on recherche, notamment pour une meilleure résistance à la traction circonférentielle il est préférable d'utiliser les tubes hybrides à fibres de jute/ verre, alors que pour une meilleure résistance à la compression circonférentielle les tubes à fibre de jute sont les plus appropriés.

Au cours de ce travail nous avons constaté que la réalisation des tubes à fibres enroulées, en plus de l'optimisation des structures composites, nécessite la manipulation d'un grand nombre de variables (l'orientation des plis, la séquence d'empilement, les épaisseurs constitutives, etc...) et qu'il faut également tenir compte du taux d'absorption de la résine par les fibres, et éviter notamment les fibres métalliques car leurs taux d'absorption de résine est faible contrairement aux fibres de verre et fibres naturelles.

Comme perspectives, nous proposons d'approfondir les travaux dans l'intervalle $55^\circ-70^\circ$ (l'angle économique); et, par ailleurs, de faire subir un traitement thermique aux fibres à enrouler à basse température pour éliminer l'humidité, ainsi qu'un traitement chimique par NaOH pour augmenter leur taux d'absorption de la résine [33]

Références Bibliographiques :

- [1]: L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux composites," *Ministère de l'économie des finances et de l'industrie*, pp. 1-47, 2002 PARIS.
- [2]: GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES," Centre d'animation régional en matériaux avancés, l'institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) 2015
- [3]: B. E. H. LY, "Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose," INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2008.
- [4]: Jean-Marie Berthelot. Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures, 4eme édition. Edition VII.
- [5]: Daniel GAY, Matériaux composite, 6eme édition 2015.
- [6]: E. J. JULES, "Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique." ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARTS ET METIERS, 2001.
- [7]: **Massinissa IDIR et Imad ZEMOURI**, 'Elaboration et caractérisation mécanique d'un composite par enroulement filamentaire avec un renfort naturel' thèse d'ingénieur, **Ecole Nationale Polytechnique 2017**
- [8]: **HADDADI Manel**, 'Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère' thèse Master, **université de Batna 2015**
- [9]: **HACHICHI Younes et CHERIF Zakaria** 'Elaboration, caractérisation et analyse d'un nouveau matériau composite à fibres végétales (Fibres de palmier dattier) en structure sandwich' thèse d'ingénieur, **Ecole Nationale Polytechnique 2017**
- [10]: Belferrag, A. Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra)_2016.
- [11]: Do Thi, Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non (Doctoral dissertation, Université de Grenoble) 2011.
- [12]: AYYAR, T.S.R., and MIRIHAGALLA, P.K., "Elephant grass fibres as reinforcing fibre", Magazine of Concrete Research, Vol. 28, N°96, pp. 162-167, September 1976.

- [13]: COUTTS, R.S.P., “Flax Fibre as a Reinforcement in Cement mortar”, The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5, N°4, pp. 257-262, August 1983.
- [14]: BLEDZKI, A.K. and GASSAN J., “Composite reinforced with cellulose based fibres”, Progress in Polymer Science, 24, pp. 221-274, 1999.
- [15]: COOK, D.J., “Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres”, Proc. Symp. On Fibrous Concrete. Construction Press Ltd., Lancaster, pp. 99-114, April. 1980.
- [16]: BOLTON A.J., “NaturalFibres for Plastic reinforcement”, Materials Technology 9, pp. 12-20, 1994.
- [17]: LEAO, A.L., ROWELL, R., and TAVARES, N., “Applications of fibres in Automotive industry in Brazil-Thermoforming process”, Science and Technology of Polymers and Advanced Materials, Edited by PRASSD P.N. et al, Plenum Press, New York, 1998.
- [18]: Food and Agricultural Organisation (FAO), “The outlook for pulp and paper to 1995. Paper products and industrial update”, FAO, Rome, 1991.
- [19]: BLEDZKI, A.K. and GASSAN J., “Composite reinforced with cellulose based fibres”, Progress in Polymer Science, 24, pp. 221-274, 1999.
- [20]: PANDE, H., “Non-Wood Fibre and Global Fibres Supply”, Aninternat.Journ. Of Forestry and food, Unasyuva 193, Vol. 49, pp. 44-50, 1988.
- [21]: Khan. M-A, Khan R-A, Haydaruzzaman. Study on the physico-Mechanical Properties of Starch-Treated Jute Yarn-Reinforced Polypropylene Composites:Effet of gamma Radiation. *J. Polym-Plastic. Tech. Eng.* 2012;48: 542-548.
- [22]: **BOUBEKEUR-LAKEHAL Bahia**, ‘Elaboration d’un nouveau matériau composite thermoplastique à base de mélange PEBD/PLA renforcé par des déchets de fibres de jute’ thèse doctorat, **Ecole Nationale Polytechnique** 2015
- [23] **S.T. Peters**. “COMPOSITE FILAMENT WINDING”, ASM International, September 2011.
- [24]: **MEZALI AMINE et ALAHARI RABAH**, ‘ELABORATION ET CARACTERISATION DE TUBES COMPOSITES PAR ENROULEMENT FILAMENTAIRE’ Mémoire de Master, **UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA BOUMERDES** 2016.

[25]: **GHOUAOULA ABDELHAMID**, ‘Simulation du comportement mécanique de la partie cylindrique d’un réservoir de stockage d’hydrogène soumis à un chargement quasi statique’ **Mémoire de Magister, Université de Hassiba Benbouali Chlef 2011.**

[26]: Sulaiman « Design and optimization of filament wound composite pressure vessels». Master of Science in Engineering Mechanics Xi'an University of Technology, 2013, china.

[27]: Patricia krawczak, réservoirs haute pression en composite, techniques de l’ingénieur,AM5530 v1,10 avr,2002

[28]: OUAkli Hanane, conception et réalisation d'une machine d'enroulement filamenteuse, mémoire de master, ENP. 2015

[29] : <http://www.cadfil.com/filamentwinding.html>

[30] : <https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiY0NTy3sPbAhVM8RQKHU0rBQsQFgg0MAU&url=https%3A%2F%2Fwww.fose1.plymouth.ac.uk%2Fsme%2Fmats347%2FPowerPoint%2FMATS347C9%2520FWpult.ppt&usg=AOvVaw1PvLz7Lrd2H-RANJfGSX-l>,page10

[31]: sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjHnqKQ3cPbAhUG7BQKHfohDcsQFggrMAA&url=http%3A%2F%2Fusers.tamuk.edu%2Fkfldp00%2FMEIE_Peel_website%2FCourses%2FMEEN3349%2Fch15.ppt&usg=AOvVaw2OcVB9I1x2YlhwFmTkqAyG,page 36

[32]: Lyes Douadji. TRAITEMENT THERMIQUE UNIFORME DES COMPOSITES NON METALLIQUES AU MOYEN DE L’EFFET DIELECTRIQUE DE L’INVERSION DE L’ATTENUATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES, THÈSE pour obtenir le grade de Docteur, l’École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers BORDEAUX vendredi 29 juin 2007