

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique

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

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème

**Elaboration des tubes biocomposites par
la technique d'enroulement filamentaire
et leurs caractérisations**

Présenté par :
CHEGHIB Abdelhak

Sous la direction de :
Pr. BEZAZI Abderrezak
Mr. BETTAYEB Mohammed

Année universitaire: 2022/2023

Remerciements

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

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

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

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

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

Cheghib Abdelhak





Dédicaces

A tous ceux qui ont de loin ou de près contribués à ce travail

A tous ceux qui m'ont encouragé soutenus et aidés

A mes parents

A mes frères et sœurs

A mes proches

A mes amis

A mes professeurs

A mes collègues

A ceux qui malgré la distance ont toujours été le présent par leur apport moral

Merci à tous et à toute

Cheghib abdelhak



Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	1
Introduction générale	4
<i>Généralité sur les matériaux composites et état de l'art</i>	
1.1 Introduction	7
1.2 Définition du matériau composite	7
1.3 Classification des matériaux composites	7
1.3.1 Les renforts	7
1.3.2 Les matrices	10
1.3.3 Les charges	11
1.4 Avantages et les inconvénients des matériaux composites	12
1.5 Structure des matériaux composites	13
1.5.1 Les monocouches	13
1.5.2 Les stratifiés	13
1.6 Techniques d'élaboration des matériaux composites	15
1.6.1 Moulage sans pression	15
1.6.2 Moulage par injection de résine	16
1.6.3 Moulage par compression à froid	17
1.6.4 Enroulement filamentaire	18
1.7 Polymérisation	20
1.8 Etat de l'art	21
1.7 Polymérisation	35
<i>Chapitre II : Élaboration et leur protocole de caractérisation mécanique</i>	
2.1 Introduction	37
2.2 Description de la machine	37
2.3 Elaboration des tubes composites et leur découpe en éprouvettes.	41
2.3.1 Elaboration des tubes composites	41
2.3.2 Préparation des éprouvettes	44
2.4 Tests de caractérisation mécanique	48
2.4.1 Essai de résilience	49
2.4.2 Essai de flexion 3-points	50
2.5 Conclusion	53
<i>Chapitre III : Résultats et discussion</i>	
3.1 Introduction	55
3.2 Essai de résilience	55
3.3 Essai de flexion	68
3.4 Conclusion	82
Conclusion générale	84
Références Bibliographiques	86

Liste des figures

<i>Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites</i>	<i>Page</i>
Figure 1.1 : Constituants de base d'un matériau composite	7
Figure 1.2 : Classification des types de renfort les plus utilisés.	8
Figure 1.3: Classification simplifiée des fibres naturelles en fonction de leur origine avec des exemples	10
Figure 1.4 : Types de matrice les plus utilisées.	10
Figure 1.5: Exemple de charges : a) Poudre de silice ; b) les particules de céramique.	12
Figure 1.6 : Monocouche.	13
Figure 1.7: Les constituants d'un composite stratifié.	14
Figure 1.8 : Désignation d'un stratifié.	14
Figure 1.9 : Stratifié à pli angulaire est $[-40 / \pm 40 / 40]$.	15
Figure 1.10: stratifié antisymétrique $[45/\pm 60/-45]$.	15
Figure 1.11: Principe du moulage au contact	16
Figure 1.12: Schéma de principe du moulage par injection de résine	17
Figure 1.13: Principe du moulage par compression à froid	17
Figure 1.14: Procédé de fabrication des structures composites par enroulement filamentaire.	18
Figure 1.15: Différents types de dépose de la nappe par enroulement filamentaire.	19
Figure 1.16 : Phases de polymérisation.	21
Figure 1.17 : Extraction d'une cellule unitaire contenant la matrice de fissuration d'un stratifié composite soumis à une charge de flexion.	22
Figure 1.18 : Comparaison des variations de propriétés dans les stratifiés à plis croisés	22
Figure 1.19 : Comparaison des propriétés dans les stratifiés hors axe.	22
Figure 1.20 : Force F en fonction de la contrainte réduite σ_R pour les stratifiés étudiés	23
Figure. 1.21: Comparaison de la formation de fissures matricielles dans des stratifiés composites à plis croisés soumis à une flexion en trois points	23
Figure 1.22 : Dispositif expérimental : a) instrument d'essai d'impact Charpy, b) position de l'échantillon sur la machine pour l'essai d'impact.	24
Figure 1.23: Spécimen testé avec différentes structures de stratification : a) spécimen Type-E ₁ , b) spécimen Type-C ₂	26
Figure 1.24: Compression radiale et de traction circonférentielle	27
Figure 1.25: Module d'élasticité en fonction de l'orientation des fibres sous une charge de (a) compression radiale, (b) traction circonférentielle	28
Figure. 1.26: Réponse charge-déplacement typique.	29
Figure.1.27 : Réponses charge-déplacement des éprouvettes.	30
Figure 1.28 : Historique charge-déformation du spécimen de tube composite chargé axialement D82-N3-R2.	31
Figure 1.29: : Courbes charge-déplacement d'un tube composite écrasé axialement.	33
Figure.1.30: Courbes de déplacement de charge moyenne pour chaque orientation de fibre et la charge d'écrasement initiale maximale en fonction de l'angle d'orientation des fibres.	34

<i>Chapitre II : Élaboration et leur protocole de caractérisation mécanique</i>	
Figure 2.1 : Machine d'enroulement filamenteuse (LMANM de l'Université 8 Mai 1945 Guelma).	38
Figure 2.2 : Différentes parties de la machine d'enroulement filamenteuse utilisée (LMANM de l'Université 8 Mai 1945 Guelma).	40
Figure 2.3 : Préparation de résine polyester.	43
Figure 2.4 : Tubes composite élaborés par la: a) résine 1 et b) résine 2.	44
Figure 2.5: Machine de découpe à disque de diamanté.	45
Figure 2.6: Découpe des tubes en éprouvettes pour les tests de résilience et de flexion de résine 1.	46
Figure 2.7: Découpe des tubes en éprouvettes pour les tests de résilience et de flexion de résine 2.	47
Figure 2.8: Exemple d'éprouvettes découpées pour les tests de résilience et de flexion.	48
Figure 2.9 : Mouton pendule rotatif type PHYWE.17558.01.	49
Figure 2.10. Machine de flexion Walter & Bai.	52
<i>Chapitre III : Résultats et discussions</i>	
Figure 3.1 : Faciès de ruptures des éprouvettes 1 et 4 et 3 impactées respectivement à leur faces intérieure, extérieure et latérale.	58
Figure 3.2 : Faciès de rupture des éprouvettes 3, 3 et 2 impactées respectivement à leurs surfaces extérieures, intérieures et latérales de leur face.	61
Figure 3.3 : Faciès de rupture des éprouvettes 1, 1 et 4 impactée respectivement à leurs surfaces extérieures, intérieure et latérale.	64
Figure 3.4 : Faciès de rupture des éprouvettes 4, 5 et 1 impactée respectivement à leurs surfaces extérieur, intérieur et latérale .	67
Figure 3.5 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes concaves testés en flexion 3-points.	69
Figure 3.6 : Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes concaves testés en flexion 3-points.	69
Figure 3.7: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborés à partir de la résine 1 puis testées en flexion 3-points.	70
Figure 3.8: Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborés à partir de la résine 1 puis testées en flexion 3-points.	71
Figure 3.9: Faciès de rupture des éprouvettes concave (éprouvette 1), convexe (éprouvette 3) testées en flexion 3-points).	74
Figure 3.10 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes concaves élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.	76
Figure 3.11: Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes concaves élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.	76
Figure 3.12: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.	77
Figure 3.13: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.	78
Figure 3.14: faciès de rupture des éprouvettes sous forme concave (Eprouvette 1), convexe (Eprouvette 3).	81

Liste des Tableaux

<i>Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites et état de l'art</i>	<i>Page</i>
Tableau 1.1 Propriétés mécaniques des différentes fibres	9
Tableau 1.2 : configuration des tubes	27
<i>Chapitre III : Résultats et discussions</i>	
Tableaux 3.1 : Résultats de Charpy EDTTR1 impactés à leurs faces externes, internes et latérale.	55
Tableau 3.2 : Résultats de Charpy des EDTTR2 impactées à leurs faces internes et externes, latérale.	59
Tableau 3.3 : Résultats de Charpy des EDLTR1 impactés à leurs faces externes, internes et latérales.	62
Tableaux 3.4 : Résultats obtenus par les essais de Charpy des EDLTR2.	65
Tableau 3.5: Dimension des éprouvettes élaborés à partir de la résine polyester 1.	68
Tableau 3.6 : Résultats obtenus des tests de flexion des éprouvettes concave et convexe élaborées à partir de la résine 1.	71
Tableau 3.7: Dimensions des éprouvettes élaborées par résine polyester 2.	75
Tableau 3.8: Résultats obtenus des tests de flexion des éprouvettes concave et convexe élaborées à partir de la résine 1.	78

Résumé

La présente étude menée au Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l'Université 8 Mai 1945 à Guelma, concerne l'élaboration de tubes composites, à partir deux résines polyester, par une machine d'enroulement filamentaire à deux axes. Ces tubes, ont un diamètre intérieur de 90 mm, étaient constitués de quatre couches disposées selon séquence d'empilement $[90/\pm 55/90]$. Ces tubes ont été découpés dans leur sens axial et radial en éprouvettes selon les normes ASTM D6110-04 et ASTM D790-17 pour être testés respectivement par des essais de résilience (Charpy) et flexion 3-points. L'analyse des résultats obtenus montre que les éprouvettes découpées des tubes fabriqués à partir de la résine polyester 2 possèdent des énergies d'impact (résilience) et des contraintes de flexion plus élevée que celles obtenues à partir de résine 1. Les tubes composites étudiés trouvent leurs utilisations dans divers secteurs tels que les canalisations de transport de gaz, d'hydrocarbure, d'hydrogène, station de dessalement de l'eau de mer, les eaux usées etc.

Abstract

The present study carried out at the Laboratory of Applied Mechanics of New Materials (LMANM) of the University 8 May 1945 Guelma, concerns the development of composite tubes, based on two polyester resins, using a filament-winding machine having two axes. These tubes, with an internal diameter of 90 mm, consisted of four layers arranged in a stacking sequence $[90/\pm 55/90]$. These tubes were cut in their axial and radial directions into specimens according to the ASTM D6110-04 and ASTM D790-17 standards to be tested by impact (Charpy) and 3-point bending, respectively. The analysis of the results obtained shows that the specimens cut from tubes made from polyester resin 2 have impact energies (resilience) and bending stresses higher than those obtained from resin 1. The composite tubes studied find their

uses in various sectors such as pipelines for the transport of gas, hydrocarbons, hydrogen, seawater desalination stations, wastewater, etc.

ملخص

أجريت الدراسة الحالية في مختبر الميكانيكا التطبيقية للمواد الجديدة (LMANM) بجامعة 8 مايو 1945 في قالة ، حيث تتعلق بتطوير أنابيب مركبة من نوعين من الراتنج بوليستر، استخدمت آلة لف خيوط ذات محورين في تصنيع هذه الأنابيب المتكونة من أربع طبقات ذات التكديس التالي $[90 / \pm 55 / 90]$ ، و قطر داخلي 90 مم ، تم قطع هذه الأنابيب في اتجاهها المحوري والشعاعي إلى عينات وفقاً لمعيار ASTM D6110-04 و ASTM D790-17 ليتم اختبارها على التوالي عن طريق اختبارات التأثير (Charpy) والانحناء بثلاث نقاط. وضح تحليل النتائج التي تم الحصول عليها أن العينات المقطوعة من الأنابيب المصنوعة من راتنج البوليستر 2 لها طاقات تأثير (مرونة) وضغوط الانحناء أعلى من تلك التي تم الحصول عليها من الراتنج 1. توجد هذه الأنابيب المركبة التي تمت دراستها في قطاعات مختلفة مثل خطوط الأنابيب لنقل الغاز ، الهيدروكربونات ، الهيدروجين ، محطات تحلية مياه البحر ، مياه الصرف الصحي ، إلخ.

Introduction générale

Introduction générale

Le besoin croissant dans l'industrie a incité les ingénieurs et les chercheurs du monde entier à remplacer les matériaux traditionnels par de nouveaux matériaux capables de résister à des conditions extrêmes. Pour créer des structures suffisamment résilientes aux dommages, les chercheurs ont consacré de nombreux efforts à la conception de nouveaux matériaux composites présentant des caractéristiques très intéressantes telles que : rigidité élevée, une grande résistance mécanique, une ténacité élevée, une bonne résistance à la fatigue, une légèreté remarquable et la possibilité d'adaptation selon les besoins spécifiques.

Dans le domaine du transport des produits liquides et gazeux, les tubes fabriqués en acier jouent un rôle crucial. Cependant, ces tubes ont été confrontés à divers problèmes tels que la rouille, l'instabilité et la dislocation, entraînant des conséquences graves et exige des entretiens fréquents et coûteux pour les installations industrielles et les réseaux de transport. C'est la raison pour laquelle les compagnies pétrolières exigent désormais des tubes composites plus performants, capables de surmonter ces défis.

Les tubes en matériaux composites, offrant diverses propriétés plus intéressantes que ceux des tubes en acier en raison de leur : légèreté, prix de revient plus faible, excellente résistance à la corrosion, ne nécessitant pas d'entretien fréquent, bonnes propriétés mécaniques et durée de vie plus élevées. Ces tubes sont fabriqués en utilisant la technique de l'enroulement filamentaire.

Les travaux développés dans le cadre de ce mémoire de master sont structurés en trois chapitres et une introduction et conclusion générale comme suit :

Le premier chapitre de l'étude bibliographique consacré à la présentation des matériaux composites, leurs constituants et quelques méthodes de leurs élaborations. En premier lieu des informations générales sont données sur les matériaux composites tel que leur : définition, classification, avantages et les inconvénients des renforts, les matrices, les charges etc. Ensuite, nous examinons les différentes formes des matériaux composites, notamment les monocouches, les stratifiés et les techniques de leur élaboration et de leur mise en forme. Enfin, nous présentons un modeste état de l'art sur les études précédentes menées sur les tubes en matériaux composites.

Le deuxième chapitre se focalise sur la description des composants utilisés dans les composites, le processus d'élaboration des tubes composites par la technique d'enroulement filamentaire, leurs coupes, dans le sens transversal et axial, en éprouvettes respectivement selon les normes ASTM D6110 et ASTM D790 et les conditions de leurs tests en résilience (Charpy) et de flexion 3-points.

L'analyse approfondie des résultats expérimentaux des tests de résilience et flexion 3-points des éprouvettes découpées de tubes composites élaborées à partir de deux résines polyester constitue le troisième chapitre. Une comparaison est effectuée et discutée sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes découpées des deux types de tubes composites élaborés et ayant l'empilement $[90/\pm 55/90]$ en utilisant deux résines 1 et 2.

Chapitre I :
Généralité sur les matériaux
composites et état de l'art

1.1 Introduction

Actuellement, les industriels montrent un intérêt croissant pour l'incorporation de pièces composites dans leurs projets, que ce soit dans les secteurs de la construction de canalisations, de l'aérospatiale, du naval, du ferroviaire ou des équipements sportifs. Dans ce chapitre, nous exposons les définitions et les diverses techniques de fabrication des matériaux composites, ainsi qu'une l'état de l'art concernant les tubes en matériaux composites par la technique d'enroulement filamentaire.

1.2 Définition du matériau composite

De manière générale, un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux différents, dont les propriétés sont améliorées dans l'assemblage final par rapport à celles des matériaux individuels (Figure 1.1). Les "matériaux composites" actuels font référence à des arrangements de renforts immergés dans une matrice de résistance mécanique inférieure. L'interface entre le renfort et la matrice est une zone de liaison. Ces matériaux composites sont souvent hétérogènes et anisotropes [1].

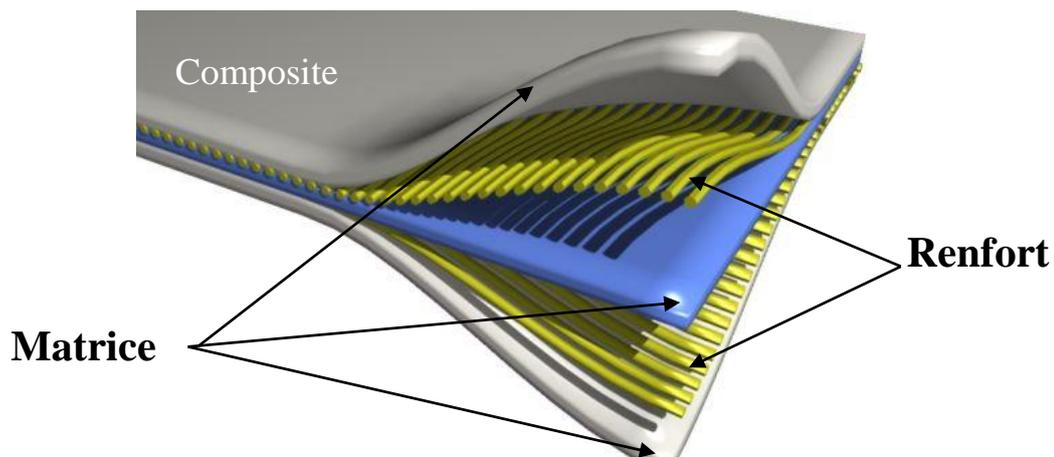


Figure 1.1 : Constituants de base d'un matériau composite

1.3 Classification des matériaux composites

Comme indiqué dans la définition des composites, ces matériaux sont constitués d'une matrice et d'un renfort. Il est possible de classer les composites en différents types, en fonction de la matrice et du renfort utilisés.

1.3.1 Les renforts

Les propriétés mécaniques du matériau composite sont assurées par les renforts, pour lesquels il existe un large choix de fibres disponibles sur le marché. Le choix des fibres

dépendra des coûts recherchés pour la structure finale. Les renforts en fibres se présentent sous différentes formes, notamment linéaires (fils, mèches), surfaciques (tissus bidirectionnel, mats) et multidirectionnelles (tresse, tissus complexes, tissage tri-directionnel ou plus) [2]. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1.2.

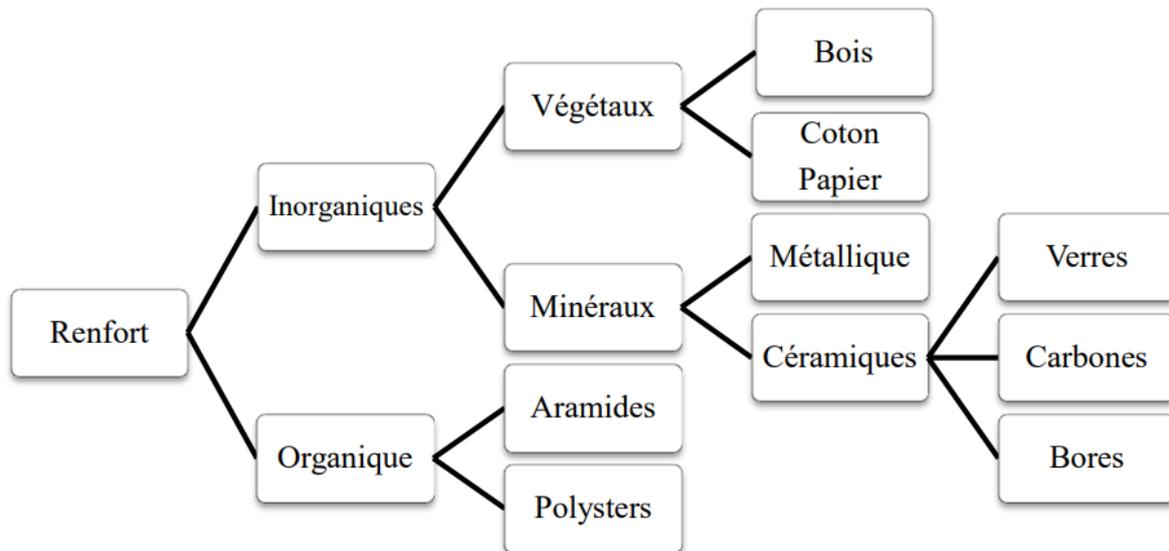


Figure 1.2 : Classification des types de renfort les plus utilisés.

a) Les fibres naturelles

Depuis 3000 ans, les fibres naturelles ont été utilisées dans la fabrication de composites. Par exemple, en Égypte ancienne, la paille et l'argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont suscité un intérêt croissant, tant dans le monde universitaire que dans diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles pouvant être utilisées comme renfort ou comme charge. Ces fibres comprennent des fibres organiques d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique), ainsi que des fibres minérales telles que l'amiante, regroupées sous le terme "fibres naturelles". Ces fibres sont biodégradables, renouvelables et sont très intéressantes comme renfort dans les matériaux composites. Bien qu'elles n'aient pas les mêmes propriétés mécaniques que les fibres artificielles, les fibres naturelles restent très efficaces dans certaines applications spécifiques.

Sur le plan purement mécanique, les fibres artificielles présentent un grand intérêt car leurs propriétés en flexion, en traction et en résistance aux chocs sont généralement supérieures

à celles des autres types de fibres. Toutefois, dans certaines applications, telles que l'emballage, l'objectif est d'obtenir un matériau suffisamment résistant sans qu'il soit nécessairement le meilleur choix en termes de fibres, il s'agit de trouver un équilibre entre des propriétés mécaniques satisfaisantes et des coûts réduits. Les fibres naturelles peuvent alors être plus intéressantes que les fibres artificielles, car elles sont moins coûteuses. De plus, les considérations environnementales sont également importantes. Les fibres naturelles ont généralement un impact environnemental nettement inférieur à celui des fibres artificielles en termes de bilan CO₂, de consommation d'énergie, de biodégradabilité et de dommages infligés aux équipements de mise en forme, contrairement aux fibres de verre ou de carbone [3].

D'après le tableau 1.1 qui présente quelques caractéristiques de ces fibres artificielles et naturelles, ces derniers se défendent très bien et peuvent même rivaliser avec les fibres artificielles.

Tableau 1.1 Propriétés mécaniques des différentes fibres [3].

Fibres	Masse volumique (g/cm ³)	Diamètre (µm)	Module de traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Elongation à la rupture (%)
Jute	1,3-1,45	20-200	393-373	13-26,5	7,1-8
Lin	1,5-3	-	45-1100	27,6	2,7-3,2
Chanvre	-	-	690	-	1,6
Ramie	1,5	-	400-938	61,4-128	1,2-3,8
Sisal	1,45	50,200	468-640	9,4-22	3,1-7
Palme	-	20-80	413-1627	34,5-82,51	1,6
Coton	1,5-1,6	-	287-800	5,5-12,6	7,1-8
Coir	1,15	100-450	131-175	4,1-6	15-40
Fibres de verre	2,5	-	2000-3500	70	2,5
Fibres d'acier	2,5	-	4570	86	2,8
Aramide	1,4	-	3000-3150	63-67	3,3-3,7
Fibres de carbone	1,7	-	4000	230-240	1,4-1,8

Les fibres naturelles sont des substances filamenteuses dérivées de plantes et d'animaux. Elles peuvent être filées et transformées en fils et cordes. Leur tissage tricoté ou tressé permet d'obtenir des tissus idéaux pour l'habillement et la maison, mais également des matériaux de couverture et d'isolation pour le bâtiment.

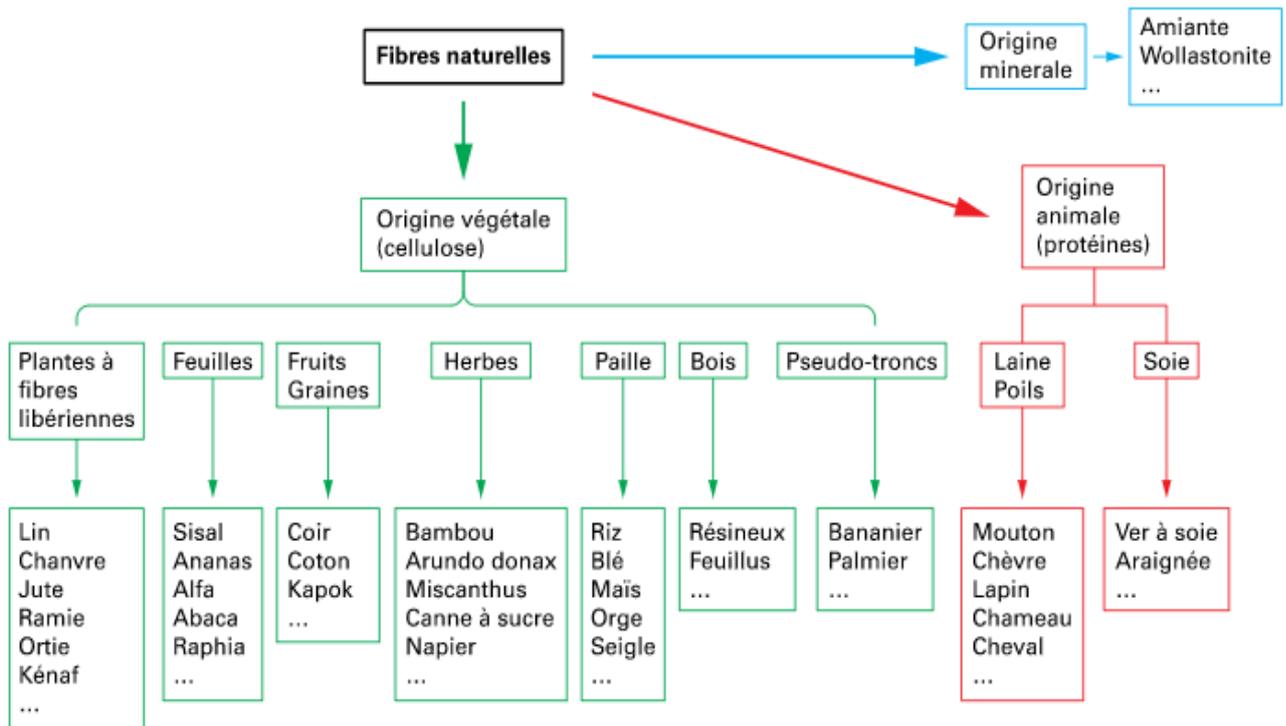


Figure 1.3 - Classification simplifiée des fibres naturelles en fonction de leur origine avec des exemples [4].

1.3.2 Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, d'assurer une répartition spatiale homogène des renforts, transmettre aux renforts les efforts extérieurs et de les répartir, apporter la tenue chimique de la structure et de donner la forme désirée au produit. Les types de matrices les plus utilisées sont classées dans la Figure 1.4.

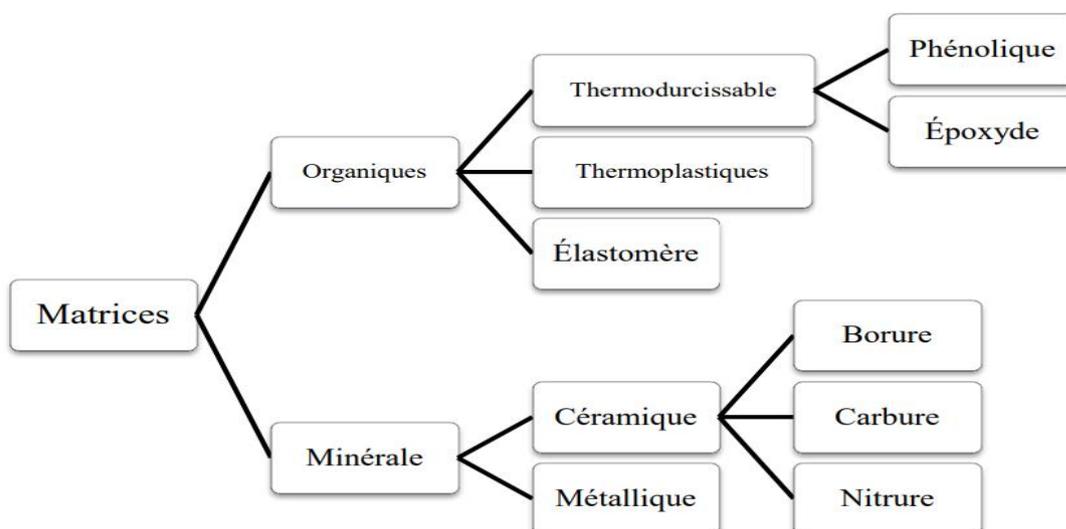


Figure 1.4 : Types de matrice les plus utilisées.

a) Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556 [1].

b) Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B [2].

1.3.3 Les charges

Le terme "charge" fait référence à toute substance inerte, minérale ou végétale qui peut être ajoutée à un polymère de base pour modifier de manière significative ses propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, améliorer son apparence ou simplement réduire son coût (Figure 1.5). Contrairement aux matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables contiennent généralement des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en masse.

Pour un polymère donné, le choix de la charge dépend des modifications recherchées pour l'objet fini. Cependant, en général, les substances utilisées comme charges pour les matières plastiques doivent répondre à un certain nombre de critères, tels que la compatibilité avec la résine de base, la capacité à être mouillées par la résine, une granulométrie uniforme, une faible abrasivité et un coût raisonnable [5].

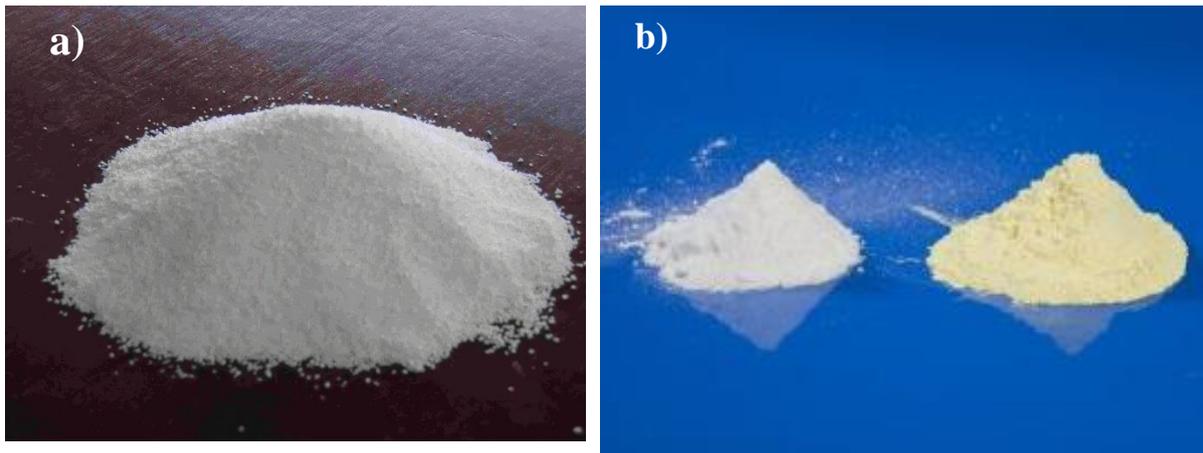


Figure 1.5: Exemple de charges : a) Poudre de silice ; b) les particules de céramique.

1.4 Avantages et les inconvénients des matériaux composites

Les matériaux composites possèdent les principaux avantages suivant :

- ✓ Gain de masse ;
- ✓ Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) ;
- ✓ Réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures) ;
- ✓ Grande résistance à la fatigue ;
- ✓ Faible vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur ;
- ✓ Résistance à la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone) ;
- ✓ Insensibles aux produits chimiques comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole etc. ;
- ✓ Les bio composites sont également biodégradables et faiblement nocifs à l'environnement [6].

Les principaux inconvénients des composites sont :

- ✓ Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métaux ;
- ✓ Tenue au feu moins bonne (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices ;
- ✓ Coût faible compétitif parfois (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries ;
- ✓ Pas de recyclage satisfaisant [6].

1.5 Structure des matériaux composites

Il est possible de classer les structures des matériaux composites en trois catégories distinctes :

- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwiches.

1.5.1 Les monocouches

La structure composite repose sur les monocouches ou plis qui en constituent l'élément de base (Figure 1.6). Les monocouches peuvent être de différents types, notamment à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes, selon la forme du renfort. Cependant, les caractéristiques mécaniques de rigidité et de résistance des couches utilisées ne permettent pas leur utilisation individuelle en raison de leur forte anisotropie de réponse élastique, de leur faible résistance en direction transversale et de leur faible épaisseur, qui entraîne un risque d'instabilité à la compression. Pour cette raison, les couches de composite sont généralement superposées pour former des stratifiés, qui sont souvent constitués de plis identiques [7, 8].

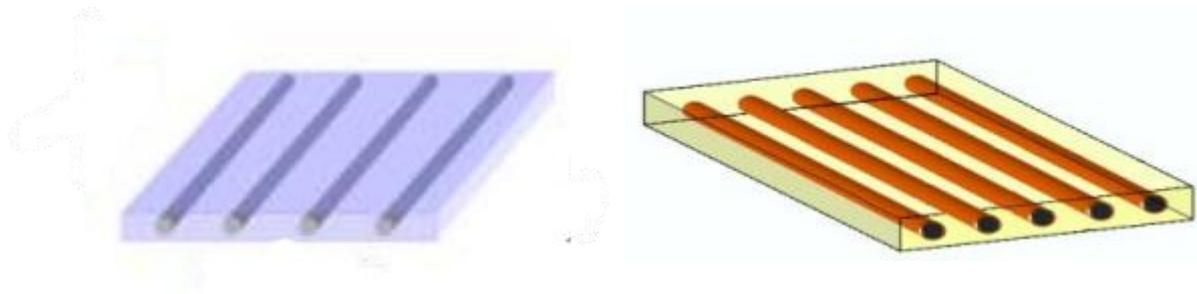


Figure 1.6 : Monocouche.

1.5.2 Les stratifiés

Les stratifiés sont fabriqués en superposant plusieurs couches ou plis de nappes unidirectionnelles, de tissus ou de mats imprégnés de résine, chacune ayant une orientation

propre. Cette méthode de superposition permet de créer des plaques dont les caractéristiques mécaniques, de rigidité et de résistance, peuvent être conçues selon les besoins spécifiques. Les couches unidirectionnelles sont orientées différemment d'une couche à l'autre pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale, comme illustré dans la figure 1.7 [9].

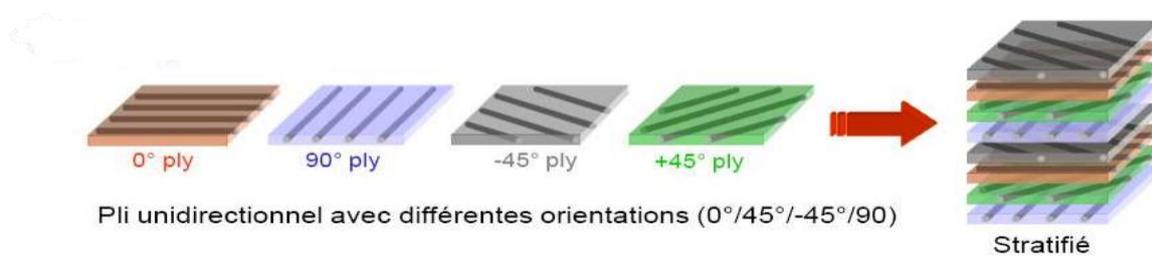


Figure 1.7: Les constituants d'un composite stratifié.

La désignation de ces stratifiés, exemple Figure 1.8, 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 ;
- Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents ;
- Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique ;
- Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre ;
- Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

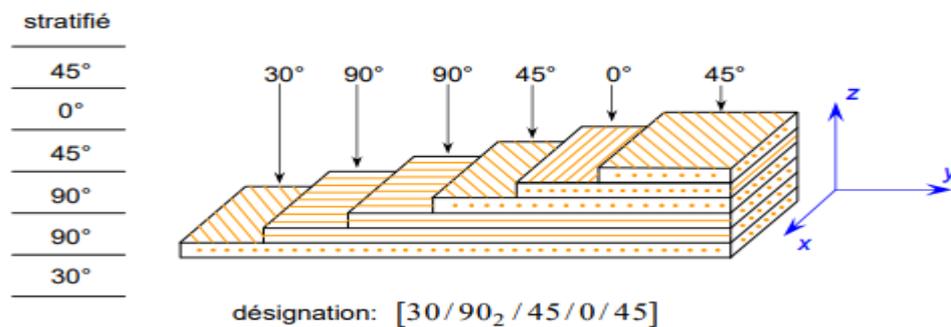


Figure 1.8 : Désignation d'un stratifié.

a) Stratifiés à angle

Un stratifié est appelé stratifié à couches d'angle s'il a des couches du même matériau et de la même épaisseur et orientées uniquement dans les directions $+\theta$ et $-\theta$. Un exemple de

stratifié à pli angulaire est $[-40 / 40 / -40 / 40]$ présenté en figure 1.9.

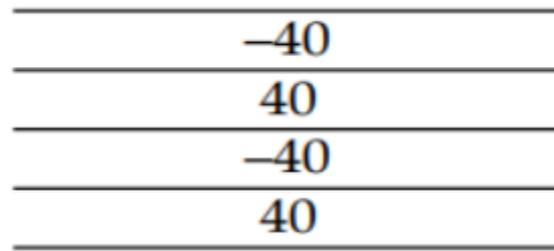


Figure 1.9 : Stratifié à pli angulaire est $[-40 / \pm 40 / 40]$.

b) Stratifiés antisymétriques

Un stratifié est appelé antisymétrique si le matériau et l'épaisseur des couches sont identiques au-dessus et au-dessous du plan médian, mais que les orientations des couches à la même distance au-dessus et au-dessous du plan médian sont négatives [10]. Un exemple de stratifié antisymétrique est (Figure 1.10) :

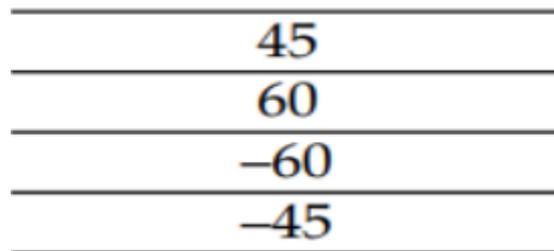


Figure 1.10: stratifié antisymétrique $[45/\pm 60/-45]$.

1.6 Techniques d'élaboration des matériaux composites

Il existe plusieurs techniques pour fabriquer des pièces en composite, qui dépendent de la combinaison de la matrice et de la fibre souhaitée. Dans cette section du cours, nous allons présenter quelques-unes des méthodes utilisées pour produire des matériaux composites avec une matrice organique renforcée par des fibres.

1.6.1 Moulage sans pression

Les méthodes de moulage à froid sans presse sont simples et économiques, ce qui a contribué au succès des composites en fibres de verre dans l'industrie et l'artisanat. Ces

méthodes permettent de produire des pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de forme ou de dimension, mais avec une proportion limitée de fibres. La qualité de la pièce dépend fortement du savoir-faire du mouleur et les pièces ont une seule face lisse qui reproduit l'aspect du moule.

Le moulage au contact ou la stratification au contact est une méthode entièrement manuelle utilisée pour façonner des plastiques renforcés, sans l'application de chaleur ni de pression, à température ambiante (Figure 1.11). Ce type de moulage est effectué selon les opérations suivantes [1] :

- ✓ Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau ;
- ✓ Le renfort est disposé dans le moule ;
- ✓ Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé ;
- ✓ Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées en utilisant les mêmes techniques ;
- ✓ Le démoulage est ensuite effectué ;
- ✓ La polymérisation est ensuite effectuée soit au milieu ambiant en en étuve ;
- ✓ Finition de la pièce (ébarbage, ponçage, peinture...)

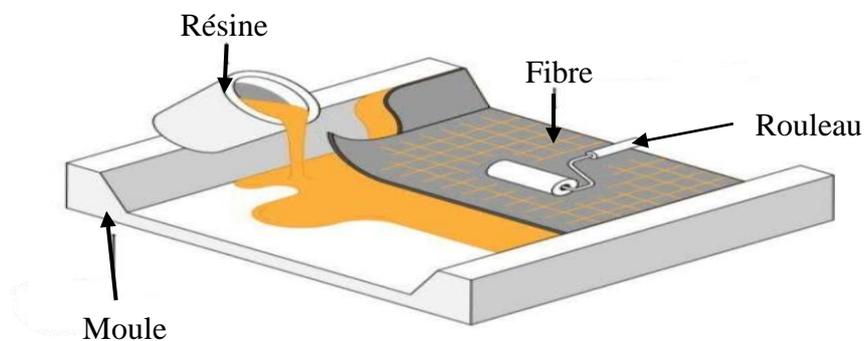


Figure 1.11: Principe du moulage au contact [1].

1.6.2 Moulage par injection de résine

Le moulage permet de saturer un renfort placé dans un ensemble moule et contre-moule fermé et très rigide. Ce processus est automatisé et élimine la nécessité de manipuler la résine. En raison de la capacité à utiliser une proportion élevée de renfort, les pièces produites ont des

caractéristiques mécaniques supérieures. La figure 1.12 présente un schéma représentatif de ce processus de moulage par injection. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

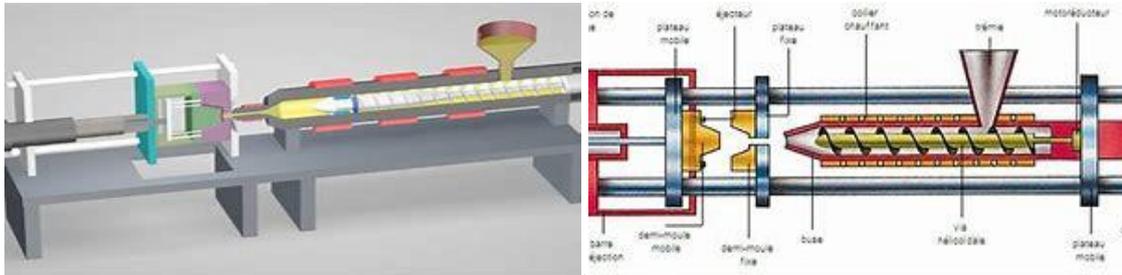


Figure 1.12: Schéma de principe du moulage par injection de résine [1].

1.6.3 Moulage par compression à froid

Le moulage est réalisé à basse pression (< 5 bars) et sans chauffage du moule (Figure 1.13). La chaleur dégagée par le processus de moulage est suffisante pour maintenir le moule à une température constante comprise entre 50 et 70 °C pendant le fonctionnement continu. Avant la mise en place du renfort et de la matrice, le moule et le contre-moule sont recouverts d'un agent de démoulage et d'un Gel-coat. Une fois que les renforts et la matrice sont déposés sur le moule, l'ensemble moule/contre-moule est fermé et comprimé. Le temps de polymérisation est déterminé par le type de résine, le catalyseur et la température atteinte par le moule pendant la production continue [1]

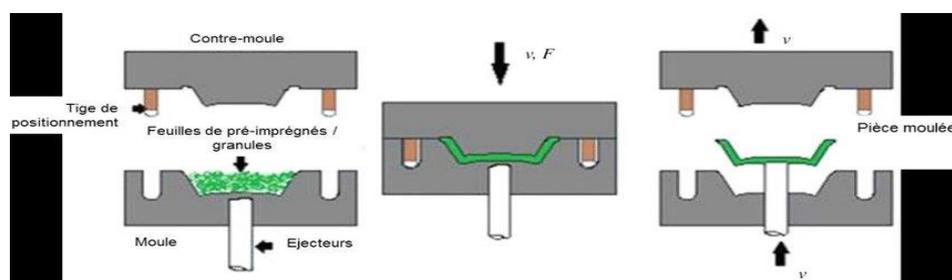


Figure 1.13: Principe du moulage par compression à froid [1].

1.6.4 Enroulement filamentaire

Cette méthode implique l'utilisation d'une tête de dépôt pour bobiner une nappe de fibres de renfort imprégnées de résine sur un liner polymère en rotation autour d'un axe fixe (Figure 1.14). En ajustant la vitesse de rotation du mandrin, l'orientation et la vitesse du bras, il est possible d'obtenir différentes couches composites avec différents types d'enroulement (orientation de la fibre par rapport à son axe de rotation) grâce à un mouvement d'aller-retour [6].

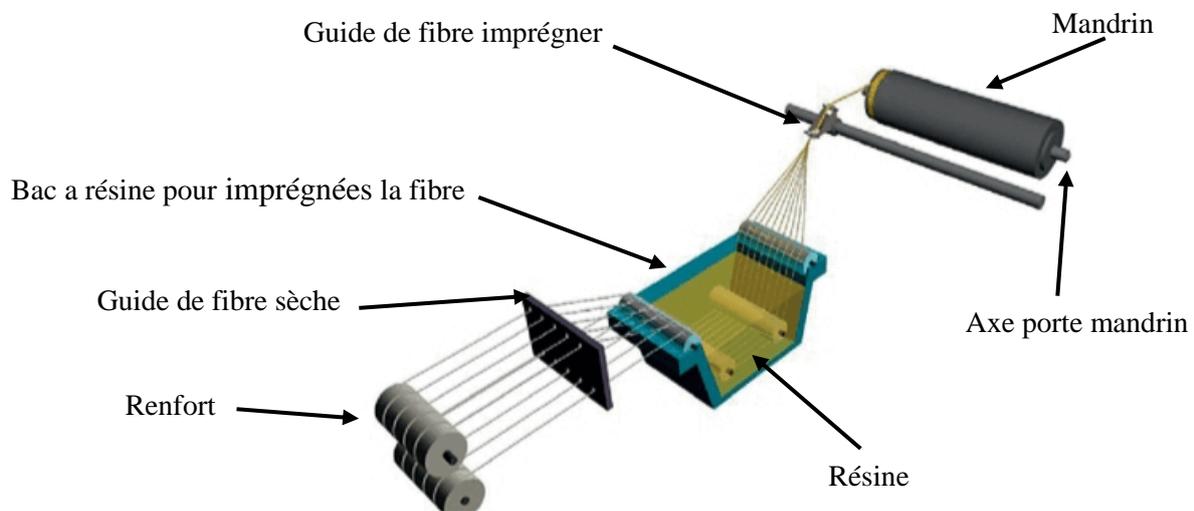


Figure 1.14: Procédé de fabrication des structures composites par enroulement filamentaire.

On distingue trois types d'enroulement pour les tubes (Figure 1.15) l'enroulement « circonférentiel », pour lequel le renfort fait un angle d'environ 90° avec l'axe de rotation du mandrin, l'enroulement « polaire » utilisé pour le bobinage de sphère et de tubes et enfin l'enroulement « hélicoïdal ou hélicoïdal croisé ». Ce dernier permet d'ajuster l'angle des renforts par rapport à l'axe de la structure en fonction des caractéristiques mécaniques désirée.

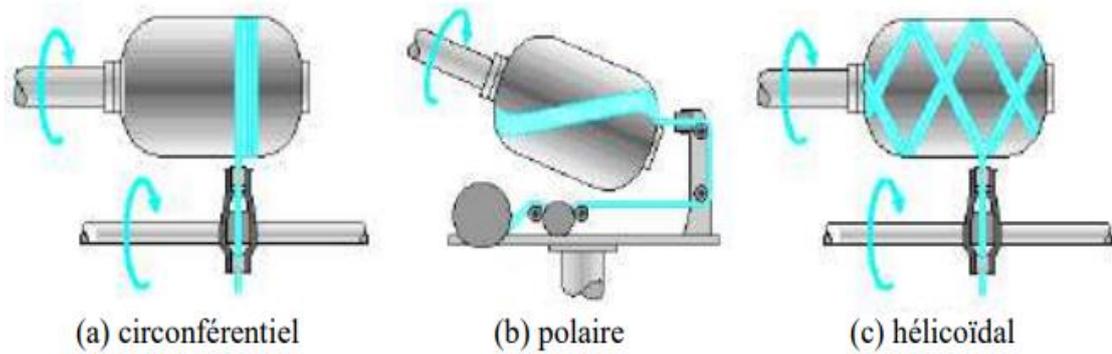


Figure 1.15: Différents types de dépose de la nappe par enroulement filamentaire.

Ce bobinage conduit à une structure composite stratifiée équilibrée du type $90^\circ/\pm\theta$ par rapport à l'axe du réservoir. Les couches à 90° sont destinées à reprendre les efforts transversaux induits par la pression interne sur les parois tubulaires alors que les couches croisées reprennent principalement les efforts longitudinaux induits par la pression.

a) Applications

L'enroulement filamentaire est couramment utilisé pour produire des pièces de forme symétrique de révolution telles que des tubes, des réservoirs, des bouteilles de gaz, des enveloppes cylindriques (fusées ou missiles), des pales d'hélicoptères et de turbines, des cannes à pêche, des bâtons de golf, des fuselages d'avions et des canalisations. Le procédé permet également la fabrication de pièces de grandes dimensions telles que des conteneurs et des silos, mais la taille des pièces est limitée par le type de machine utilisée. Une des forces de l'enroulement filamentaire est la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Bien que le procédé soit généralement associé à la production de pièces de forme symétrique de révolution, il peut également être appliqué à la fabrication de pièces sans symétrie de révolution telles que des pales d'hélicoptères et de turbines, des réservoirs à sections rectangulaires, etc.

De nos jours, l'enroulement filamentaire trouve des applications dans d'autres secteurs tels que les produits composites de l'ingénierie complexes, non sphériques et non cylindriques, grâce à l'utilisation de machines et de logiciels sophistiqués.

Ce procédé fiable et relativement rapide, tout en pouvant être automatisé est particulièrement adapté pour la fabrication de pièces exigeant des tolérances précises.

b) Avantages et inconvénients

Les principaux avantages :

- ✓ Productions en série ;
- ✓ Le procédé permet également l'orientation des fibres dans une direction spécifique ;
- ✓ Caractéristiques mécaniques remarquables en termes de résistance et de rigidité ;
- ✓ Grande productivité.

Les principaux inconvénients :

- ✓ Le procédé présente un investissement en capital relativement important ;
- ✓ Il nécessite un contrôle très précis du mécanisme pour la distribution et l'orientation uniforme des fibres ;
- ✓ Non possibilité de modifier la direction des fibres dans une seule couche d'enroulement ;
- ✓ Dans certaines applications, l'utilisation d'un mandrin peut être coûteuse ;
- ✓ Ce procédé ne permet pas de mouler des pièces avec contre-dépouille.

1.7 Polymérisation

Le durcissement des thermodurcissables résulte de la formation de liaisons covalentes entre les chaînes de polymères amorphes de la résine, lors de la polymérisation. Il existe deux types de polymérisation : l'addition et la condensation. La résine époxyde polymérise par addition grâce aux liaisons chimiques avec le durcisseur, tandis que la résine phénolique contenant des molécules d'eau polymérise par condensation en formant de nouveaux liens à l'emplacement de l'eau. Dans les deux cas, la réaction est exothermique se produit en trois phases, comme indiqué dans la figure 1.16.

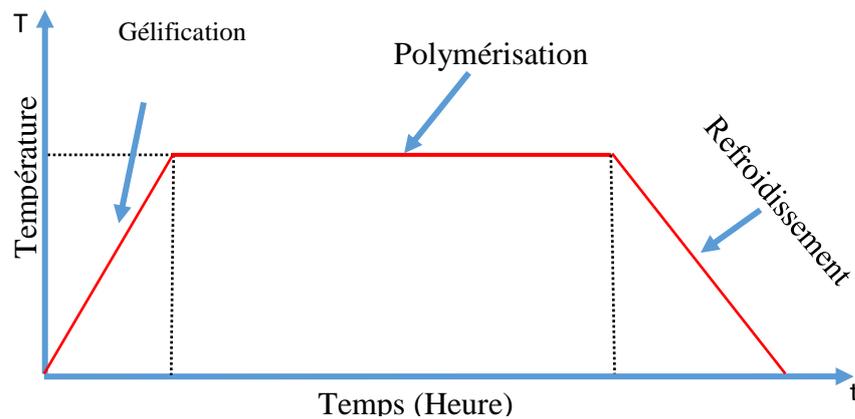


Figure 1.16 : Phases de polymérisation [11].

La première étape du processus est la gélification de la matrice, suivie d'une seconde phase de polymérisation à une température plus élevée qui permet d'atteindre le taux de réticulation souhaité. Enfin, la structure est refroidie.

1.8 Etat de l'art

Farrokhbadi *et al.* [12] ont mené une étude analytique visant à examiner les effets de la formation de fissures de matrice sur les propriétés des stratifiés composites soumis à des charges de flexion (Figure 1.17). Ils ont utilisé un modèle basé sur la densité de fissures, en supposant que les plis sujets à la fissuration de la matrice sont suffisamment minces. Ils ont appliqué les relations de réduction de rigidité dues à la formation de fissures de matrice, puis ont utilisé la lamelle endommagée équivalente et les relations de la théorie des stratifiés classiques (TSC) pour prédire les propriétés des stratifiés composites.

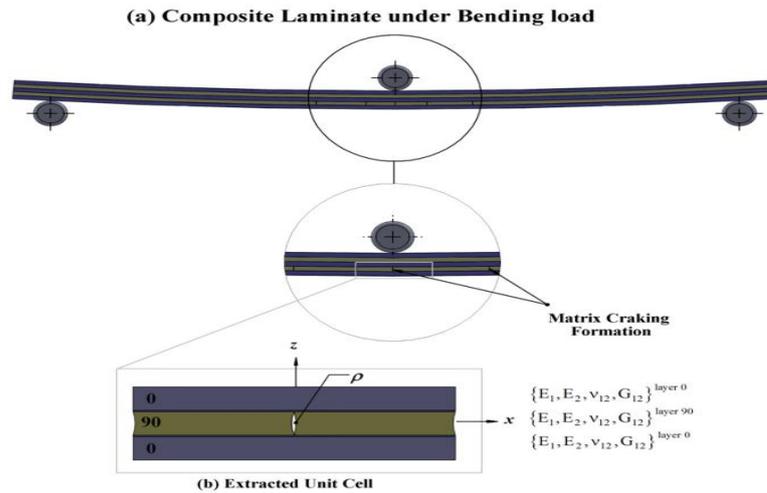


Figure 1.17 : Extraction d'une cellule unitaire contenant la matrice de fissuration d'un stratifié composite soumis à une charge de flexion.

Dans le cas des stratifiés en plis croisés, la réduction du module de flexion est moins importante que dans les laminés hors axes, en ce qui concerne la résistance à la flexion, la Figure 1.18 et la Figure 1.19 montrent que la présence de fissures dans la matrice réduit également la résistance à la flexion, la réduction de la résistance à la flexion est plus importante pour les laminés en plis croisés que pour les laminés hors axes.

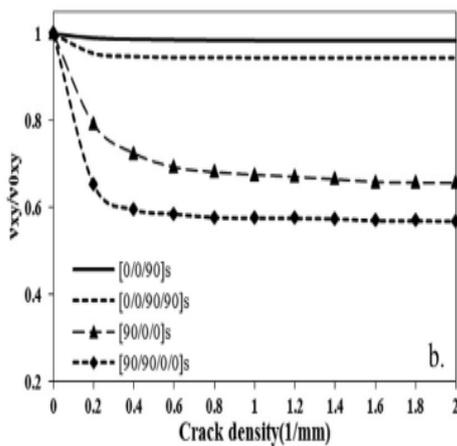


Figure 1.18 : Comparaison des variations de propriétés dans les stratifiés à plis croisés [12].

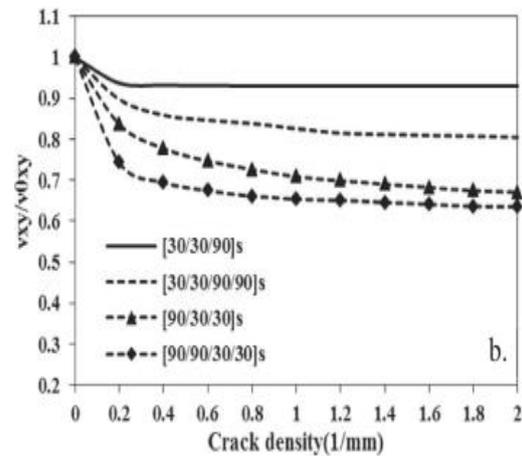


Figure 1.19 : Comparaison des propriétés dans les stratifiés hors axe [12].

La Figure 1.20 illustre la variation de la ténacité à la rupture avec l'augmentation de la densité de fissures dans le stratifié $[0/90_2/0/90_2/0]$ en verre/époxy avec les propriétés

mécaniques de $E_1 = 45,6 \text{ GPa}$, $E_2 = 16,2 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0,278$, $\nu_{23} = 0,4$, $G_{12} = 5,83 \text{ GPa}$, $G_{23} = 5,83 \text{ GPa}$ et $h = 0,25 \text{ mm}$.

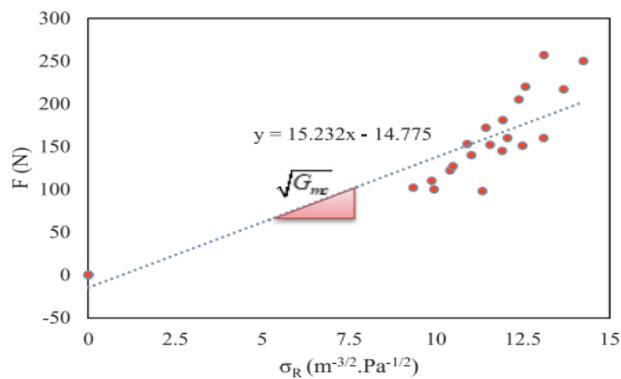


Figure 1.20 : Force F en fonction de la contrainte réduite σ_R pour les stratifiés étudiés [12].

En outre, la Figure 1.21 montre la variation de la ténacité à la rupture avec l'augmentation de la densité de fissures dans le multicouche $[90_2/0_2]_s$ en Carbone-Epoxy avec les propriétés mécaniques de $E_1 = 135 \text{ GPa}$, $E_2 = 9 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0,28$, $\nu_{23} = 0,45$, $G_{12} = 5,38 \text{ GPa}$, $G_{23} = 5,38 \text{ GPa}$ et $h = 1,5 \text{ mm}$.

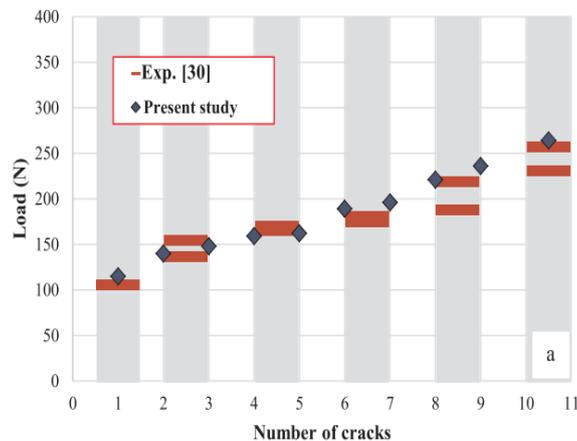


Figure. 1.21: Comparaison de la formation de fissures matricielles dans des stratifiés composites à plis croisés soumis à une flexion en trois points [12].

En conclusion, cette étude propose une méthode analytique pour évaluer les effets des fissures dans la matrice sur les propriétés mécaniques des stratifiés composites. La méthode proposée est validée avec succès en comparant les résultats avec des études précédentes et des résultats expérimentaux. Les variations des propriétés mécaniques dans certains laminés spéciaux en plis croisés et hors-axes sont également présentées et discutées en détail. Enfin, la

capacité de la méthode proposée à calculer la ténacité à la rupture est évaluée et les résultats obtenus sont en accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux. Cette méthode peut être utilisée pour évaluer la durabilité et la résistance des structures composites en présence de fissures dans la matrice.

Dans l'article de **Arifin *et al.* [13]**, une recherche a été menée pour analyser le comportement d'une structure de stratifiés composite comprenant un mat de fils coupés (CSM), un tissage roving et une mousse-Klegecell lors des tests de Charpy (Figure 1.22). L'objectif principal était d'évaluer la réponse aux chocs et le comportement de rupture du stratifié composite dans différentes conditions d'essai. Afin de comprendre de manière approfondie les propriétés mécaniques et les modes de défaillances du composite lors du chargement par choc, diverses caractéristiques ont été examinées. Les résultats de cette étude contribuent de manière significative à la conception et à l'optimisation des stratifiés composites destinés aux applications nécessitant une grande résistance.

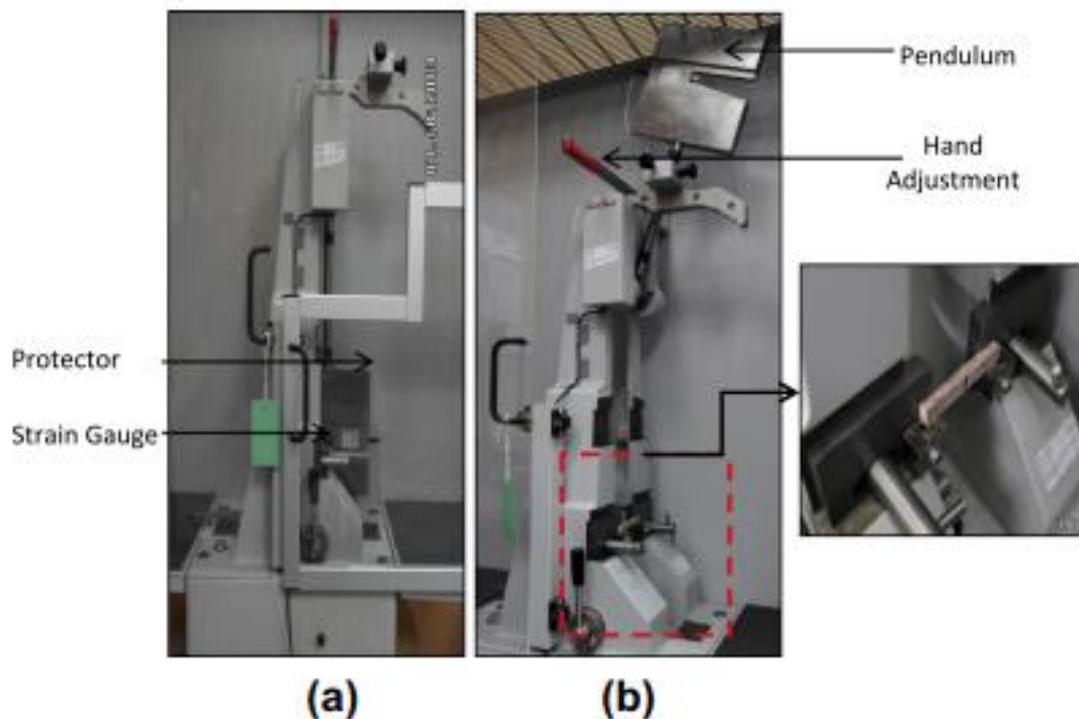


Figure 1.22 : Dispositif expérimental : a) instrument d'essai d'impact Charpy, b) position de l'échantillon sur la machine pour l'essai d'impact.

Les stratifiés composites sont largement utilisés dans diverses industries en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur légèreté. Comprendre leur comportement lors du chargement par choc est essentiel pour assurer l'intégrité structurelle et la sécurité. Cette étude se concentre sur une structure spécifique de stratification composite composée de CSM, de tissage roving et de mousse-Klegecell, car elle présente des caractéristiques mécaniques favorables adaptées à diverses applications.

Les stratifiés composites ont été fabriqués à l'aide d'une technique de moulage par infusion de résine assistée par vide. Plusieurs échantillons ont été préparés conformément aux procédures d'essai de Charpy standard. Ces échantillons ont ensuite été soumis à un chargement par choc à l'aide d'un testeur d'impact Charpy de type pendule. Pendant les essais, des paramètres tels que l'énergie d'impact et l'énergie absorbée ont été enregistrés.

La réponse aux chocs du stratifié composite a été évaluée en analysant les courbes charge-déflexion obtenues à partir des tests de Charpy. De plus, l'énergie absorbée par l'échantillon, les surfaces de rupture et les modes de défaillance ont été examinés afin de comprendre le comportement du composite. L'étude a également examiné les effets de divers facteurs tels que l'orientation des fibres, la teneur en résine et l'épaisseur de la mousse-Klegecell sur la résistance aux chocs du composite.

Le Figure 1.23 montre que le temps d'impact, le comportement de rupture et le temps de défaillance des structures diffèrent. Ces différences sont dues à l'épaisseur des matériaux utilisés : 5 mm pour le Type-C1 et 23 mm pour le Type-F1. La rupture du spécimen Type-C1 se produit plus rapidement que celle du spécimen G-F1, en environ 2 secondes. Cela indique que la résistance des structures composite stratifiés dépend du type de renforcement plutôt que de l'épaisseur des matériaux. Des traitements de surfaces peuvent augmenter la résistance des fibres et améliorer l'interface entre la matrice et la fibre. Le choix du type de renforcement est donc crucial pour les structures composites stratifiés. Les stratifiés en polyester présentent de bonnes propriétés d'impact et de module, tandis que les stratifiés en époxy offrent de bonnes valeurs de résistance. Les propriétés de la matrice affectent également le comportement des matériaux composites. La modification des composites à base de fibres de polypropylène/bois avec d'autres agents de couplage influence également sur leur comportement de rupture en raison des différences de propriétés des matériaux.

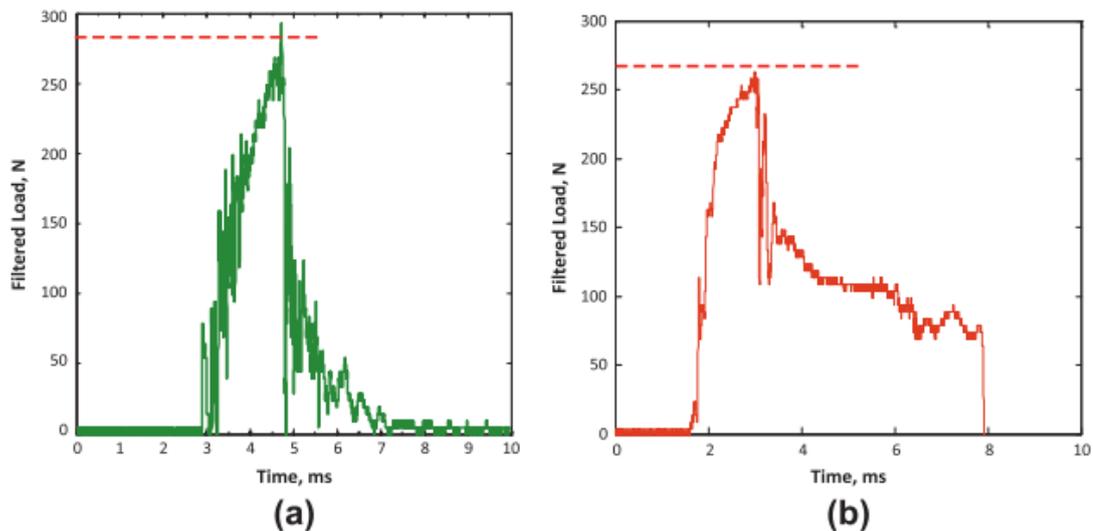


Figure 1.23: Spécimen testé avec différentes structures de stratification :

a) spécimen Type-E₁, b) spécimen Type-C₂ [13].

En conclusion, cette étude a examiné de manière approfondie le comportement d'une structure de composite stratifié composée de matelas de fils coupés, de tissage roving et de mousse-Klegecell lors des tests de Charpy. La réponse aux chocs, les propriétés mécaniques et les modes de défaillance du composite ont été minutieusement analysés. Les résultats fournissent des informations précieuses sur les performances des composites lors du chargement par choc, ce qui permet d'optimiser sa conception pour des applications nécessitant une grande résistance.

Kari et al. [14] ont été fait une étude expérimentale concernant l'étude de l'influence de l'orientation des fibres sur la contrainte circonférentielle des tubes en jute/epoxy de 4 couches fabriqué par enroulement filamentaire. Dans cette étude 6 type de tubes ont été élaborés (Tableau 1.2) ayant un diamètre intérieur 92 mm, alors que l'angle de l'enroulement θ varie (50°, 55°, 60°, 65°, 75° et 90°). Les tubes élaborés ont été caractérisée par traction circonférentielle selon la norme ASTM D2290, et par compression radial selon la norme ASTM D2412.

Tableau 1.2 : Configuration des tubes [14].

N°	Orientation Angle (deg)	Thickness (mm)	Designation
1	50	4.1	(90 / ± 50 / 90)
2	55	3.5	(90 / ± 55 / 90)
3	60	3.8	(90 / ± 60 / 90)
4	65	3.3	(90 / ± 65 / 90)
5	75	3.4	(90 / ± 75 / 90)
6	90	3.4	(90)4

La figure 1.24 représente les résultats de compression radiale et de traction circonférentielle pour six tubes, une bonne propriété à la compression radiale présente dans les tubes de $\pm 65^\circ$, et dans la traction circonférentielle le meilleur angle c'est 90° .

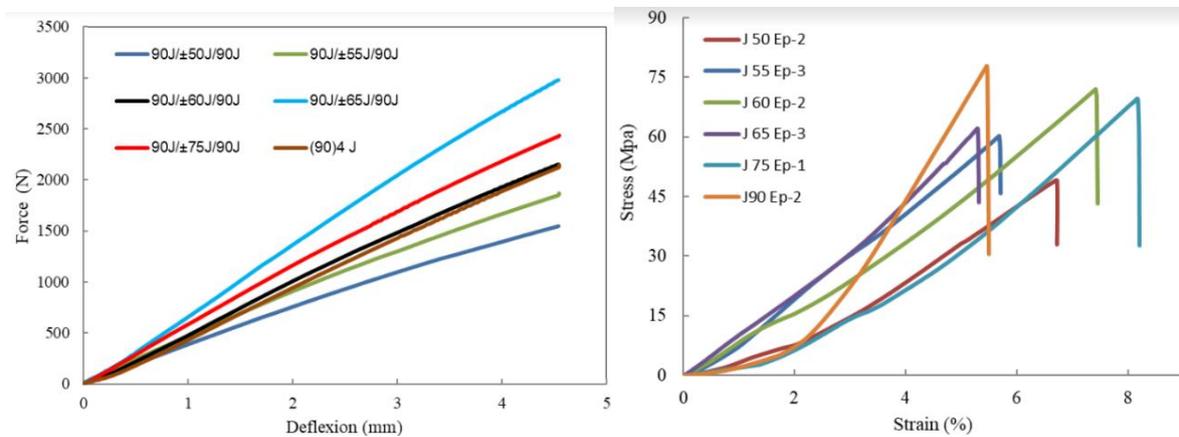


Figure 1.24: Compression radiale et de traction circonférentielle [14].

L'effet de changement l'angle d'enroulement filamentaire sur le module d'élasticité selon le type de chargement est illustré dans la figure 1.25a. La valeur maximale du module est obtenue pour l'angle de 90° et cette valeur diminue chaque fois que l'angle d'enroulement est modifié, en raison du type de chargement compression radiale. Mais en traction circonférentielle (Figure 1.25 b), les résultats obtenus montrent que la variation du module d'élasticité influé par le changement de l'angle et les séquence d'empilement.

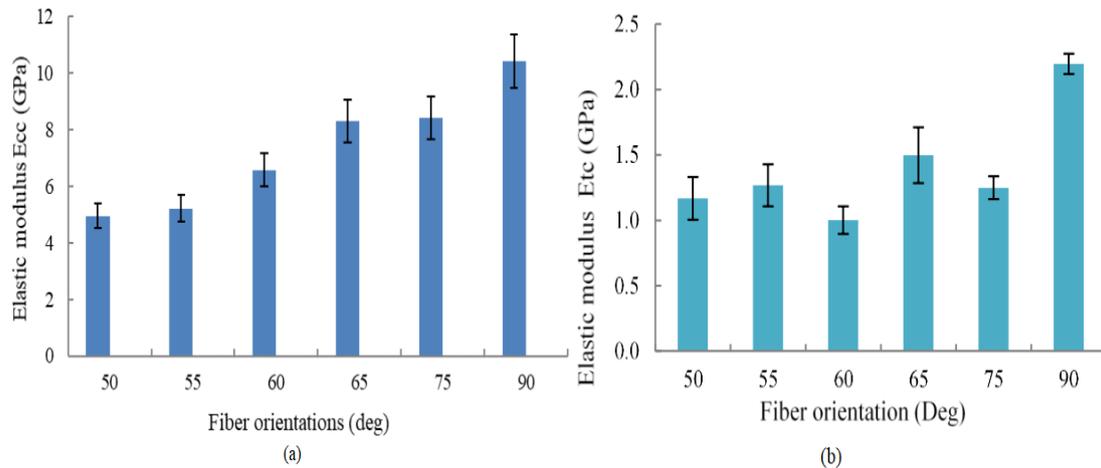


Figure 1.25: Module d'élasticité en fonction de l'orientation des fibres sous une charge de (a) compression radiale, (b) traction circumférentielle [14].

Cette étude a abouti aux résultats suivants :

Les résultats des expériences ont conclu que la rigidité spécifique dépend de l'angle d'enroulement α . Les tubes à un angle de 65° ont la plus grande rigidité spécifique. Le module d'élasticité compressive radiale maximale était de $10,42 \text{ GPa}$ enregistrée pour le tube enroulé à 90° .

En 2013, **Yan et al.** [15] ont mené une étude expérimentale visant à évaluer les capacités d'absorption d'énergie de tubes circulaires fabriqués à partir de composites naturels de lin et une résine époxy, en termes de résistance à la collision. Pour ce faire, des échantillons ont été soumis à des tests de compression uni-axiale avec différents diamètres intérieurs (36, 54 et 82 mm), nombres de plis (1, 2 et 3) et rapports longueur-diamètre (1, 1,5 et 2). Au total, 81 tubes creux ont été testés, avec trois échantillons pour chaque type, afin d'évaluer leur capacité d'absorption d'énergie.

Les échantillons ont été testés en appliquant des forces de compression uni-axiale quasi-statiques à l'aide d'une machine d'essai universelle Instron 5567. Les tests ont été menés conformément à la norme ASTM: D7336M-12, avec un enregistrement de déplacement à l'aide d'un transducteur de déplacement linéaire variable (LVDT) et une vitesse de déplacement de la traverse de 10 mm/min. La réponse charge-déplacement a été divisée en trois zones: pré-écrasement, post-écrasement et compactage (Figure 1.26).

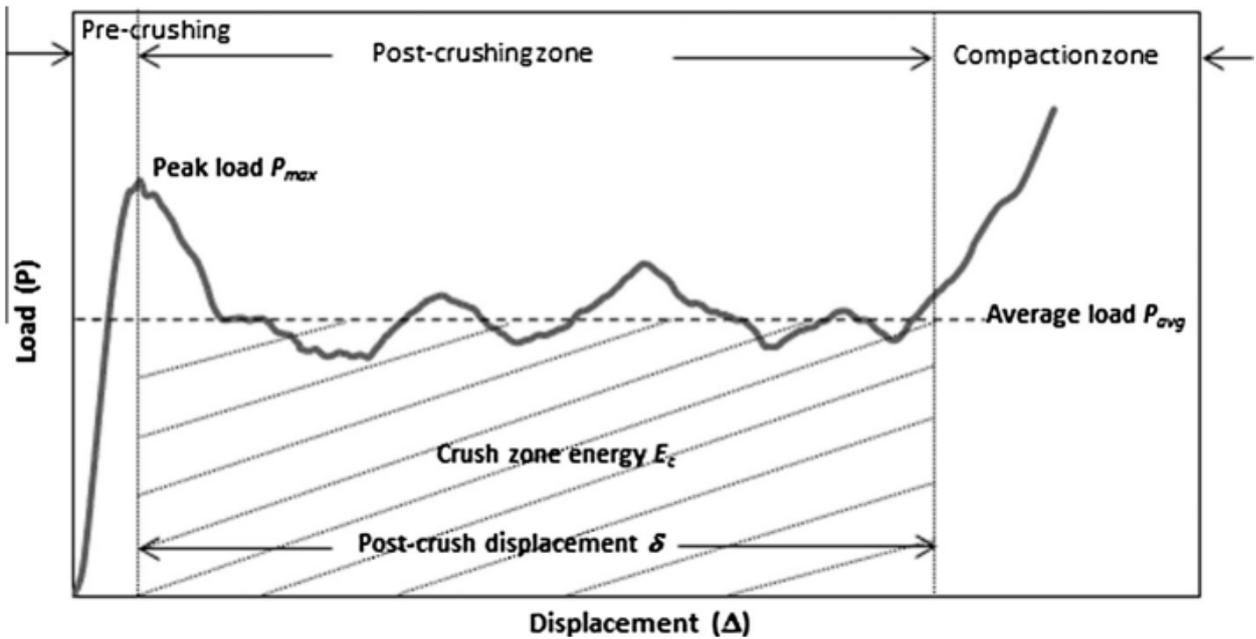


Figure. 1.26: Réponse charge-déplacement typique.

Différents paramètres de résistance à la collision ont été déterminés pour chaque échantillon à partir de la réponse charge-déplacement, tels que la charge maximale, la résistance à la compression maximale, l'énergie d'écrasement absorbée, l'énergie absorbée spécifique, le déplacement après l'écrasement, la charge moyenne d'écrasement et l'efficacité de la force d'écrasement. Les paramètres ont été calculés à l'aide de méthodes spécifiques telles que la détermination de l'énergie absorbée en tant que surface sous la réponse charge-déplacement et l'énergie absorbée spécifique en tant qu'énergie absorbée par unité de masse de l'échantillon écrasé.

Les résultats et la discussion portent sur la réponse charge-déplacement et les caractéristiques de la résistance aux chocs des tubes composites en lin (Figure 1.27), les courbes de réponse charge-déplacement montrent que l'initiation de la fracture se produit avec une chute de la charge dans la phase d'écrasement en régime permanent, ce qui est le mécanisme de base derrière l'absorption d'énergie des composites.

L'effet du diamètre interne sur la charge maximale des spécimens est insignifiant pour les spécimens en stratifié monocouche ($N = 1$) avec un rapport L/D de 1, 1,5 et 2, respectivement, mais peut augmenter ou réduire la charge maximale pour tous les autres spécimens avec 2 ou 3 couches.

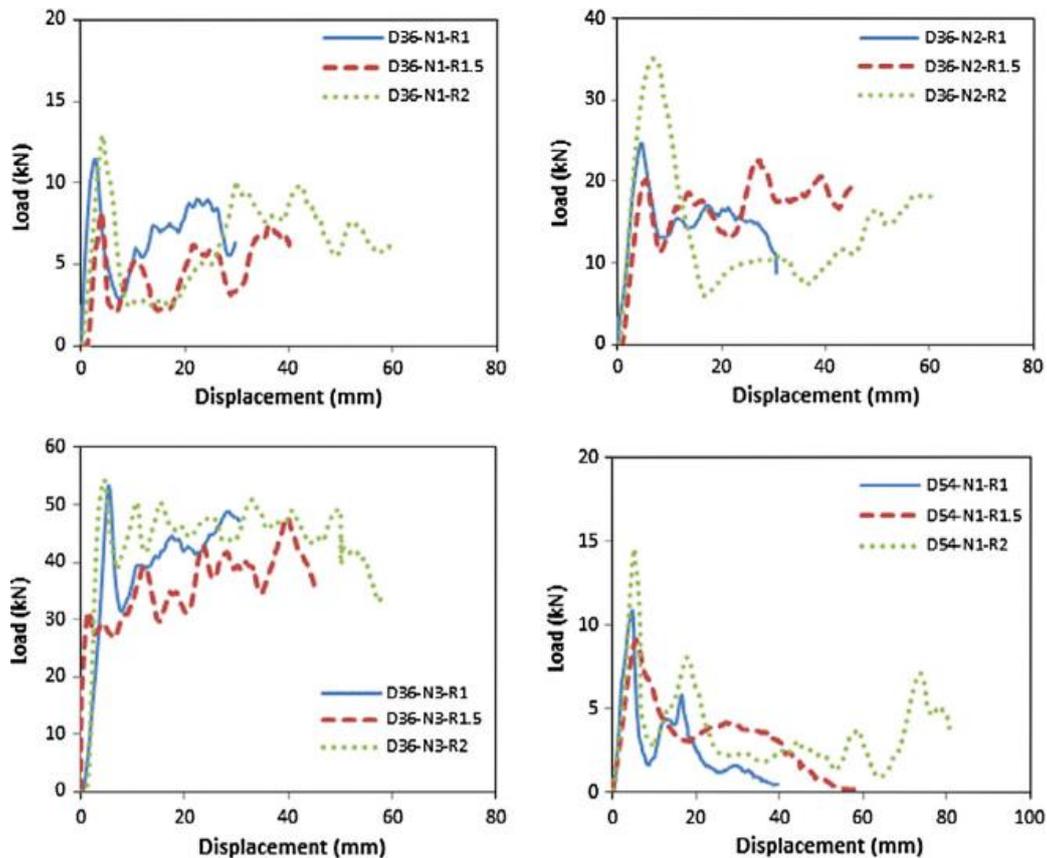


Figure.1.27 : Réponses charge-déplacement des éprouvettes.

On peut observer quatre modes de défaillance distincts pour les tubes composites en époxy renforcé de tissu de lin. Afin d'analyser la compression progressive des spécimens, des photographies ont été prises à différents stades pour montrer la déformation due à l'écrasement et la propagation des fissures. La figure 1.28 présente l'historique charge-déplacement du spécimen D82-N3-R2 qui a subi le mode de défaillance I.

Bien que les modes de défaillance I et II partagent un mécanisme de défaillance similaire, la différence réside dans le fait que l'amorçage initial se produit soit en bas soit en haut du tube.

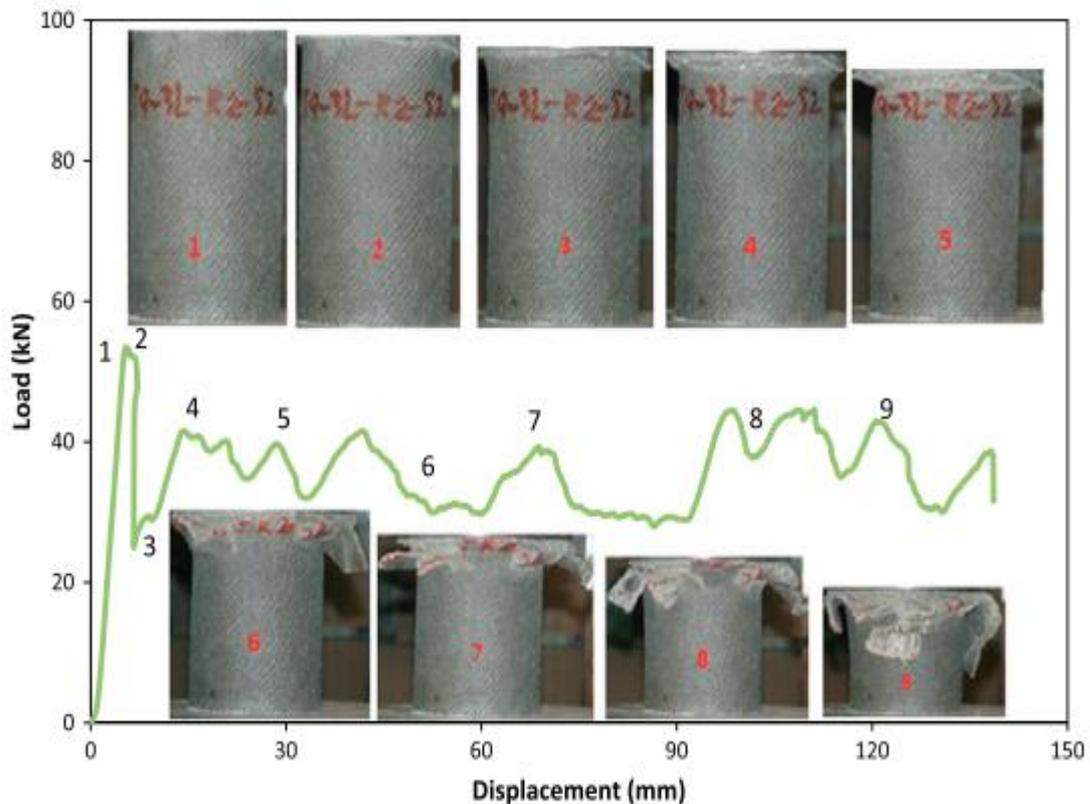


Figure 1.28 : Historique charge-déformation du spécimen de tube composite chargé axialement D82-N3-R2.

Les résultats obtenus montrent que les éprouvettes avec un grand nombre de plis composites et une courte longueur présentent une grande résistance à l'écrasement et une capacité élevée d'absorption d'énergie d'écrasement. De plus, la conception optimale d'un tube en lin/époxy a une efficacité de conversion d'énergie supérieure aux absorbeurs d'énergie métalliques conventionnels. Les principaux mécanismes d'absorption d'énergie observés sont la fragmentation et l'évasement du composite, la flexion des faisceaux du stratifié et la compression des composites.

Mahdi *et al.* [16] ont mené une recherche expérimentale visant à optimiser l'énergie absorbée par des dispositifs de tubes composites pliables écrasés axialement. Pour cela, différentes orientations de fibres ont été utilisées : 0/90, 15/75, 30/60, 45/45, 60/30 et 75/15.

Cette étude porte sur des tubes circulaires composites fabriqués à partir de toile tissée en fibre de verre E et de résine époxy. Les tubes sont constitués de 8 couches de fibres de verre E/époxy, disposées selon différents angles. Le processus d'enveloppement humide rentable a

été utilisé pour la fabrication des échantillons. Des tests d'écrasement quasi-statiques ont été réalisés pour évaluer les mécanismes de déformation et l'énergie absorbée.

Le comportement des tubes a été photographié et les données de charge-déplacement ont été enregistrées. Cinq tests ont été effectués pour chaque orientation de fibre pour assurer la reproductibilité des résultats. Le système d'acquisition de la machine d'essai universelle a enregistré les données de charge-déplacement à une vitesse constante de 15 mm/min.

Les résultats ont montré des oscillations de la courbe charge-déplacement, indiquant une résistance à la charge (Figure 1.29), la valeur de charge la plus élevée de la phase de post-écrasement s'est produite à une valeur de 122,18 kN, suivie d'une phase de densification à une valeur de charge de 109,96 kN. La courbe charge-déplacement pour cette orientation de fibres montre une tendance similaire à celle observée pour l'orientation de fibres de $15^\circ/75^\circ$.

En général, pour les tubes avec une orientation de fibres de $15^\circ/75^\circ$ et $75^\circ/15^\circ$, la phase de post-écrasement a montré des oscillations de la courbe charge-déplacement, indiquant une résistance à la charge. La phase de densification a également été observée dans ces tubes. Les modes de défaillance ont été caractérisés par une fragmentation radiale et une fissuration de la paroi du tube. La comparaison des résultats pour les différentes orientations de fibres indique que les tubes avec une orientation de fibres de $0^\circ/90^\circ$ ont montré une réponse plus rigide et une défaillance par cisaillement transversal, tandis que les tubes avec une orientation de fibres de $15^\circ/75^\circ$ et $75^\circ/15^\circ$ ont montré une réponse plus ductile et une défaillance par fragmentation radiale et fissuration de la paroi du tube.

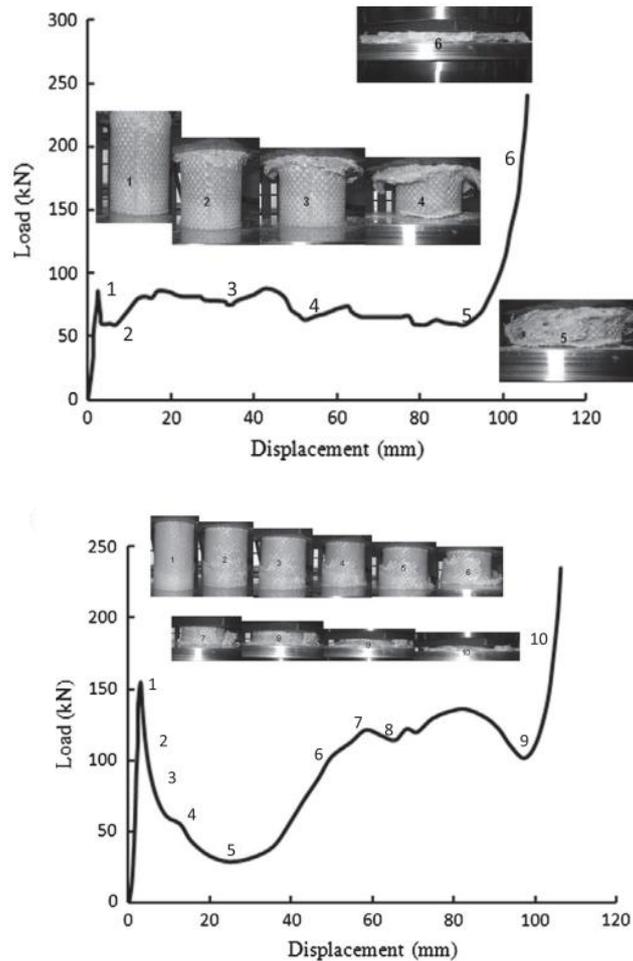


Figure 1.29: : Courbes charge-déplacement d'un tube composite écrasé axialement.

Les résultats montrent que les tubes avec des fibres orientées à $15^\circ/-75^\circ$ et $75^\circ/-15^\circ$ ont la capacité de charge la plus élevée, tandis que ceux avec des fibres à $0^\circ/90^\circ$ ont la capacité de charge la plus faible. Les tubes avec des fibres orientées à $30^\circ/60^\circ$ et $60^\circ/30^\circ$ ont la deuxième plus grande capacité de charge. Les tubes avec des fibres orientées à $\pm 45^\circ$ ont la troisième plus grande capacité de charge. Les résultats sont basés sur des données moyennes de trois échantillons. La charge initiale maximale est également discutée en fonction de l'angle de disposition des fibres. L'article conclut que la capacité d'absorption d'énergie doit être considérée en plus de la capacité de charge pour évaluer la réponse des tubes composites à l'écrasement comme illustré dans la figure 1.30.

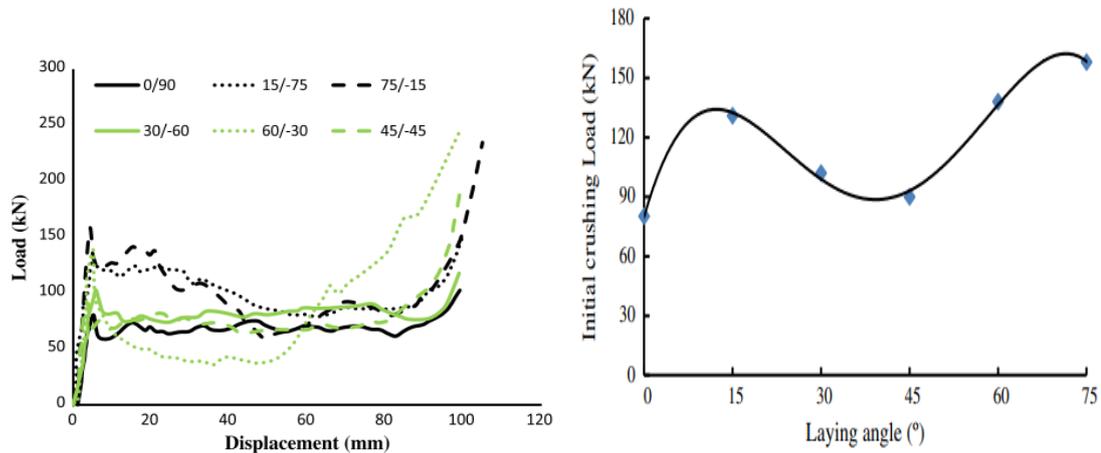


Figure.1.30: Courbes de déplacement de charge moyenne pour chaque orientation de fibre et la charge d'écrasement initiale maximale en fonction de l'angle d'orientation des fibres.

L'étude expérimentale a montré que l'orientation des fibres à $15^\circ/-75^\circ$ a une meilleure capacité de charge, mais un comportement post-écrasement moins stable que les orientations des fibres à $0^\circ/90^\circ$ ou à $45^\circ/45^\circ$. Les échantillons avec l'orientation des fibres à $15^\circ/-75^\circ$ et $75^\circ/-15^\circ$ ont montré un mode de rupture catastrophique qui est la principale cause de l'état d'écrasement instable. En plus de, la capacité de charge de ces orientations des fibres ont montré une meilleure absorption d'énergie. Par conséquent, les auteurs recommandent l'utilisation de l'orientation des fibres à $15^\circ/-75^\circ$ et $75^\circ/-15^\circ$ pour les tubes composites écrasables pour une meilleure capacité de charge et une meilleure absorption d'énergie.

1.9 conclusion :

Ce chapitre, concerne :

- ✓ Les concepts fondamentaux des matériaux composites, ainsi que quelques techniques utilisées pour l'élaboration des matériaux composites ;
- ✓ Une attention particulière a été accordée à la technique d'enroulement filamentaire, car elle est employée dans cette étude spécifique ;
- ✓ De plus, une revue de la littérature a été effectuée sur les travaux antérieurs concernant l'élaboration et la caractérisation des tubes composites. Cette revue a permis de situer notre travail par rapport aux recherches déjà réalisées dans ce domaine, ce qui s'est avéré bénéfique pour notre étude ;
- ✓ La présente étude se concentrera sur l'élaboration de tubes composites par enroulement filamentaire ;
- ✓ Découpe de tubes élaborés, dans le sens longitudinal et transversale, en éprouvettes selon les normes ASTM pour être testées sur au chocs par Charpy et par flexion 3-points.

Chapitre II :
Élaboration et leur protocole de
caractérisation mécanique

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la technique et l'outillage utilisés pour l'élaboration des tubes en matériaux composites en utilisant la méthode de l'enroulement filamentaire, la découpe des tubes en éprouvettes ainsi que leur caractérisation par des tests de résilience (Charpy) et de flexion. Les tubes élaborés sont composés de quatre couches, selon la séquence d'empilement $[90/\pm 55/90]$ et son à base de deux résines polyester (1) et (2) obtenu par deux fournisseurs différents et de fibres continue sous forme de bobines de file torsadés. Les tubes élaborés sont laissé 15 jours à température ambiante afin d'avoir une polymérisation complète avant d'être découpés en éprouvettes conformément aux normes ASTM D6110-04 et ASTM D790-17, puis ces derniers sont soumis à des tests mécaniques de résilience (Charpy) et de flexion 3-points.

Ainsi, ce chapitre met en évidence les étapes de fabrication et de caractérisation des tubes composites en fibre de polyester, en se concentrant sur la méthodes d'enroulement filamentaire.

2.2 Description de la machine

La machine d'enroulement filamentaire (Figure 2.1) utilisée pour l'élaboration des tubes composites appartient au laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l'université 8 Mai 1945 Guelma. Cette machine est constituée par des principale parties mécaniques et électriques en plus d'un bati :

La partie mécanique se compose de :

- Un mandrin de rotation (Figure 2.2 a) ;
- Table de transition (2) contenant un bac d'imprégnation de la fibre, guide-fil etc. (Figure 2.2b) ;
- Une transmission par engrenage ;
- Une transmission par courroies dentée.

La partie électrique de la machine comprend :

- Deux moteurs pas à pas (3), l'un pour faire tourner le mandrin et l'autre pour faire la translation longitudinale du chariot qui porte le bac de résine utilisé pour

imprégner la fibre. Les fréquences de rotation de ces deux moteurs peuvent être combinées pour ajuster les angles d'orientation des fibres (Figure 2.2 c);

- Un pupitre de commande (4) qui inclut des boutons poussoirs, un interrupteur marche/arrêt et un écran numérique pour visualiser les opérations (Figure 2.2.d). Il permet la programmation des cycles de fabrication des tubes composites, quel que soit le nombre de plis ou l'orientation des fibres entre 10 et 90 degrés ;
- Une résistance chauffante (6) avec un petit moteur et un ventilateur utilisé pour faire le séchage de tube (Figure 2.2 e).



Figure 2.1 : Machine d'enroulement filamentaire (LMANM de l'Université 8 Mai 1945 Guelma).

Nomenclature des composants :

- 1- Mandrin ;
- 2- Table porte bain d'imprégnation de la résine et guide fil ;
- 3- Deux moteurs pas à pas ;
- 4- Ecran numérique pour visualiser les opérations ;
- 5- Bobine de fibre ;
- 6- Résistance chauffante.

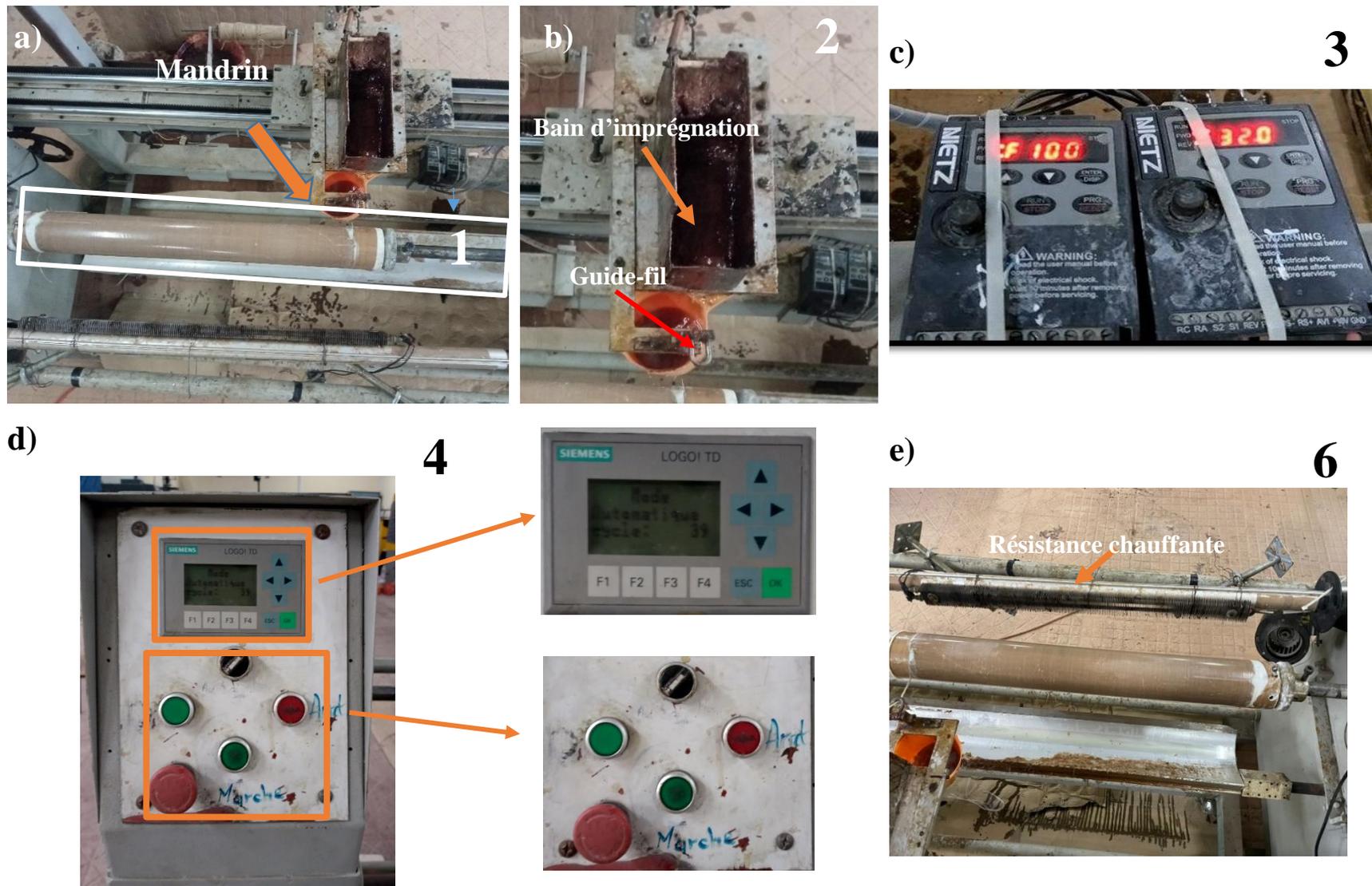


Figure 2.2 : Différentes parties de la machine d'enroulement filamenteuse utilisée (LMANM de l'Université 8 Mai 1945 Guelma).

2.3 Elaboration des tubes composites et leur découpe en éprouvettes

2.3.1 Elaboration des tubes composites

Les tubes sont tous fabriqués à partir d'un renfort cellulosique associé à une matrice polyester thermodurcissable selon l'étapes suivants :

- Préparation de la machine par le réglage des fréquences (160 Hz pour la fréquence de rotation de mandrin est 2,3 Hz pour le déplacement de la table) pour obtenu l'angle de 90 degré ;
- Réglage les capteurs de positions pour obtenir la longueur désirée du tube ;
- Mettre un l'agent de démoulage sur le moule du tube pour faciliter sont démontage après son élaboration et son séchage (Figure 2.3a) ;
- Enrouler un tour du fil autour du moule puis l'accroché ;
- Pesage d'environ 800 g de résine polyester sur une balance de précision de 1g (Figure 2.3b) à laquelle on lui rajoute 5 ml d'accélérateur (Figure 2.3c) puis on mélange par une spatule jusqu'à ce que la couleur change vers le violet (Figure 2.3d), puis 4 ml de durcisseur sont ajoutés (Figure 2.3e), puis on mélange jusqu'au changement de la couleur qui devient brun. De plus, la préparation de la résine est effectuée en trois fois environ 800 g à chaque fois ;
- La résine polyester mélangée est versée dans le bac de résine de la machine, (Figure 2.3h) ;
- Appuyez sur le bouton de démarrage, alors le mandrin de la machine commence à tourner et qui tire le fil qui passe à travers le guide file, puis il est imprégné de la résine dans le bac de la machine, essoré puis enroulé sur le mandrin jusqu'à la terminaison de la première couche orientée à 90 degré ;
- Arrêt de la machine et changement des fréquences pour la deuxième et troisième couche orientée respectivement à $+55^\circ$ et -55° (75Hz fréquence de rotation, 39,5Hz déplacement de la table), puis redémarrage de la machine pour faire 70 cycles qui permettent de réalisés les deux couches ;
- Arrêt de la machine et réglage des fréquences des moteurs pour la dernière couche orientée à 90° ;

- Arrêt du moteur pas à pas qui commande la translation, réduction de la fréquence de rotation du mandrin et allumage du système de séchage pendant 3 heures ;
- Arrêt de la machine, démontage du moule contenant le tube compote élaboré, puis démoulage du tube du moule.

Protocole des étapes d'élaboration d'une matrice polyester thermodurcissable au laboratoire de mécanique applique des nouveau matériau(LMANM) Université 8mai 1945 Guelma.

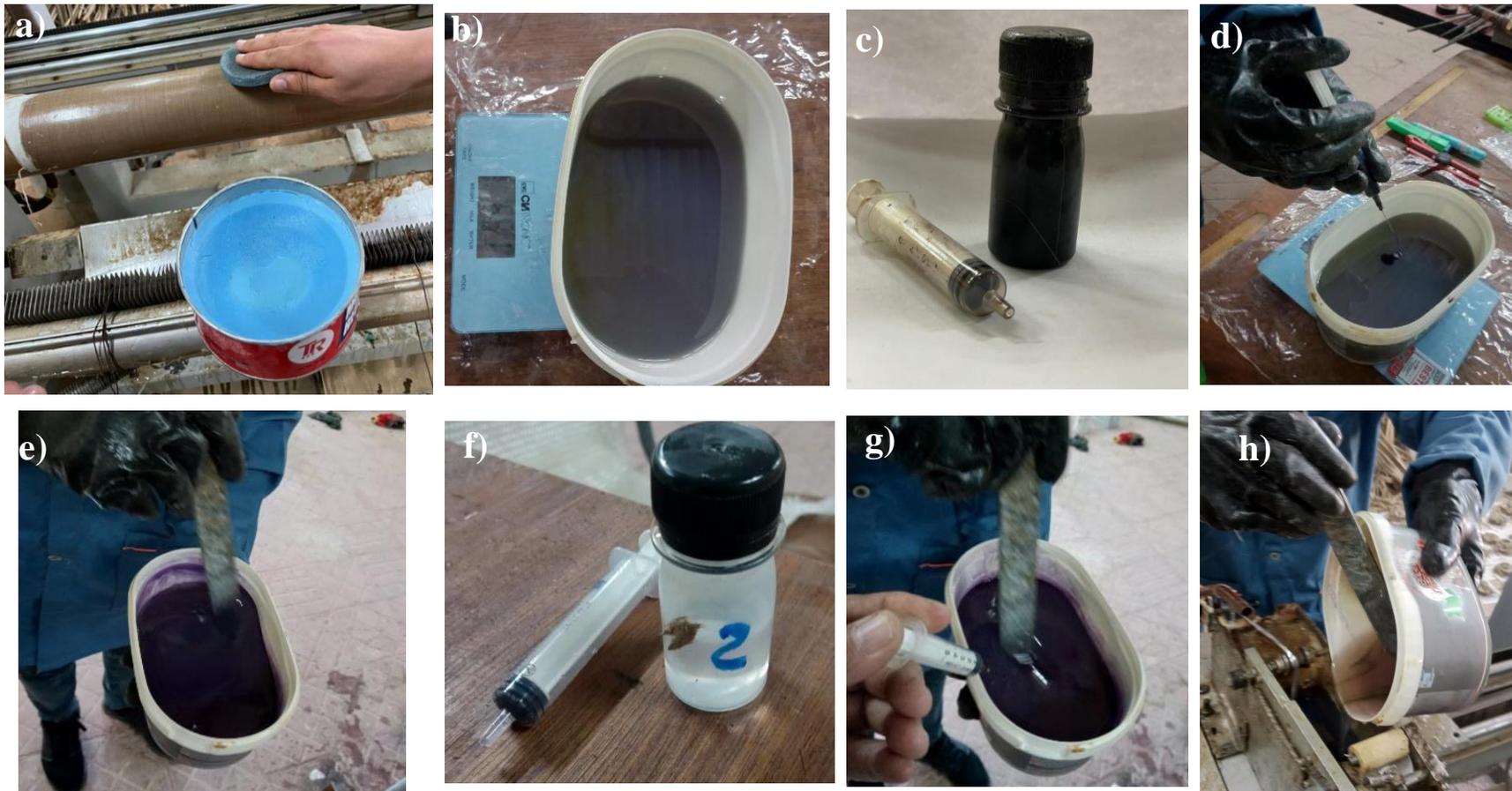


Figure 2.3 : Préparation de résine polyester : a) Mettre un agent de démoulage sur le moule, b) Pesage de la résine Polyester, d) Ajoute de l'accélérateur, c) Mélange de la résine, d) Ajoute du durcisseur, h) versé le mélange dans le bac de la machine.

Les tubes élaborés par les deux résine polyester 1 et 2 ont été constitués de quatre plis, selon l'architecture $[90^\circ/\pm 55^\circ/90^\circ]$, sont avaient une longueur de 650 mm et un diamètre de 90 mm (Figure 2.4).



Figure 2.4 : Tubes composite élaborés par la: a) résine 1 et b) résine 2.

2.3.2 Préparation des éprouvettes

Les tubes élaborés ont été découpés, dans leur sens transversal et longitudinal, en éprouvettes pour les caractérisations mécaniques : essai de résilience (Charpy) et tests de flexion 3-points respectivement selon les normes ASTM D6110-04 [17] et ASTM D790-17 [18].

La découpe des éprouvettes a été effectué sur et une tronçonneuse à disque diamanté et ayant une table millimétrique pour assurer les dimensions des éprouvettes (Figure 2.5). Les

découpes ont été effectuées au laboratoire de mécanique applique des nouveau matériau(LMANM) de l'Université 8 Mai 1945 Guelma.



Figure 2.5: Machine de découpe a disque de diamanté.

Le dimensionnement des éprouvettes par la découpe des tubes composite de résine polyester 1et 2 suivant les normes respectivement ASTM D6110-04 ET ASTM D790-17 pour les tests de caractérisation mécanique à savoir teste de résilience et de flexion 3-points et leur protocole de découpe sont présentés respectivement dans les figures 2.6 et 2.7.



Figure 2.6: Découpe des tubes en éprouvettes pour les tests de résilience et de flexion de résine 1.



Figure 2.7: Découpe des tubes en éprouvettes pour les tests de résilience et de flexion de résine 2

Les tubes en composite fibre/polyester sont découpé en éprouvettes (Figure 2.8) destinées aux tests de résilience a la normes ASTM 6110-04 ont des dimensions de 120 mm de longueur, 12 mm de largeur et une épaisseur de $8 \pm 0,5$ mm.

Les éprouvettes de flexion sont découpées selon le protocole spécifié par la norme ASTM D790-17, avec une longueur de 240 mm, une largeur de $15 \pm 0,8$ mm et une épaisseur de $8 \pm 0,8$ mm.

Les dimensions des éprouvettes des tests de résilience et de flexion ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse numérique avec un afficheur digital avec une précision de 0,01mm pour assurer la précision des mesures.



Figure 2.8: Exemple d'éprouvettes découpées pour les tests de résilience et de flexion.

2.4 Tests de caractérisation mécanique

Les tubes composites découpé ont été tests de résilience et de flexion 3-points au niveau de Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l'université de 08 Mai 1945Guelma.

2.4.1 Essai de résilience

Le test de résilience (Charpy) est une méthode utilisée pour mesurer la capacité à résister à la rupture par choc. Cette méthode permet de caractériser la fragilité d'un matériau. Elle consiste à mettre une éprouvette découpée selon la norme ASTM D6110-04 entre deux appuis distant de 55 mm, à l'impact d'un pendule muni d'un mouton la différence d'énergie entre la position initiale et la position finale du pendule est mesurée pour déterminer l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette (Figure 2.9). Cette énergie est ensuite divisée par la section de l'éprouvette pour obtenir la valeur de résilience, qui est généralement exprimée en joules par centimètre carré.

Les essais de résilience sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type PHYWE.17558.01 (Figure 2.9).



Figure 2.9 : Mouton pendule rotatif type PHYWE.17558.01.

La résilience du matériau est caractérisée par la lettre *KCU*, exprimée en Joules par centimètre carré (J/cm^2). L'énergie *W* Mesure en (Joule) absorbée lors de la rupture [19].

Energie initiale :

$$W_0 = Mgh_0$$

Energie résiduelle :

$$W_r = Mgh_1$$

Energie absorbée :

$$W = W_0 - W_r = (Mgh_0) - (Mgh_1) = Mg(h_0 - h_1)$$

W : énergie exprimée en Joules (J) ou N.m;

W : masse en kg;

g : L'accélération de la pesanteur prise égale à 9,81 m/s² ;

S : surface ;

h_0 et h_1 : hauteur initiale et finale en mètre ;

$$KCU = \frac{Mg(h_0 - h_1)}{S}$$

2.4.2 Essai de flexion 3-points

L'essai de flexion est une méthode courante pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux notamment leur résistance à la flexion.

Le principe de l'essai de flexion est de soumettre une éprouvette (dans notre cas concaves ou convexe) découpé selon la norme ASTM D790-17, de forme rectangulaire à une charge de flexion en 3-points. Cette charge est appliquée à l'éprouvette en appliquant une force de compression à un point situé au milieu de l'échantillon avec une vitesse de déplacement 5 mm/min, tandis que deux autres points de l'éprouvette la soutiennent sur sa surface inférieure. Cette configuration crée une flexion uniforme de l'échantillon, qui est caractérisée par la mesure de la déformation ou de la courbure de l'échantillon.

L'essai de flexion permet de déterminer plusieurs paramètres, tels que la contrainte de flexion σ_f , le module de flexion ainsi que la déformation. La résistance à la flexion est la charge maximale que peut supporter l'échantillon avant de se rompre.

Pour déterminer la contrainte de flexion selon la norme ASTM D790-17 [19] en utilise équation suivante :

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

Dans laquelle :

- σ_f : Contrainte de flexion (MPa).
- F : Force (N), donnée par la machine.
- l : Longueur entre appuis (mm).
- b : Largeur de l'éprouvette (mm).
- h : Epaisseur de l'éprouvette (mm).

Les tests de flexion sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type Walter & Bai (Figure 2.10) au niveau du Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l'université 8 Mai 1945 Guelma. Cette machine est dotée d'une cellule de charge de capacité 100 kN et une autre de kN.

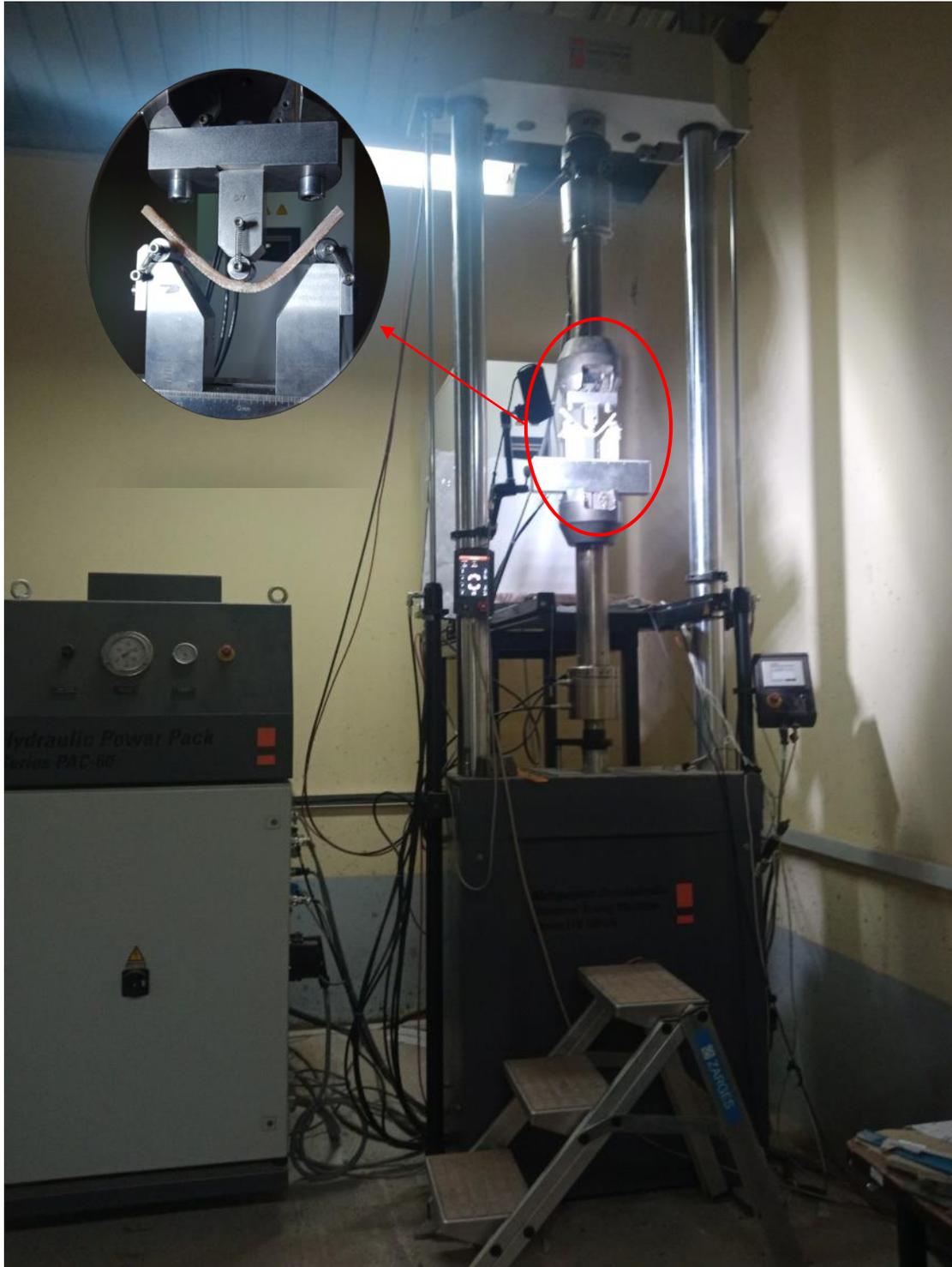


Figure 2.10. Machine de flexion Walter & Bai.

2.5 Conclusion

Ce chapitre décrit le processus d'élaboration des tubes en matériaux composite et leur caractérisation mécanique et permet de conclure ce qui suit :

- Identifié la machine d'enroulement filamentaire et son fonctionnement dans la fabrication des tubes composite ;
- Différentes étapes de préparation de la résine polyester ;
- Elaboration des tubes composites par la résine polyester 1 et 2 ;
- Découpe des tubes élaborés en éprouvettes selon les norme ASTM D6110-04, ASTM D790-17 pour les tests de caractérisation respectivement essai de résilience et de flexion 3-points ;
- Protocoles des tests de caractérisation mécanique de résilience et de flexion 3-points des éprouvettes découpé dans le sens longitudinal et transversal ;

Chapitre III :

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Ce chapitre concerne les résultats obtenus par les deux méthodes de caractérisation par résilience (Charpy) et par de flexion trois points des éprouvettes découpées à partir des tubes composites élaborés par deux résine 1 et 2. Les éprouvettes ont été découpées conformément aux normes ASTM D6110-04 et ASTM D710-17 dans le sens longitudinal (concave) et transversal (plate) pour voir l'effet de découpe (l'orientation des fibres) et le type de résine sur la résistance mécanique ainsi que les positions de chargements des éprouvettes à l'intérieur ou à l'extérieur et latéral des tubes sur la résistance en choc (Charpy) et en flexion trois points.

3.2 Essai de résilience

Après avoir réalisé les tests de résilience (Charpy) sur les éprouvettes obtenus par découpe transversal (sous forme concaves) des tubes élaborés par résine 1 (EDTTR1) selon l'architecteur de séquence d'empilement $[90/\pm 55/90]$, trois éprouvettes pour chaque type ont été pour chaque face (interne, externe, latérale).

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableaux 3.1 les plus favorables ont été obtenus sur les éprouvettes impactées à leurs faces externes, présentant une valeur d'énergie moyenne de $3,33 \pm 0,62$ joules. Par la suite les faces latérales ont enregistré une énergie de $1,75 \pm 0,89$ joules, tandis que les faces internes ont affiché une énergie de $1,50 \pm 0,41$ joules.

Tableaux 3.1 : Résultats de Charpy EDTTR1 impactés à leurs faces externes, internes et latérale.

Eprouvette n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Energie (Joule)	
1	10,30	8,50	3,5	Face externe
2	10,45	8,20	4	
8	9,50	8,55	2,5	
Valeur moyenne			$3,33 \pm 0,62$	
4	10,00	7,80	1,50	Face interne
5	9,85	8,40	1,00	
6	10,30	7,60	2,00	
Valeur moyenne			$1,50 \pm 0,41$	
3	9,65	8,55	1,00	Face latérale
4	10,50	7,50	3,00	
8	9,20	8,00	1,25	
Valeur moyne			$1,75 \pm 0,89$	

Les faciès de rupture des essais de résilience des différentes éprouvettes impactées aux leurs faces intérieurs et extérieurs sont présenté dans la Figure 3.1. L'analyse de cette figure montre que les éprouvettes ont manifestées deux types de défaillances :

- ✓ La rupture des éprouvettes impactées à la surface extérieure (exemple éprouvette 1) de l'éprouvette est caractérisé par les ruptures totales, c'est-à-dire l'éprouvette est découpé en deux parties ;
- ✓ Les éprouvettes impactées à la surface intérieure (exemple l'éprouvette 4) se rompent par une rupture des couches intérieures ($\pm 55^\circ$) suivi par une rupture de la couche externe au voisinage de la zone impactée.
- ✓ Les éprouvettes impactées à la surface latéral se rompent par une rupture des couche intérieur ($\pm 55^\circ$) suivi par une rupture de la couche externe de tube (exemple de l'éprouvette 3).





Figure 3.1 : Faciès de ruptures des éprouvettes 1 et 4 et 3 impactées respectivement à leur faces intérieure, extérieure et latérale

Pour les éprouvettes obtenus par la découpe transversale (sous forme concaves) de tube élaboré par la résine 2 (EDTTR2), en utilisant les mêmes faces que précédemment pour les tests et les mêmes séquences d'empilement $[90/\pm 55/90]$ les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 3.2.

Les performances les plus élevées ont été observées sur les éprouvettes impactées à leurs faces externes, avec une énergie moyenne de $4,5 \pm 0,40$ joules, suivi par ceux impactées sur leurs faces latérales présentent une énergie moyenne de $3,42 \pm 0,52$ joules, tandis que les faces internes ont enregistré la valeur d'énergie moyenne la plus faible, avec $3,08 \pm 0,72$ joules.

Il est important de signalé donc que moyennement la résine 2 a données de meilleur résultat à l'impact par rapport à la résine 1.

Tableau 3.2 : Résultats de Charpy des EDTTR2 impactées à leurs faces internes et externes, latérale.

Eprouvette n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Energie (Joule)	
2	9,83	8,94	4	Face externe
3	10,26	8,33	5	
7	10,42	8,11	4,5	
Valeur moyenne			$4,5 \pm 0,40$	
3	9,51	8,58	3	Face interne
7	10,94	8,68	4	
8	10,05	8,25	2,25	
Valeur moyenne			$3,08 \pm 0,72$	
2	8,93	8,63	4	Face latérale
4	10,02	8,91	2,75	
8	10,38	8,38	3,5	
Valeur moyne			$3,42 \pm 0,52$	

Après l'analyse des facies des différentes éprouvettes EDTTR2 impactées sur leurs différentes faces externes, internes et latérales (Figure 3.2) sont pratiquement similaire à ceux déjà observées pour les EDTTR1 et leur endommagement se résume comme suit :

- ✓ Une rupture totale avec la division de l'éprouvette en deux parties est enregistrée pour les éprouvettes impactées à leurs surfaces externes au centre des éprouvettes (exemple de l'éprouvette 3) ;
- ✓ Les éprouvettes impactés sur les faces interne et latérale présentent des ruptures partielles respectivement sur les couches internes orientées à ± 55 ainsi que celle externe orienté à 90 (éprouvette 3 et Eprouvette 2).

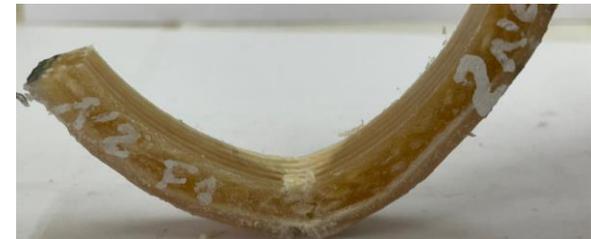
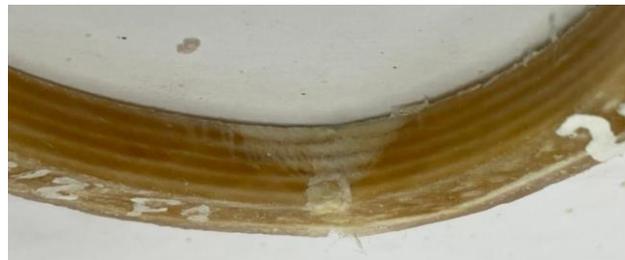




Figure 3.2 : Faciès de rupture des éprouvettes 3, 3 et 2 impactées respectivement à leurs surfaces extérieures, intérieures et latérales de leur face.

Les résultats des éprouvettes découpées dans le sens longitudinal (EDLTR1) des tubes composites élaboré par la résine 1, puis impactées sur leurs surfaces extérieures, intérieures et latérales sont récapitulés dans le Tableau 3.3.

Les valeurs des résultats des tests Charpy des EDLTR1 (Tableau 3.3) sont très faible, comparativement à ceux obtenus avec EDTTR1 (Tableau 3.1).

Les éprouvettes impactées à leurs faces latérales EDLTR1 présente une énergie moyenne de $0,12 \pm 0,10$ joule supérieure à ceux des éprouvettes impactées à leur faces externe et interne qui présentent une valeur d'énergie similaire de $0,08 \pm 0,12$ joule.

Tableau 3.3 : Résultats de Charpy des EDLTR1 impactés à leurs faces externes, internes et latérales.

Eprouvette n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Energie (Joule)	
1	13	8,20	0,00	Face externe
2	12,70	8,30	0,10	
3	12,30	8,25	0,00	
Valeur moyenne			$0,08 \pm 0,12$	
1	12,80	8,55	0,00	Face interne
2	12,70	9,00	0,25	
6	12,15	9,20	0,00	
Valeur moyenne			$0,08 \pm 0,12$	
4	11,50	8,00	0,00	Face latérale
5	12,00	8,60	0,25	
6	12,10	8,25	0,10	
Valeur moyne			$0,12 \pm 0,10$	

L'analyse des facies de rupture des éprouvettes EDLTR1 impactées sur leurs faces extérieures, intérieures et latérales présentent tous des ruptures totales ou les éprouvettes se divisent en deux parties au voisinage de la zone des surfaces impactées.

Ceci est due au fait que la contribution des couches externes orientées à 90° des éprouvettes est négligeable en raison de l'alignement parallèle de la force appliquée avec la direction des fibres, c'est donc seulement les couches internes orientées à $\pm 55^\circ$ qui apportent la contribution principale à la résistance.



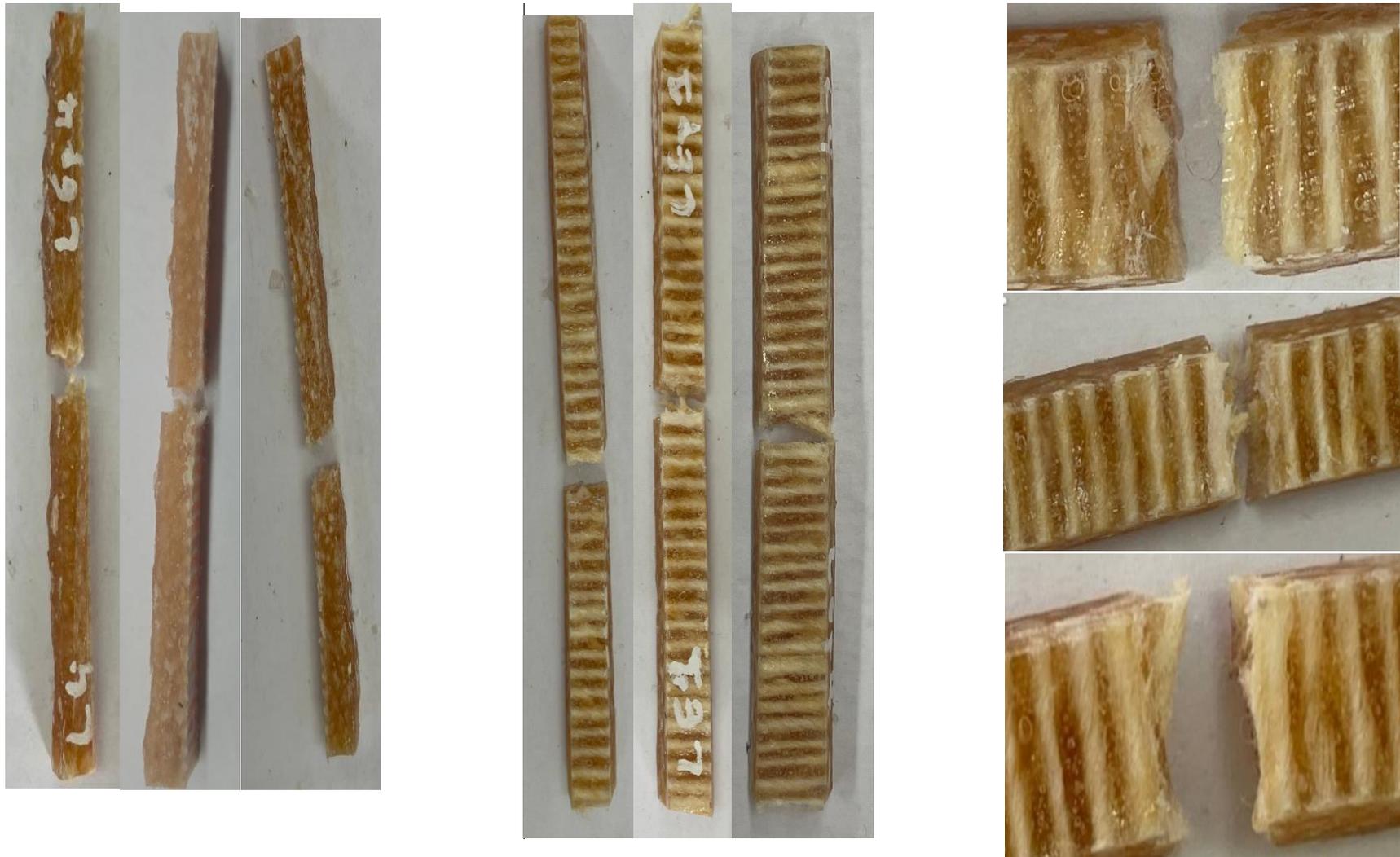


Figure 3.3 : Faciès de rupture des éprouvettes 1, 1 et 4 impactée respectivement à leurs surfaces extérieures, intérieure et latérale.

Pour les résultats des essais Charpy obtenus pour des éprouvettes découpées dans le sens longitudinal des tubes composites élaborés par la résine 2 (EDLTR2) sont résumés dans le tableaux 3.4.

L'impact sur les surfaces latérales des EDLTR2 a enregistré la meilleure valeur d'énergie, avec $0,13 \pm 0,19$ joules, tandis que les faces externes et internes ont présentées des valeurs d'énergie moyenne similaires de l'ordre de $0,08 \pm 0,12$ joules.

Les valeurs des essais d'impact des EDLTR2 sont très proches à celle obtenues pour les EDLTR1.

Tableaux 3.4 : Résultats obtenus par les essais de Charpy des EDLTR2.

Eprouvette n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Energie (Joule)	
4	12,60	8,00	0,00	Face externe
5	11,90	8,90	0,25	
6	12,60	8,00	0,00	
Valeur moyenne			$0,08 \pm 0,12$	
4	11,40	8,65	0,00	Face interne
5	12,25	7,80	0,25	
6	12,50	9,00	0,00	
Valeur moyenne			$0,08 \pm 0,12$	
1	11,60	8,00	0,40	Face latérale
2	11,90	8,25	0,00	
3	12,00	8,45	0,00	
Valeur moyinne			$0,13 \pm 0,19$	

L'analyse des faciès des différentes éprouvettes EDLTR2 après les essais de résilience (Charpy), a montré que des modes de rupture similaires à celles des éprouvettes, EDLTR1 où la rupture totale des éprouvettes était obtenue indépendamment de la surface d'impact.



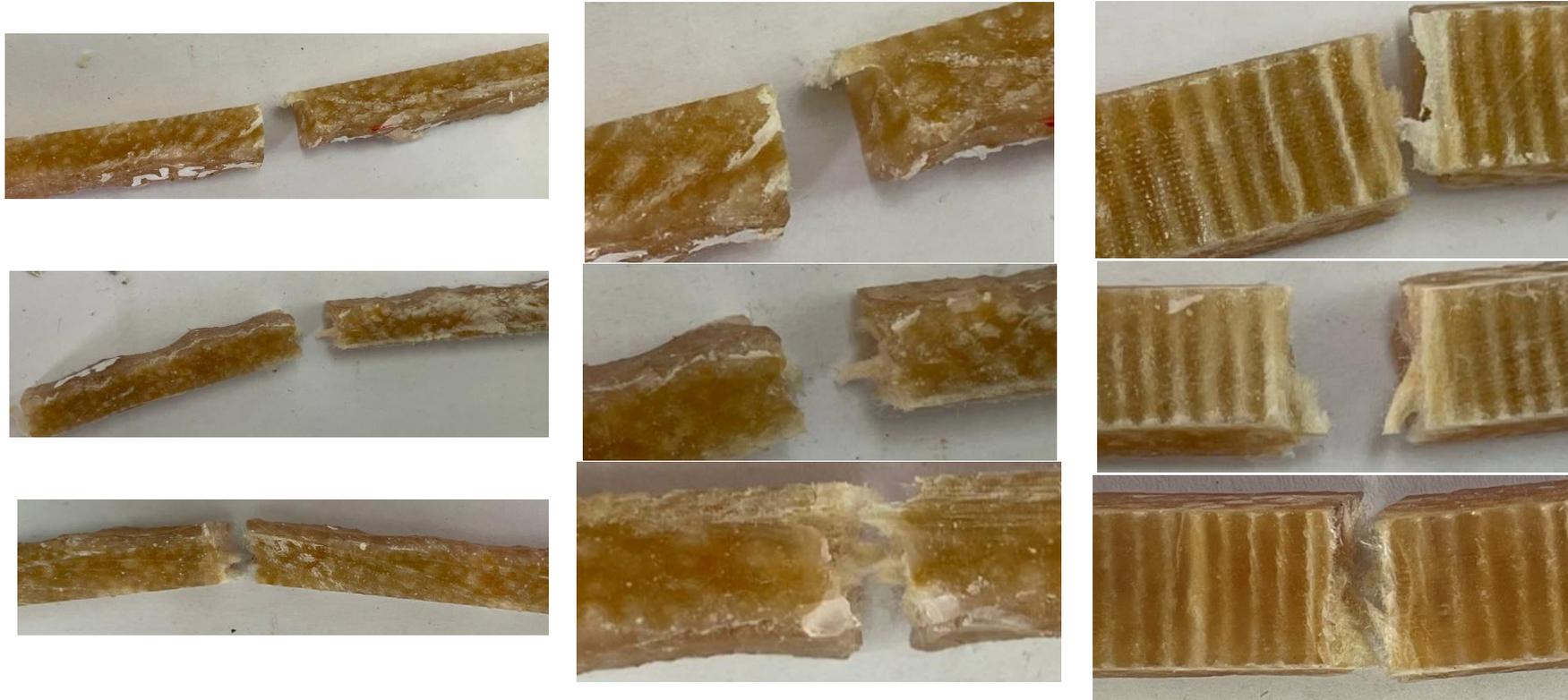


Figure 3.4 : Faciès de rupture des éprouvettes 4, 5 et 1 impactée respectivement à leurs surfaces extérieur, intérieur et latérale.

3.3 Essai de flexion

Les éprouvettes des essais de flexion ont été découpées à partir des tubes composites, élaborés à partir de la résine polyester 1, dans leur sens axiale selon la norme ASTM D790-17 et leurs dimensions sont récapitulés dans le Tableau 3.5. Trois éprouvettes concaves et trois convexes ont été testés, en flexion 3-points sur une machine de traction *Walter & Bai*, avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min, et une longueur entre appuis de 140 mm.

Tableau 3.5: Dimension des éprouvettes élaborés à partir de la résine polyester 1.

Eprouvettes n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Forme	Type
1	15,5	7,75	Concaves	Résine polyester 1
2	15,30	7,55		
3	16,20	8,05		
1	15,70	8,30	Convexes	
2	15,15	8,08		
3	15,20	8,40		

Les courbes force/déplacement (Figure 3.5), contrainte/déplacement (Figure 3.6) permettent d'évaluer le comportement du matériau composite lorsqu'il est soumis à une charge de flexion croissante.

Ces courbes offrent des informations sur la rigidité, la résistance et la capacité d'un matériau à absorber l'énergie avant sa rupture. Les courbes force-déplacement et contrainte-déplacement présentent une similarité dans leur comportement par plusieurs phases caractéristiques.

L'évolution des courbes force-déplacement (Figure 3.5) et contrainte-déplacement (Figure 3.6) des éprouvettes concaves se déroule en trois phases : la première phase se caractérise par une augmentation quasi-linéaire jusqu'à l'atteinte de la force ultime, où la déformation est réversible et la relation entre la contrainte et le déplacement est proportionnelle, conformément à la loi de Hook. Cette partie de la courbe permet la détermination des caractéristiques mécaniques à savoir : le module de flexion qui représente la rigidité du matériau ainsi que la force ou la contrainte à la rupture. Suivi par une chute de la force ou de la contrainte dans la deuxième phase due à la rupture de la couche externe tendu orienté à 90 degrés où le

matériau subit des déformations irréversibles et la relation entre la contrainte et le déplacement devient non proportionnelle. Enfin, une dégradation graduelle quasi-linéaire décroissante de la force ou de la contrainte est enregistré dans la troisième phase qui est attribuée à la résistance des couches internes orientée à $\pm 55^\circ$.

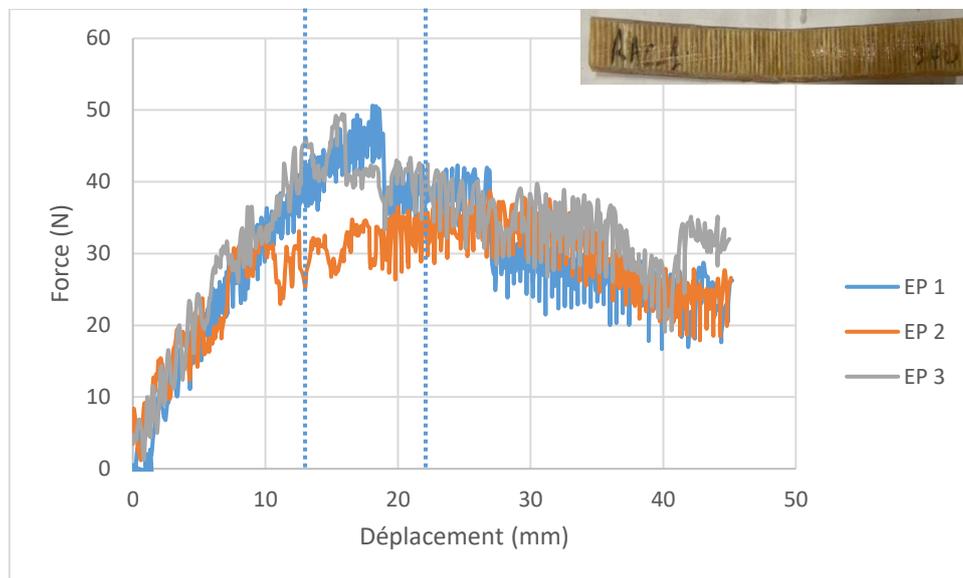


Figure 3.5 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes concaves testés en flexion 3-points.

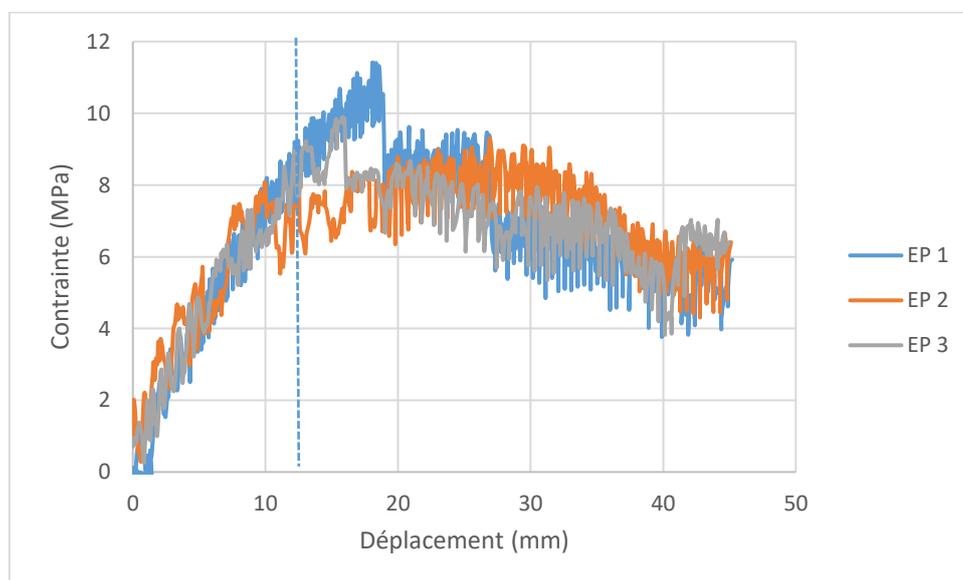


Figure 3.6 : Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes concaves testés en flexion 3-points.

Les éprouvettes sous forme convexe, dont les dimensions sont présentées dans le Tableau 3.5, élaborées à partir de la résine 1 sont testées de même manière que les éprouvettes en forme concaves et leurs courbes force/déplacement et contrainte/déplacement sont présentées respectivement dans les Figures 3.7 et 3.8.

Ces courbes mettent en évidence trois phases distinctes de déformation : la première phase correspond à la région élastique de l'éprouvette, où la déformation est réversible, une augmentation jusqu'à l'atteinte d'une force maximale puis une diminution, c'est-à-dire un comportement non linéaire en forme de chapeau caractérise la deuxième phase. Enfin, la troisième phase se caractérise par une décroissance non-linéaire de la force due à la rupture de la couche externe tendue orientée à 90 degré qui se propage vers les couches internes orientées à ± 55 degrés.

Les figures 3.7 et 3.8 montrent que l'éprouvette 3 présente la meilleure résistance où la force maximale enregistrée est égale à 62,91 N correspondant à une contrainte maximale de 12,32 MPa par rapport aux éprouvettes 1 et 2 (Tableau 3.6).

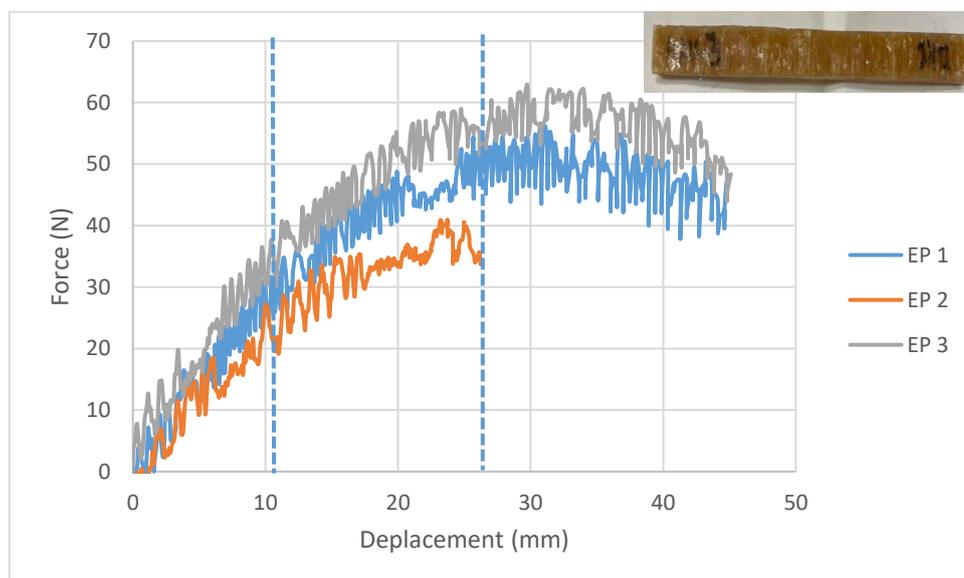


Figure 3.7: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborées à partir de la résine 1 puis testées en flexion 3-points.

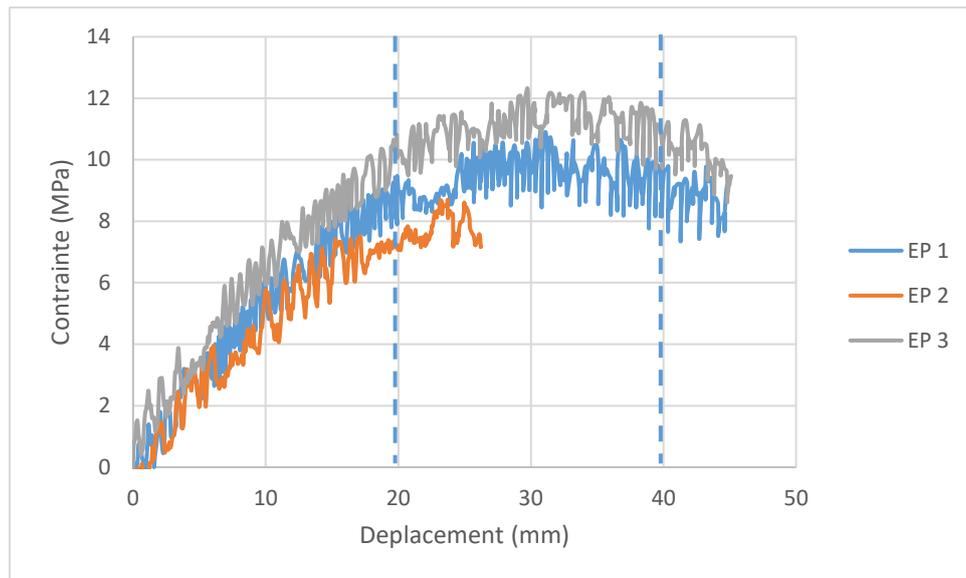


Figure 3.8: Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborés à partir de la résine 1 puis testées en flexion 3-points.

D'après les résultats présentés dans le Tableau 3.6, il est à noter que les éprouvettes de forme convexe sont légèrement supérieures que celles de forme concave. Les valeurs moyennes de σ_{max} sont de $10,63 \pm 1,53 \text{ MPa}$ et de F_{max} sont de $53,30 \pm 9,39 \text{ N}$ pour les éprouvettes convexe, tandis que les valeurs moyennes de σ_{max} sont de $10,19 \pm 0,90 \text{ MPa}$ et de F_{max} sont de $46,18 \pm 5,36 \text{ N}$ pour les éprouvettes concaves.

Tableau 3.6 : Résultats obtenus des tests de flexion des éprouvettes concave et convexe élaborées à partir de la résine 1.

Eprouvette N°	Force maximale (N)	Contrainte maximale (MPa)	Type	Résine Polyester 1
1	50,63	11,42	concaves	
2	38,63	9,30		
3	49,29	9,86		
Valeur moyenne	$46,18 \pm 5,36$	$10,19 \pm 0,90$		
1	56,45	10,96	convex	
2	40,56	8,61		
3	62,91	12,32		
Valeur moyenne	$53,30 \pm 9,39$	$10,63 \pm 1,53$		

Les facies de rupture des éprouvettes concave et convexe testées en flexion 3-points sont présentées dans la Figure 3.9.

Les éprouvettes qui présentent une forme concave révèlent une rupture dans la couche extérieure tendue orientée à 90 degré en raison de la charge appliquée lors de la flexion. Ce phénomène est causé par un couplage de compression à l'intérieur de l'éprouvette et de traction à l'extérieur. Étant donné que les couches extérieures sont orientées à 90° degré, elles sont parallèles à la direction de la force appliquée et ne supporte donc aucune charge ; c'est les couches orientées à $\pm 55^\circ$ qui participe efficacement à la résistance (exemple de l'éprouvette 1, voir Figure 3.9).

Les éprouvettes ayant une forme convexe montrent l'apparition d'une fissure dans la zone tendue qui se développe perpendiculairement à la direction de la charge appliquée, situé pratiquement en dessous de l'appuis supérieur (exemple de l'éprouvette 3, Figure 3.9).



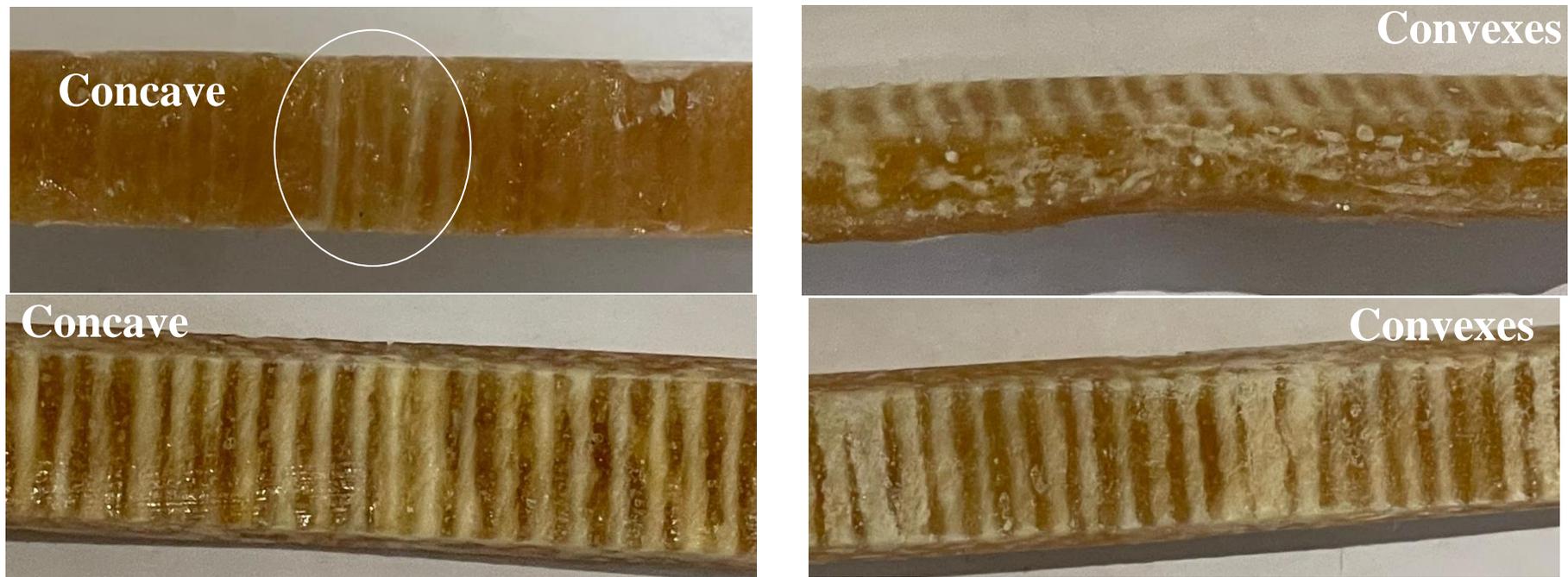


Figure 3.9: Faciès de rupture des éprouvettes concave (épreuve 1), convexe (épreuve 3) testées en flexion 3-points).

Les éprouvettes concave et convexe obtenues par la découpe longitudinale de tube élaborés à partir de la deuxième résine, dans les mêmes conditions pour les tests précédents, possèdent les dimensions récapitulées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7: Dimensions des éprouvettes élaborées par résine polyester 2.

Eprouvettes n°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Forme	Type
1	15,60	8,60	Concaves	Résine polyester 2
2	15,20	8,20		
3	15,50	8,70		
1	15,07	8,52	Convexes	
2	15,57	8,28		
3	15,08	8,11		

Les éprouvettes fabriquées avec la résine polyester 2, qui ont une forme concave, ont été soumises aux mêmes tests que les éprouvettes fabriquées avec la résine 1. Les courbes de force/déplacement (Figure 3.10) et de contrainte/déplacement (Figure 3.11) présentent des similarités entre les trois comportements pour d'éprouvettes.

Les courbes d'évolution de force-déplacement (Figure 3.10) et contrainte-déplacement (Figure 3.11) des éprouvettes concaves se déroule en trois phases qui se caractérise respectivement par une augmentation quasi- linéaire de la force jusqu'à un déplacement de 10 mm dans la première phase, est plus grande que les éprouvettes élaborées à partir de la résine 1. Suivi par une chute de la force ou de la contrainte au cause rupture de la couche extérieure tendue orienté à 90 degré Enfin, une dégradation quasi-linéaire décroissante de la force ou de la contrainte est enregistré dans la troisième phase qui est attribuée à la résistance des couches internes orientée à $\pm 55^\circ$ sont affiché dans les éprouvette 1 et 3. Cependant, l'éprouvette 2 a montré une augmentation suivie par stabilité de la force ou de la contrainte, en raison de son glissement.

Les figure 3.10 et 3.11 montre que l'éprouvette 1 présente la meilleure résistance où la force maximale enregistré est égale à 69,09 N correspondant à une contrainte maximale de 12,58 MPa par apport les éprouvettes 2 et 3 (Tableau 3.8).

Pour l'éprouvette 1, une résistance significative est observée, avec une force maximale $F_{max} = 69,09 \text{ N}$ correspondant à une contrainte maximale $\sigma_{max} = 12,52 \text{ MPa}$. L'éprouvette 2 affiche également des valeurs élevées, avec une force maximale de $F_{max} = 64,73 \text{ N}$ et $\sigma_{max} = 11,59 \text{ MPa}$ et l'éprouvette 3 montre des valeurs les plus faibles avec une force maximale $F_{max} = 57,98 \text{ N}$ et $\sigma_{max} = 11,59 \text{ MPa}$.

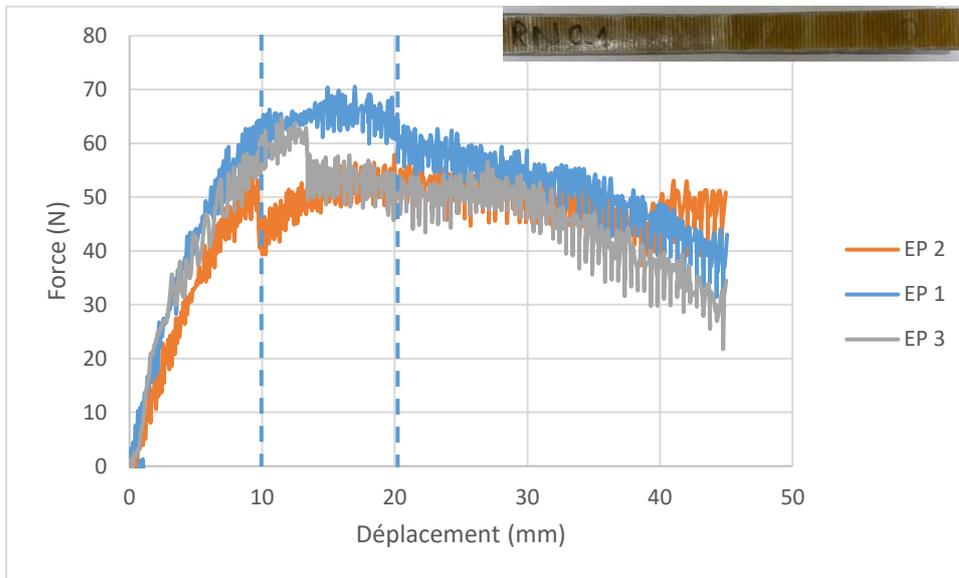


Figure 3.10 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes concaves élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.

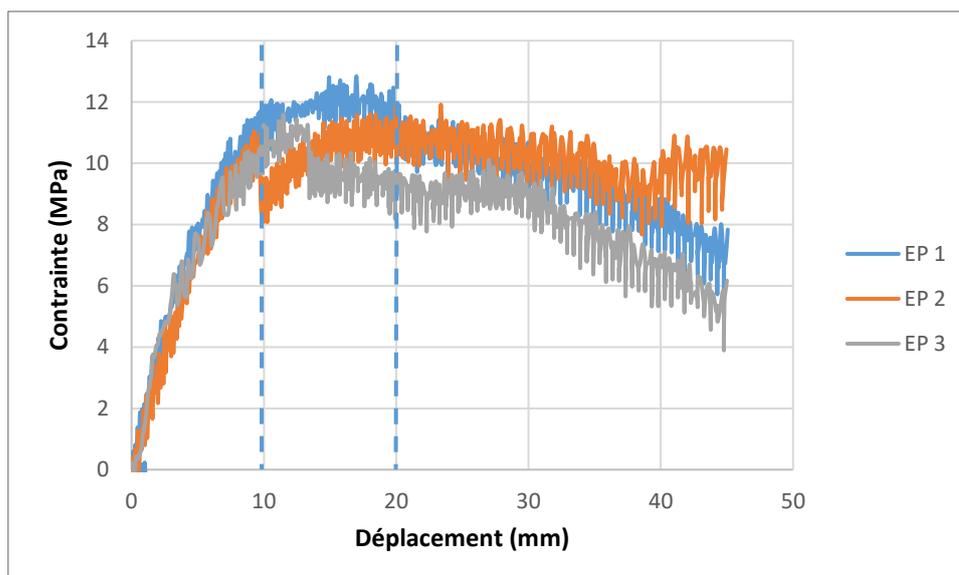


Figure 3.11 : Evolution de la contrainte en fonction du déplacement des éprouvettes concaves élaborés à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.

Les éprouvettes sous forme convexe, élaborées à partir de la résine 2 sont testées de même la manière que les éprouvettes en forme concaves et leurs courbes force/déplacement et contrainte/déplacement sont présentées respectivement dans les Figures 3.12 et 3.13.

Ces éprouvettes convexes élaborées à partir de la résine 2 ont montré un comportement similaire aux éprouvettes élaborés à partir de la résine 1 avec une résistance environ deux fois plus grande. Ces courbes mettent en évidence trois phases distinctes : la première phase correspond à la région élastique représentée par une augmentation quasi-linéaire en déplacement de 10 mm. Ensuite, ces éprouvettes montrent une augmentation de la force ou de la contrainte jusqu'à ce qu'elle atteigne sa limite. Cette force ou contrainte diminue au début de la rupture, formant une forme de chapeau. Enfin une diminution progressive non-linéaire de la force ou de la contrainte.

Les figures 3.12 et 3.13 montrent que l'éprouvette 2 présente la meilleure résistance où la force maximale enregistrée est égale à 109,35 N correspondant à une contrainte maximale de 21,51 MPa par rapport aux éprouvettes 1 et 3 (Tableau 3.8).

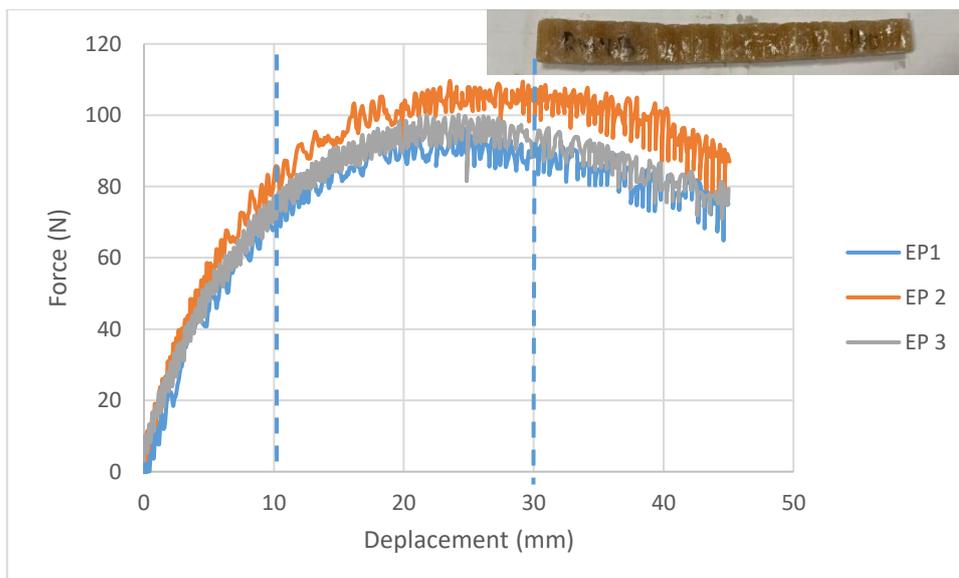


Figure 3.12: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborées à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.

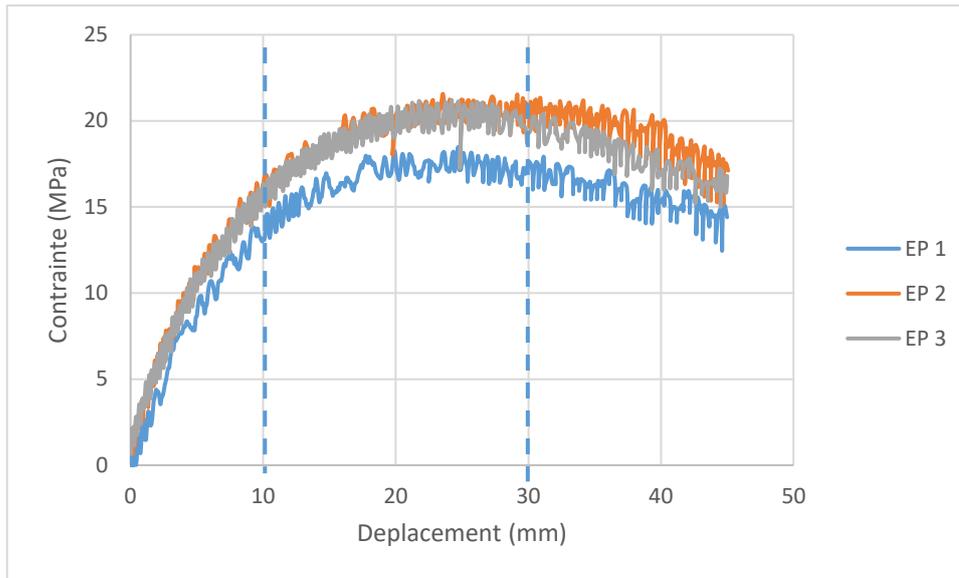


Figure 3.13: Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes convexes élaborées à partir de la résine 2 puis testées en flexion 3-points.

Les résultats indiquent que les éprouvettes de forme convexe ont démontré une résistance supérieure par rapport aux éprouvettes de forme concave. Les valeurs moyennes de contrainte maximal $\sigma_{max} = 101,92 \pm 5,49 \text{ MPa}$ pour les éprouvettes convexes étaient de $20,40 \pm 1,36 \text{ MPa}$, tandis que pour les éprouvettes concaves, elles étaient de $12,02 \pm 0,41 \text{ MPa}$. De même, les valeurs moyennes de la force maximale F_{max} étaient de $101,92 \pm 5,49 \text{ N}$ pour les éprouvettes convexes et de $63,93 \pm 4,57 \text{ N}$ pour les éprouvettes concaves.

Tableau 3.8: Résultats obtenus des tests de flexion des éprouvettes concave et convexe élaborées à partir de la résine 1.

Eprouvette N°	Force maximale (N)	Contrainte maximale (MPa)	Type	Résine polyester 2
1	69,09	12,58	concaves	
2	57,98	11,91		
3	64,73	11,59		
Valeur moyenne	$63,93 \pm 4,57$	$12,02 \pm 0,41$		
1	96,25	18,48	convexe	
2	109,35	21,51		
3	100,17	21,21		
Valeur moyenne	$101,92 \pm 5,49$	$20,40 \pm 1,36$		

L'analyse des faciès de la rupture des éprouvettes concave et convexe testées en flexion 3-points sont présentées dans la Figure 3.14.

Les éprouvettes qui présentent une forme concave révèlent une rupture dans la couche tendue extérieure orientée de 90 degré et délaminage représenté dans les couches intérieures orienté de $\pm 55^\circ$ (Exemple voire l'éprouvette 1).

Les éprouvettes ayant une forme convexe montrent l'apparition d'une fissure se développant perpendiculairement à la direction de la charge appliquée (Exemple voire l'éprouvette 3).



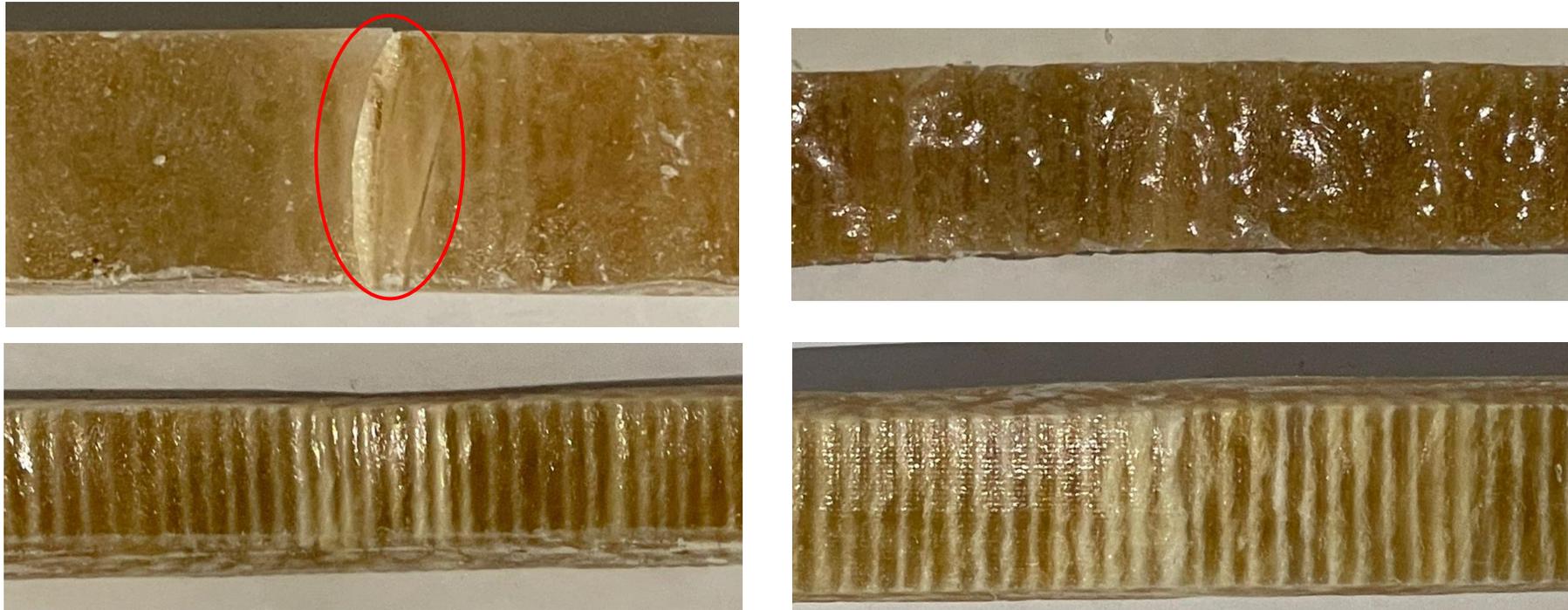


Figure 3.14: faciès de rupture des éprouvettes sous forme concave (Eprouvette 1), convexe (Eprouvette 3).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'interprétation des résultats des tests de caractérisation des éprouvettes élaborés à partir de deux résine polyester différentes et d'identifiés leur résistance au choc par le test résilience (Charpy) et en flexion. Les principales conclusions sont comme suivies :

- ✓ Les éprouvettes découpé dans le sens transversal à partir de la résine 2 impactées sur leur face extérieure ont manifesté une énergie moyenne de 4,50 joules, supérieure à celles impactées sur leur face intérieure et leur face latérale et les éprouvettes élaborée à partir de la résine 1.
- ✓ L'énergie est quasi nulle pour les éprouvettes découpé dans la sens longitudinale de tube lorsqu'elle est impactée sur ses trois faces lors des tests de choc.
- ✓ Les éprouvettes de forme convexe élaboré à partir de la résine 2 ont démontré des valeurs moyennes plus élevées de contrainte maximale $\sigma_{\max}=20.40 \pm 1,36 \text{ MPa}$ et de force maximale $F_{\max}=101,92 \pm 5,49 \text{ N}$ par rapport aux éprouvettes de forme convexe élaboré à partir de la résine 1 qui son démontré des valeur moyennes de contrainte maximale $\sigma_{\max}=10,63 \pm 1,53 \text{ MPa}$ et de force maximale $F_{\max}=53,30 \pm 9,39 \text{ N}$.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de fabriquer des tubes en matériau composite en utilisant deux résines polyester obtenu par deux fournisseur, afin d'évaluer leur impact sur les propriétés mécaniques à savoir résistance Charpy et la flexion 3-points. Les principales conclusions sont comme suit :

- ✓ La méthode d'enroulement filamentaire employée dans cette étude pour la fabrication de tubes composites présente une combinaison avantageuse de haute productivité et de précision élevée, garantissant ainsi la qualité des pièces produites ;
- ✓ Les tests de résilience (essai Charpy) et de flexion ont été réalisés en conformité avec les normes ASTM D6110-04 et ASTM D790-17, sur des éprouvettes prélevées à partir des tubes composites fabriqués ;
- ✓ Les éprouvettes prise dans le sens transversal des tubes ont montré plus d'énergie que les éprouvettes coupés du sens longitudinale qui ont montré une énergie très faible voire nulle sous tous ses aspects ;
- ✓ Les éprouvettes concaves ont montré une plus grande résistance lorsqu'ils ont été impactées sur leur face externe par rapport à celles impacté à leur faces internes et latérales ;
- ✓ Les caractéristiques mécaniques moyennes de l'énergie (évaluée par le test de résilience Charpy) et de la contrainte moyenne (calculer par le test de flexion) ont été déterminées afin de mettre en évidence les éprouvettes présentant les performances les plus élevées parmi les éprouvettes élaborés par deux résine polyester ;
- ✓ Les éprouvettes convexes élaborées à partir de la résine 2 ont montrées une meilleure résistance à la flexion par rapport celles concaves ainsi que les éprouvettes concaves et convexes élaborées à partir de la résine 1 ;
- ✓ Les faciès de rupture après les tests de flexion révèlent que les éprouvettes concaves présentaient des ruptures sur leurs surfaces tendues, tandis que les éprouvettes convexes présentaient des fissures en dessous de la charge qui sont initiés dans les faces tendues et se propagent vers les surfaces comprimées ;
- ✓ L'emploi de différentes résines à un impact sur les propriétés mécaniques des matériaux composites, comme le démontrent les résultats trouvées pour les essais de flexion et de résilience (essai Charpy).

Références bibliographiques

- [1] Berthelot J. M. Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures. 5^{ème} édition TEC & DOC, 2010.
- [2] Laurent Gornet. Généralistes sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 2008.
- [3] Ringuette B. Matériaux Composites à Base de Fibres de Chanvre, thèse de doctorat, université Laval Québec, 2011.
- [4] Christophe BALEY, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Technique de l'ingénieur 10 juil. 2020.
- [5] « Glossaire des matériaux composites » - carma –Actualisation octobre 2006.
- [6] Daniel Gay, " Matériaux composite ", Hermes, 4^{ème} édition, 1997
- [7] DRIS Locif. Evaluation simultanée des vitesses de propagation et d'atténuation des ultrasons dans des matériaux composites et polymériques. Mémoire de magistère université de Boumerdès, 2007
- [8] Paolo VANNUCCI, "Cours Matériaux Composites". Université de Versailles et Saint Quentin-en-Yvelines, A.U, 2005-06.
- [9] Imen KALLEL-KAMOUN, "Analyse mécanique de l'essai de flexion par flambement postcritique". Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke (Canada), 30 Juin 1999
- [10] K. Kaw, mechanics of composite materials 2ed edition Taylor & Francis Group 2006
- [11] Ghouaoula Abdelhamid (2011). Simulation du comportement mécanique de la partie cylindrique d'un réservoir de stockage d'hydrogène soumis à un chargement quasi statique. Mémoire de magister, Université de Hassiba Benbouali Chlef.
- [12] FARROKHABADI, A, BAHRAMI, M, et BABAEI, Ramzan. Predicting the matrix cracking formation in symmetric composite laminates subjected to bending loads. Composite Structures, 2019, vol. 223, p. 110945.
- [13] ARIFIN, A. M. T., et al. Investigation of the behaviour of a chopped strand mat/woven roving/foam-Klegecell composite lamination structure during Charpy testing. Materials & Design, 2014, 59: 475-485.
- [14] KARI, D E., BENMOUNAH, A., BEZAZI, A., BEZAZI, B, BAALI, B. Evaluation of circumferential properties of Jute/Epoxy tubes manufactured by filament winding based on the fiber orientation. Journal of materials and engineering structures 8(2021) p 459-468.
- [15] YAN, L, CHOUW, Nawawi. Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application. Materials & Design, 2013, vol. 51, p. 629-640.

[16] MAHDI, E., HAMOUDA, AMS and, et SEBAEY, T. A. The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, vol. 56, p. 923-928.

[17] ASTM D 6110-04. Standard Test Methods for determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics 2004.

[18] ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 2017.

[19] [https://www.rocdacier.com/essai-resilience./](https://www.rocdacier.com/essai-resilience/)