

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par :

Himour Moundher et Gheraibia Akrem

Thème

Détermination des propriétés mécaniques élastiques des matériaux composites par une technique vibratoire

Le jury

Pr. BEZAZI Abderrezak	Univ 8 Mai 1945. Guelma	Président / Encadreur
Pr. DJEBALA Abderrazak	Univ 8 Mai 1945. Guelma	Examineur principal
Pr. KECHIDA Sihem	Univ 8 Mai 1945. Guelma	Examineur
Dr. KADDECHE Mounia	Univ 8 Mai 1945. Guelma	Examineur
Dr. BENMOHAMED Hanene	Univ 8 Mai 1945. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicace

À nos chers parents,

pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien
constant.

Merci de croire en nous, dans les moments de doute comme dans
ceux de réussite.

À nos enseignants,

qui nous ont transmis leur savoir avec passion et exigence.

À nos frères et sœurs,

pour leur affection, leur patience et leurs encouragements tout au
long de ce parcours.

À tous ceux qui nous sont chers,

et qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

**Nous vous dédions ce mémoire avec tout notre respect et notre
reconnaissance.**

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à الله qui nous a permis d'achever ce mémoire dans de bonnes conditions.

Nos remerciements s'adressent en particulier au professeur **BEZAZI Abderrezak**, notre encadreur, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son accompagnement tout au long de ce travail, ainsi que pour la confiance qu'il nous a accordée. Son encadrement a été d'une aide précieuse à chaque étape de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury de notre soutenance, à savoir : **Pr. DJEBALA Abderrazek**, **Pr. KECHIDA Sihem**, **Dr. KADDECHE Mounia** et **Dr. BENMOHAMED Hanane**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du Département d'électrotechnique et d'Automatique ainsi que ceux du Département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 Guelma pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont dispensé durant tout notre parcours universitaire, ainsi que pour leur contribution à notre formation scientifique et personnelle.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **GUENDOZ Abdellah** et à **GUEBAILIA Mounir**; respectivement technicien et étudiant en Master 2 au Département de Génie Mécanique pour leur aides et soutien indéfectible, leurs conseils éclairés et leur disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur bienveillance, leur patience et leur présence constante à nos côtés ont été d'une grande aide, tant dans les moments de doute que dans ceux de motivation.

Nos pensées vont aussi à **nos familles**, pour leur soutien moral, leur patience, leur compréhension et leurs encouragements constants tout au long de nos études.

Nous tenons également à remercier **nos collègues et amis** pour les échanges enrichissants, l'esprit d'entraide et les moments de partage qui ont marqué ces mois de travail.

Enfin, nous adressons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. À toutes et à tous, merci.

Résumé :

Ce mémoire de fin d'études de master porte sur l'élaboration de matériaux composites à matrice polymère, renforcée par différents types de fibres : naturelles (jute), synthétiques (fibre de verre V500) et hybrides (combinaisons de fibres naturelles et synthétiques). L'objectif principal de cette étude est de déterminer les propriétés mécaniques de ces matériaux, dans le domaine élastique, à l'aide d'une méthode vibratoire non destructive, conforme à la norme ASTM E1876-01. Cette méthode repose sur l'analyse des fréquences naturelles de vibration des éprouvettes, permettant d'en déduire les constantes mécaniques : le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ). Elle présente l'avantage d'être rapide, non destructive, et particulièrement adaptée à l'étude des matériaux composites, souvent difficiles à caractériser par des méthodes classiques. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques dépendent fortement de la nature des fibres et de leur orientation. Les fibres naturelles offrent des performances modestes, mais présentent un intérêt certain en raison de leur faible impact environnemental. À l'inverse, les fibres synthétiques, en particulier la fibre de verre V500, permettent d'atteindre des performances mécaniques plus élevées. Les composites hybrides, quant à eux, présentent des performances intermédiaires, fortement influencées par la compatibilité entre les types de fibres utilisés. Parmi les combinaisons étudiées, le composite jute/V500 s'est distingué par un bon compromis entre rigidité, résistance et durabilité, illustrant une synergie intéressante entre fibres naturelles et synthétiques. Ce travail met ainsi en lumière le potentiel de l'hybridation pour optimiser les performances mécaniques tout en intégrant des matériaux plus durables. Enfin, il confirme la pertinence de la méthode vibratoire comme outil de caractérisation fiable, ouvrant la voie à des applications industrielles dans un contexte de transition vers des matériaux plus respectueux de l'environnement.

Abstract:

This master's thesis focuses on the development of polymer matrix composite materials reinforced with different types of fibers: natural (jute), synthetic (V500 glass fiber), and hybrid (combinations of natural and synthetic fibers). The main objective of this study is to determine the mechanical properties of these materials in the elastic domain using a non-destructive vibratory method in accordance with ASTM E1876-01. The method is based on the analysis of the specimens' natural vibration frequencies to derive their mechanical constants: Young's modulus (E), shear modulus (G), and Poisson's ratio (μ). This technique offers several advantages, including speed, non-destructiveness, and suitability for composite materials, which are often challenging to characterize using conventional methods. The results indicate that the mechanical properties are highly dependent on the type of fiber used and its orientation. Natural fibers provide modest performance but are valued for their low environmental impact. Conversely, synthetic fibers, particularly V500 glass fiber, deliver superior mechanical performance. Hybrid composites exhibit intermediate properties, which are strongly influenced by the compatibility between the combined fiber types. Among the tested combinations, the jute/V500 hybrid composite showed the best compromise in terms of stiffness, strength, and durability, demonstrating a beneficial synergy between natural and synthetic fibers. This study highlights the potential of fiber hybridization to enhance mechanical performance while incorporating more sustainable materials. Finally, it confirms the relevance of the vibratory method as a reliable characterization tool for composite materials, paving the way for industrial applications in a context of increasing demand for environmentally friendly materials.

ملخص:

يتناول هذا البحث لنيل شهادة الماستر تطوير مواد مركبة ذات مصفوفة بوليميرية، مدعمة بأنواع مختلفة من الألياف: طبيعية (مثل الجوت)، صناعية مثل ألياف الزجاج (V500)، وهجينة (مزيج من الألياف الطبيعية والصناعية). الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الميكانيكية لهذه المواد في المجال المرن، باستخدام طريقة اهتزازية غير تدميرية، وفقاً للمعيار ASTM E1876-01. تعتمد هذه الطريقة على تحليل الترددات الطبيعية لاهتزاز العينات، مما يسمح باستخلاص الثوابت الميكانيكية: معامل المرونة (E)، ومعامل القص (G)، ومعامل بواسون (μ) وتتميز هذه الطريقة بكونها سريعة، وغير تدميرية، ومناسبة بشكل خاص لدراسة المواد المركبة التي يصعب اختبارها بالطرق التقليدية. أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية تعتمد بشكل كبير على نوع الألياف واتجاهها. فالألياف الطبيعية تُظهر أداءً ميكانيكياً متواضعاً، لكنها تحظى بأهمية متزايدة بفضل تأثيرها البيئي المنخفض. في المقابل، توفر الألياف الصناعية، لا سيما ألياف الزجاج V500، خصائص ميكانيكية عالية. أما المواد المركبة الهجينة، فتتمثل أداءً متوسطاً، يتأثر بشكل كبير بتوافق أنواع الألياف المستخدمة فيما بينها. ومن بين التركيبات المدروسة، تميز المركب الهجين Jute/V500 بتوازن جيد بين الصلابة والمقاومة والمتانة، مما يُبرز التآزر الفعال بين الألياف الطبيعية والصناعية. يسلط هذا العمل الضوء على الإمكانيات الواعدة للهجينة في تحسين الخصائص الميكانيكية، مع دمج مواد أكثر استدامة. كما يؤكد فعالية الطريقة الاهتزازية كأداة موثوقة لتوصيف المواد المركبة، ويمهد الطريق نحو تطبيقات صناعية ضمن سياق الانتقال نحو مواد أكثر احتراماً للبيئة.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
-------------------------------------	-----------------

Chapitre I : Étude bibliographique

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les matériaux composites	4
<i>I.2.1 Définition d'un matériau composite</i>	4
<i>I.2.2 Les constituants des matériaux composites</i>	5
<i>I.2.2.1 Les renforts</i>	5
<i>I.2.2.2 La matrice</i>	5
<i>I.2.3 Types de matériaux composites</i>	6
<i>I.2.4 Matériaux composites à fibres naturelles</i>	6
<i>I.2.5 Présentation de quelques fibres végétales</i>	9
<i>I.2.6 Morphologie de la plante de jute</i>	10
<i>I.2.6.1 Fibre de jute</i>	11
<i>I.2.6.2 Extraction de la fibre de jute</i>	12
<i>I.2.7 Propriétés usuelles des fibres végétales et fibres de verre</i>	13
<i>I.2.7.1 Propriétés physiques</i>	13
<i>I.2.7.2 Propriétés mécaniques</i>	15
<i>I.2.8 Principaux avantages et inconvénients des fibres</i>	16
<i>I.2.9 Application des matériaux composites à base de fibres naturelles</i>	17
I.3 État de l'art sur les composites en fibres végétales et hybrides	20
I.4 Conclusion et position du problème	34

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

II.1 Introduction	35
II.2 Matériaux utilisés	35
<i>II.2.1 Tissu de fibre de jute</i>	35
<i>II.2.2 Tissu de fibre de verre</i>	36
<i>II.2.3 La matrice (résine polyester)</i>	37
II.3 Protocole de préparation des plaques composites	38

<i>II.3.1 Méthode de préparation des plaques composites</i>	38
<i>II.3.2 Découpe des plaques composites en éprouvettes</i>	44
<i>II.3.3 Capteur et son collage</i>	45
II.4 Protocole expérimental	45
<i>II.4.1 Norme utilisée</i>	45
<i>II.4.2 Méthodologie et expérience</i>	47
II.5 Conclusion	49
 Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	50
III.2 Résultats et Discussion	50
<i>III.2.1 La résine</i>	52
<i>III.2.2 Le composite de V500</i>	54
<i>III.2.3 Le composite de JUTE</i>	60
<i>III.2.4 Le composite de JUTE/V500</i>	65
III.4 Conclusion	71
 <i>Conclusion générale</i>	 72

Liste des figures

Figure numéro	Désignation	Page
<i>Chapitre I : Étude bibliographique</i>		
Figure I.1	Matériau composite	4
Figure I.2	Différentes fibres naturelles et synthétiques	8
Figure I.3	Quelques plantes, origine des fibres utilisées	9
Figure I.4	La plante de jute	11
Figure I.5	Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales	12
Figure I.6	Extraction des fibres de jute : A) rouissage, B) lavage	13
Figure I.7	Application des composites naturels dans l'automobile	19
Figure I.8	Application des composites dans le secteur de la construction	19
Figure I.9	Autres applications comme planches de surf	20
Figure I.10	Courbes TGA/DTG d'échantillons composites	21
Figure I.11	Courbes de contrainte-déformation en traction typiques pour les échantillons composites hybrides.	22
Figure I.12	Courbes contrainte-déformation en flexion pour les échantillons composite	23
Figure I.13	Caractéristiques de vibration utilisant la simulation FEM : (a) mode de flexion, (b) mode de torsion	24

Figure I.14	Signal de réponse vibratoire mesurée et son spectre de fréquence en mode flexion.	25
Figure I.15	Signal de réponse vibratoire mesurée et son spectre de fréquence en mode torsion.	25
Figure I.16	Dispositif expérimental	26
Figure I.17	Résultats des fréquences de résonance des échantillons de stratifiés composites étudiés : (a) Alliage d'aluminium 2024-T3 et Composites, (b) C GF-E ; (c) CF-E ; (d) hybride 1 ; (e) hybride 2.	27
Figure I.18	Courbes de comportement d'amortissement des échantillons de stratifiés composites étudiés : a) alliage d'aluminium 2024-T3, b) GF-E, c) CF-E ; d) Hybride 1, e) Hybride 2.	29
Figure I.19	Comportement d'absorption d'humidité des composés de polyester de jute pour l'eau normale	30
Figure I.20	Comportement d'absorption d'humidité des composés de jute et de polyester pour l'eau de mer	30
Figure I.21	Résistance à la flexion du composite	31
Figure I.22	Module de flexion du composite	31
Figure I.23	Fréquence propre en fonction du temps et accélération en fonction du temps (à l'état initial)	33
<i>Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales</i>		
Figure II.1	(a) Rouleau de tissu de jute de densité 300 g/m ² et (b) Zone sélectionnée.	36
Figure II.2	(A) Rouleau de tissu de verre de densité 500 g/m ² et (B) Tissu de fibre de verre	36
Figure II.3	Résine polyester utilisée	37
Figure II.4	Préparation de plaques composites stratifiées par la technique du sac	40
Figure II.5	Démoulée des plaques	42

Figure II.6	Préparation des plaques en résine	43
Figure II.7	Plaques composites et Plaques en résine	43
Figure II.8	Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques biocomposites en éprouvettes.	44
Figure II.9	Eprouvettes utilisées en flexion 3-points : (A) de jute, (B) de résine	44
Figure II.10	Capteur et matériel utilisé pour le collage	45
Figure II.11	(A) Impacteur utilisé pour l'excitation vibratoire (B) appareil de PicoScope	48
Figure II.12	L'essai expérimental réalisé (1) Un support métallique, (2) le PicoScope, (3) La signal de réponse vibratoire, (4) l'éprouvette avec capteur montée.	48
Chapitre III : Résultats et discussions		
Figure III.1	Les signaux de réponse vibratoire mesurée pour le paque de résine pour les tests effectué.	53
Figure III.2	une représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de la résine.	54
Figure III.3	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite V500 pour l'orientation 0/90.	55
Figure III.4	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite V500 pour l'orientation 65°	56
Figure III.5	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite V500 pour l'orientation 25°	56
Figure III.6	Signal de réponse vibratoire mesurée du composite V500 pour l'orientation 45°.	57
Figure III.7	une représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de V500.	59
Figure III.8	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE pour l'orientation 0/90.	60
Figure III.9	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE pour l'orientation 65°.	61

Figure III.10	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE pour l'orientation 25°	61
Figure III.11	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE pour l'orientation 45°	62
Figure III.12	une représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de JUTE.	64
Figure III.13	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE/V500 pour l'orientation 0/90	65
Figure III.14	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE/V500 pour l'orientation 65°	66
Figure III.15	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE/V500 pour l'orientation 25°	66
Figure III.16	Signal de réponse vibratoire mesurée de composite JUTE/V500 pour l'orientation 45°	67
Figure III.17	Représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de JUTE/V500	69

Liste des tableaux

Tableau numéro	Désignation	Page
Tableau I.1	Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales et des fibres synthétiques	14
Tableau I.2	Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales et des fibres synthétiques	14
Tableau I.3	Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales et des fibres synthétiques	16
Tableau I.4	Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales	16
Tableau I.5	un tableau clair présentant les avantages et inconvénients des matériaux composites	17
Tableau I.6	Analyse TGA pour les composites hybrides PDPF/GF	21
Tableau I.7	Propriétés en traction des composites.	22
Tableau I.8	Propriétés de flexion des composites textés	23
Tableau I.9	Caractéristiques des matériaux issus des études numériques et expérimentales.	25
Tableau I.10	Valeurs des fréquences des matériaux analysés jusqu'à 500 Hz	27
Tableau I.11	Constantes d'ingénieries théoriques calculées par l'approche micromécanique	28
Tableau I.12	Effet de l'absorption d'humidité sur le comportement vibratoire (eau normale)	33
Tableau I.13	Effet de l'absorption d'humidité sur le comportement vibratoire (eau de mer)	33
Tableau III.1	Caractéristiques physiques des composites	51

Tableau III.2	Propriétés mécaniques de la résine	52
Tableau III.3	Propriétés mécaniques du V500	57
Tableau III.4	Propriétés mécaniques du JUTE	63
Tableau III.5	Propriétés mécaniques du JUTE/V500	67

Introduction générale

Dans le contexte industriel actuel, l'utilisation des matériaux composites représente un atout majeur pour la conception et la fabrication de pièces techniques, grâce à leur légèreté, leur rigidité et leur excellente résistance mécanique. Ces matériaux, constitués d'un renfort, dans notre cas sous forme de fibres synthétique (tel que la fibre de verre) ou naturelle (Jute) intégré dans une matrice polymère thermoplastique ou thermodurcissable, sont devenus incontournables dans de nombreux secteurs d'activité tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil ou encore le naval. Cependant, leur nature intrinsèquement hétérogène et anisotrope rend l'analyse de leurs propriétés mécaniques particulièrement complexe.

La détermination des propriétés mécaniques et élastiques de ces matériaux, notamment le module d'élasticité, le module de cisaillement, le coefficient de Poisson, la masse volumique ou encore les coefficients d'amortissement, constitue une étape essentielle dans la modélisation numérique, le dimensionnement des structures, la conception de machines et le contrôle qualité. Traditionnellement, ces propriétés sont obtenues par des essais mécaniques standards tels que la traction, la flexion ou le cisaillement. Bien que ces méthodes soient reconnues pour leur fiabilité, elles présentent plusieurs inconvénients : elles sont souvent destructives, coûteuses, longues à mettre en œuvre et peu adaptées à un contrôle en ligne ou sur des pièces finies.

Dans ce contexte, les méthodes vibratoires apparaissent comme une alternative efficace, rapide et non destructive pour la caractérisation des propriétés dynamiques des matériaux. Le principe repose sur l'analyse de la réponse vibratoire d'un échantillon soumis à une excitation mécanique. En mesurant les fréquences propres, les modes de vibration associés et les facteurs d'amortissement, il est possible, à l'aide de modèles analytiques ou inverses, de remonter aux propriétés mécaniques du matériau. En effet, les caractéristiques dynamiques d'un système dépendent directement de sa masse, de sa rigidité et de ses conditions aux limites. Ces caractéristiques sont des éléments liés aux propriétés mécaniques du matériau qui le constitue.

Contrairement aux méthodes classiques, la méthode vibratoire permet une évaluation rapide, reproductible et précise des constantes mécaniques sans endommager l'échantillon. Elle est particulièrement adaptée à l'étude des matériaux composites, dont les propriétés peuvent varier selon l'orientation des fibres, la nature du renfort et les procédés de fabrication. Plusieurs configurations expérimentales peuvent être utilisées, telles que les vibrations longitudinales, les vibrations en flexion ou l'analyse modale expérimentale, afin de mieux adapter la caractérisation au type de matériau étudié.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'application de la méthode vibratoire pour évaluer les propriétés mécaniques de composites polymères renforcés par des fibres naturelles, synthétiques et hybrides. L'objectif est de juger de la pertinence et de la précision de cette approche pour l'estimation des constantes mécaniques. Ce travail pourrait être continué, par d'autres chercheurs ou étudiants, pour comparer les résultats obtenus avec ceux issus des essais mécaniques conventionnels. Une attention particulière sera portée à l'élaboration du protocole expérimental, à l'analyse des signaux vibratoires et à la validation des modèles utilisés pour l'identification des propriétés mécaniques. Ce travail vise à démontrer que la méthode vibratoire constitue une technique fiable, rapide et non destructive, parfaitement adaptée aux besoins actuels de caractérisation avancée dans l'industrie des matériaux composites.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction

Le marché des matériaux composites connaît une croissance soutenue, portée par leurs nombreuses applications industrielles. Parmi les segments émergents, l'intégration des fibres végétales dans les matériaux composites qui se développe rapidement, avec une production mondiale atteignant plusieurs dizaines de milliers de tonnes, et une croissance annuelle estimée entre 10 et 15 %. À titre de comparaison, les composites traditionnels renforcés par des fibres, principalement de verre, représentent environ 2 millions de tonnes.

Divers types de fibres végétales, tels que le lin, le jute, le sisal, le chanvre, l'alfa, entre autres, sont déjà utilisés depuis plusieurs années comme renfort dans les composites. Ces fibres offrent une alternative prometteuse aux fibres synthétiques, en particulier les fibres de verre, grâce à des avantages notables : biodégradabilité, faible coût, faible densité, et origine renouvelable. Ces caractéristiques séduisent un nombre croissant d'industries de transformation, soutenant une croissance régulière du secteur, notamment dans des domaines variés tels que l'automobile, les infrastructures, le sport, etc.

Ce chapitre est structuré en deux parties : la première présente une revue bibliographique portant sur les aspects fondamentaux du comportement structural des composites. Elle vise à explorer les différents types de composites à fibres naturelles, leurs domaines d'application, ainsi que les composites renforcés par des fibres de jute, en détaillant leurs constituants principaux (matrices et renfort). Une attention particulière est accordée aux propriétés des composites et à l'influence des fibres sur leur comportement, notamment pour les composites à base de polyester et de jute. La deuxième partie expose les recherches effectuées sur les composites à fibres végétales. Elle inclut également les études portant sur les composites hybrides, l'accent est mis sur l'analyse de leurs propriétés mécaniques. De plus, deux articles scientifiques ainsi que la norme **ASTM E1876-01**, traitant de la détermination des propriétés mécaniques élastiques par une technique vibratoire sont également présentés.

I.2 Généralités sur les matériaux composites

I.2.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un assemblage de plusieurs matériaux non miscibles dont la combinaison confère des propriétés globales supérieures à celles des composants pris isolément (voir figure I.1). Par exemple, l'incorporation d'une faible quantité de fibres dans une résine polymère permet d'obtenir un matériau composite aux performances améliorées. Les fibres contribuent à renforcer les propriétés mécaniques, thermiques ainsi que la stabilité dimensionnelle du polymère seul [1]. Un matériau composite comprend généralement deux éléments principaux :

- **Le renfort**, qui assure la résistance mécanique de l'ensemble ;
- **La matrice**, qui assure la cohésion du matériau et la transmission des efforts entre les fibres.

Les performances mécaniques et physiques d'un composite dépendent fortement de plusieurs facteurs, notamment :

- la nature et les propriétés des constituants (renfort et matrice) ;
- la géométrie, l'orientation et la répartition du renfort ;
- le procédé de fabrication, qui influence en particulier la qualité de l'interface entre le renfort et la matrice.

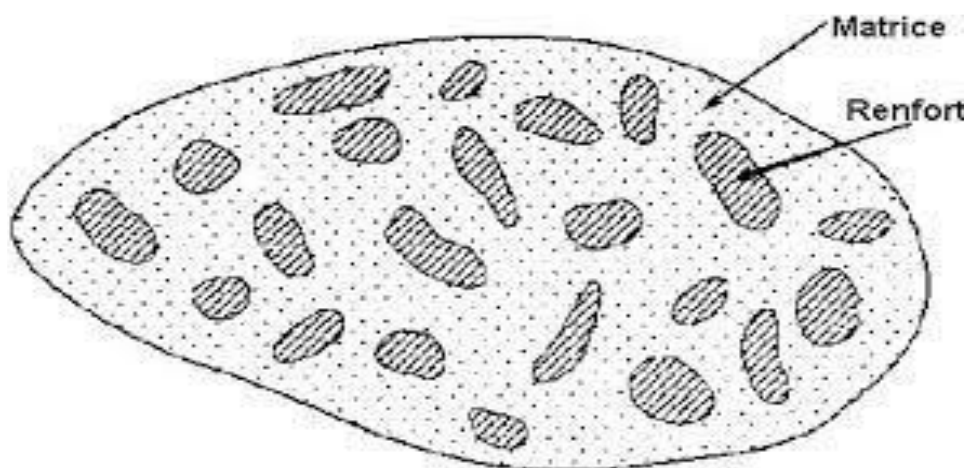


Figure I.1 : Matériau composite [1].

1.2.2 Les constituants des matériaux composites

1.2.2.1 Les renforts

Les renforts constituent les éléments porteurs essentiels des matériaux composites, leur conférant des performances élevées en termes de rigidité, de résistance à la rupture, et d'autres propriétés mécaniques. Pour être efficaces, les renforts doivent répondre à plusieurs critères : haute performance mécanique, faible densité, bonne compatibilité avec la matrice, facilitée de mise en œuvre, et coût réduit. La concentration du renfort est un paramètre clé qui influe directement sur les propriétés finales du composite. Elle est généralement exprimée en fraction volumique ou fraction massique, avec des valeurs typiquement comprises entre 0,3 et 0,7 [1].

Une caractéristique fondamentale des composites renforcés par fibres est leur anisotropie, c'est-à-dire la dépendance des propriétés aux directions, directement liée à l'orientation des fibres. Toutefois, au-delà de l'orientation et de la concentration des fibres, leur distribution dans la matrice joue également un rôle déterminant.

En effet, une répartition homogène du renfort permet d'obtenir un matériau uniforme et performant. À l'inverse, une distribution non uniforme peut engendrer des zones appauvries en fibres, où les ruptures sont susceptibles de s'amorcer, entraînant ainsi une diminution globale de la résistance du composite.

1.2.2.2 La matrice

La matrice d'un matériau composite est généralement composée d'une résine, à laquelle on peut ajouter des charges afin d'améliorer certaines propriétés, de faciliter la mise en œuvre et de réduire les coûts de production. Ce mélange est considéré, sur le plan mécanique, comme une phase homogène. Ainsi, le matériau composite obtenu résulte de l'association d'un renfort et d'une matrice [1].

La matrice joue un rôle essentiel : elle assure la cohésion entre les fibres et permet la transmission des efforts mécaniques au sein du composite. Elle contribue également à la résistance dans le sens transverse aux fibres et assure une protection physico-chimique contre les agressions extérieures. Par ailleurs, elle détermine en grande partie la résistance thermique, la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire du composite.

Les résines employées doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres, être suffisamment déformables, et avoir une faible densité, afin de garantir au matériau final des propriétés mécaniques spécifiques élevées. On distingue principalement deux grandes familles de résines polymériques utilisées dans les composites : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

1.2.3 Types de matériaux composites

La classification des matériaux composites peut s'effectuer selon plusieurs critères tels que la nature des constituants, le domaine d'application ou encore les propriétés mécaniques [2]. Si l'on se concentre sur les composites à matrice polymérique renforcés par des fibres, on peut distinguer trois grandes catégories :

- Les composites à fibres longues : ils sont constitués de fibres continues immergées dans une matrice qui en assure la cohésion. Ce type de renfort permet d'obtenir des propriétés mécaniques élevées dans la direction des fibres.
- Les composites à fibres courtes : dans ce cas, les fibres sont discontinues et réparties de manière aléatoire, sans orientation particulière. Ces composites présentent généralement des propriétés plus isotropes mais inférieures à celles des composites à fibres longues.
- Les composites à renfort tissé : ils utilisent des tissus constitués de fils entrecroisés selon deux directions perpendiculaires : la chaîne, correspondant à la direction longitudinale du tissu, et la trame, correspondant à la direction transversale. Les performances mécaniques dépendent du type de fils utilisés et du mode de tissage (croisement des fils de chaîne et de trame), qui influencent la structure et le comportement du composite.

1.2.4 Matériaux composites à fibres naturelles

Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine : végétale, animale, minérale et synthétiques (voir figure I.2). Les fibres végétales sont composées essentiellement de cellulose, tandis que les fibres animales sont constituées de protéines comme les cheveux, plumes, soie, laine, etc. [3].

Les fibres végétales regroupent plusieurs sous-types, selon la partie de la plante dont elles sont issues, telles que les filasses (ou fibres dures), les fibres de graines, de fruits, de bois, de pailles ou encore celles provenant de certaines herbes.

On distingue principalement les catégories suivantes de fibres végétales [3]. :

- Fibres libériennes : extraites de l'écorce ou de la partie extérieure de la tige, comme le lin, le chanvre, le jute, le kénaf ou la ramie ;
- Fibres issues des feuilles : telles que le sisal, le bananier ou le palmier ;
- Fibres provenant des poils séminaux des graines : comme le coton ou le kapok ;
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : notamment la fibre de coco ;
- Fibres issues des tiges ou des troncs : comme les pailles de blé, de riz, d'orge, ou encore le bambou.

Plusieurs types de fibres naturelles d'origine végétale sont utilisés dans le monde des matériaux composites. Les fibres les plus usuelles sont : jute, chanvre, lin, coton, kénaf, sisal, ramie et palmier (Figure I.2), [4].

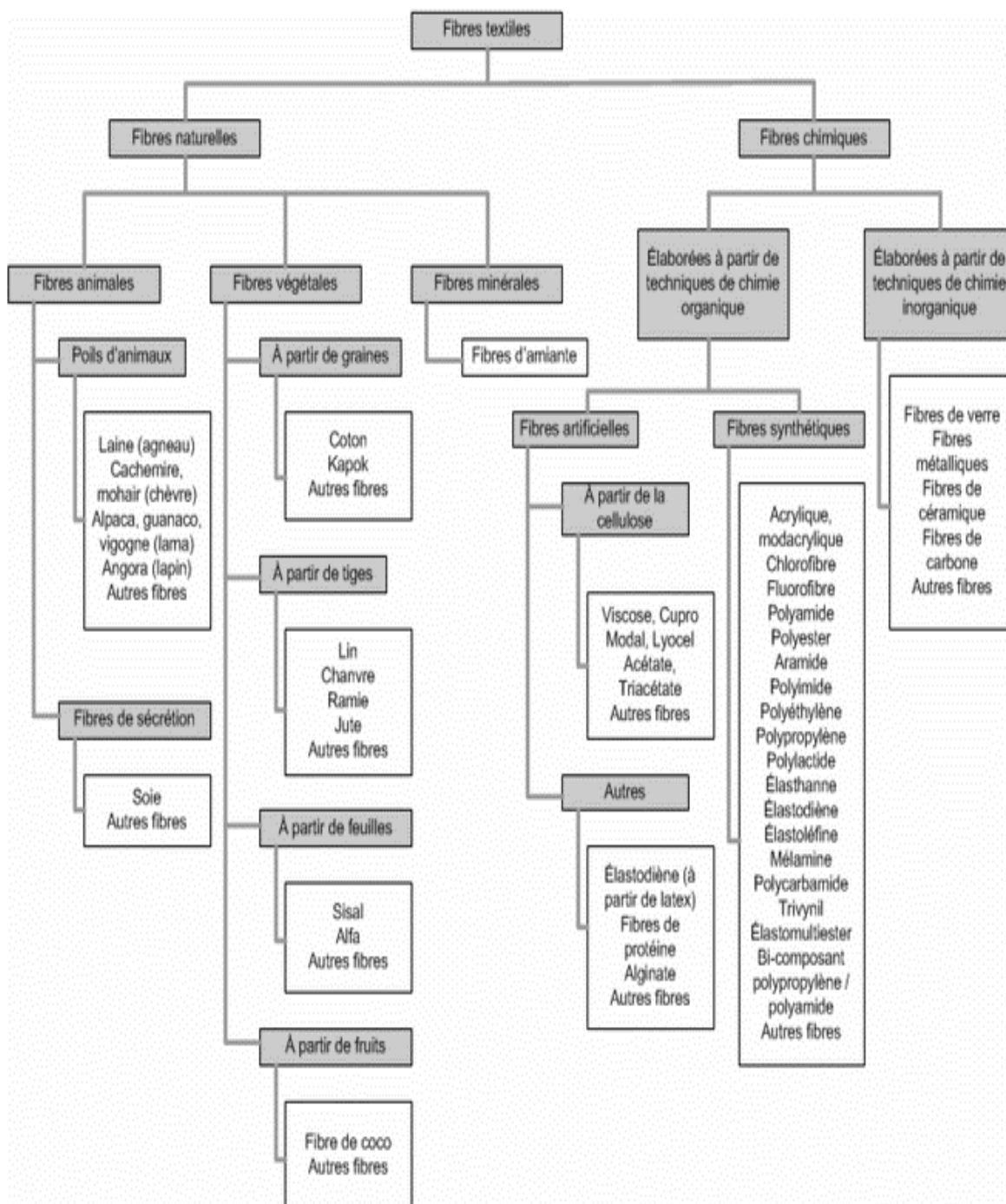


Figure I.2 Différentes fibres naturelles et synthétiques [3].



Figure I.3 : Quelques plantes, origine des fibres utilisées comme renfort dans les matériaux composites [4].

1.2.5 Présentations de quelques fibres végétales

Les matériaux composites d'origine naturelle tirent parti d'une grande diversité de fibres végétales, extraites de différentes plantes, et utilisées comme éléments de renforcement. Parmi les plus couramment employées, on retrouve les fibres de chanvre, réputées pour leur robustesse ; les fibres de lin, connues pour leur bonne élasticité et leur résistance mécanique ; les fibres de kénaf, appréciées pour leur grande longueur et leur rendement élevé ; ainsi que les fibres de sisal, reconnues pour leur durabilité en milieux contraignants. D'autres fibres telles que la ramie, valorisée pour ses propriétés mécaniques renforcées par traitements, ou encore l'abaca, notable pour sa résistance exceptionnelle à la rupture, complètent cette palette. Les fibres de coco, de raphia et de doum trouvent également leur place dans de nombreuses applications, allant des textiles traditionnels aux matériaux composites techniques. L'intérêt croissant pour ces fibres naturelles s'explique par leur caractère renouvelable, leur faible densité, leur biodégradabilité, ainsi que leur impact environnemental réduit.

Dans le cadre de ce travail de Master, l'attention sera portée spécifiquement sur la fibre naturelle de jute et la fibre synthétique de verre, dans une approche comparative visant à évaluer leurs performances au sein de matériaux composites.

Fibres de jute : Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvacées, qui peut atteindre 6 mètres de hauteur. Également appelée chanvre de Calcutta, elle est principalement utilisée pour extraire des fibres naturelles. Bien que traditionnellement utilisée pour fabriquer des sacs, la fibre de jute a également trouvé de nouvelles applications dans les composites techniques. En raison de sa forte teneur en lignine, qui lui confère une grande raideur, la fibre de jute n'est pas adaptée à l'industrie de l'habillement.

Pour être utilisée comme renfort dans un composite, la fibre de jute nécessite des modifications chimiques, comme l'utilisation d'un dérivé d'acides gras, afin de lui conférer un caractère hydrophobe. En effet, l'interface entre la fibre et la matrice est moins performante à cause du caractère hydrophile de la fibre [5]. Une autre solution consiste à modifier la matrice en ajoutant un agent couplant, ce qui améliore l'adhésion entre la fibre et la matrice. Ce type de composite modifié présente un meilleur module d'élasticité que celui qui n'a pas été modifié.

En raison de l'interface parfois peu optimale entre la fibre et la matrice, et/ou du caractère hydrophile des fibres végétales, peu de fibres peuvent être utilisées sans traitement chimique ou sans l'ajout d'un agent couplant. Cependant, leur utilisation dans divers domaines industriels se développe progressivement. La liste des fibres naturelles précédemment mentionnée est non exhaustive, mais parmi celles-ci, en Algérie, un intérêt particulier a été porté sur l'utilisation de la fibre de jute pour la confection de plaques stratifiées qui peuvent être utilisées dans de nombreux secteurs.

1.2.6 Morphologie de la plante de jute

Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée «fibre d'or» en raison de ses reflets (Figure I.4). Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à la maturité : avril/ juillet et août.



Figure I.4 : La plante de Jute [6].

Le jute se développe principalement dans les régions tropicales situées à faible altitude, où le taux d'humidité varie entre 60 et 90 %. C'est une culture qui nécessite peu d'engrais et de pesticides, et qui dépend principalement des pluies. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibres sèches par hectare. Parmi les fibres naturelles, le jute est l'une des moins chères. Il se classe en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et de diversité des usages.

1.2.6.1 Fibre de jute

La fibre de jute est longue, douce et brillante, mesurant entre 1 et 4 mètres de long avec un diamètre de 17 à 20 microns. Constituée principalement de cellulose et de lignine, elle est biodégradable et recyclable, ce qui en fait un matériau respectueux de l'environnement. Un hectare de jute absorbe environ 15 tonnes de dioxyde de carbone et libère 11 tonnes d'oxygène. En outre, la rotation des cultures de jute améliore la fertilité des sols. La fibre ne génère pas de gaz toxiques lorsqu'elle est brûlée. Bien que le jute soit de plus en plus remplacé par des fibres synthétiques, il reste utilisé dans des applications écologiques comme les géotextiles pour lutter contre l'érosion, ou encore pour les toiles de

plantation qui se dégradent naturellement. Autrefois prédominant dans la fabrication de sacs, le jute reste une fibre polyvalente et durable.

I.2.6.2 Extraction de la fibre de jute

Les fibres végétales sont extraites à partir des plantes par différentes techniques telles que : mécaniques, chimiques et biologiques (utilisation des bactéries) en fonction du type de plante à étudier. Ces méthodes d'extraction des fibres végétales généralement utilisées de nos jours sont regroupées dans le diagramme de la figure I.5.

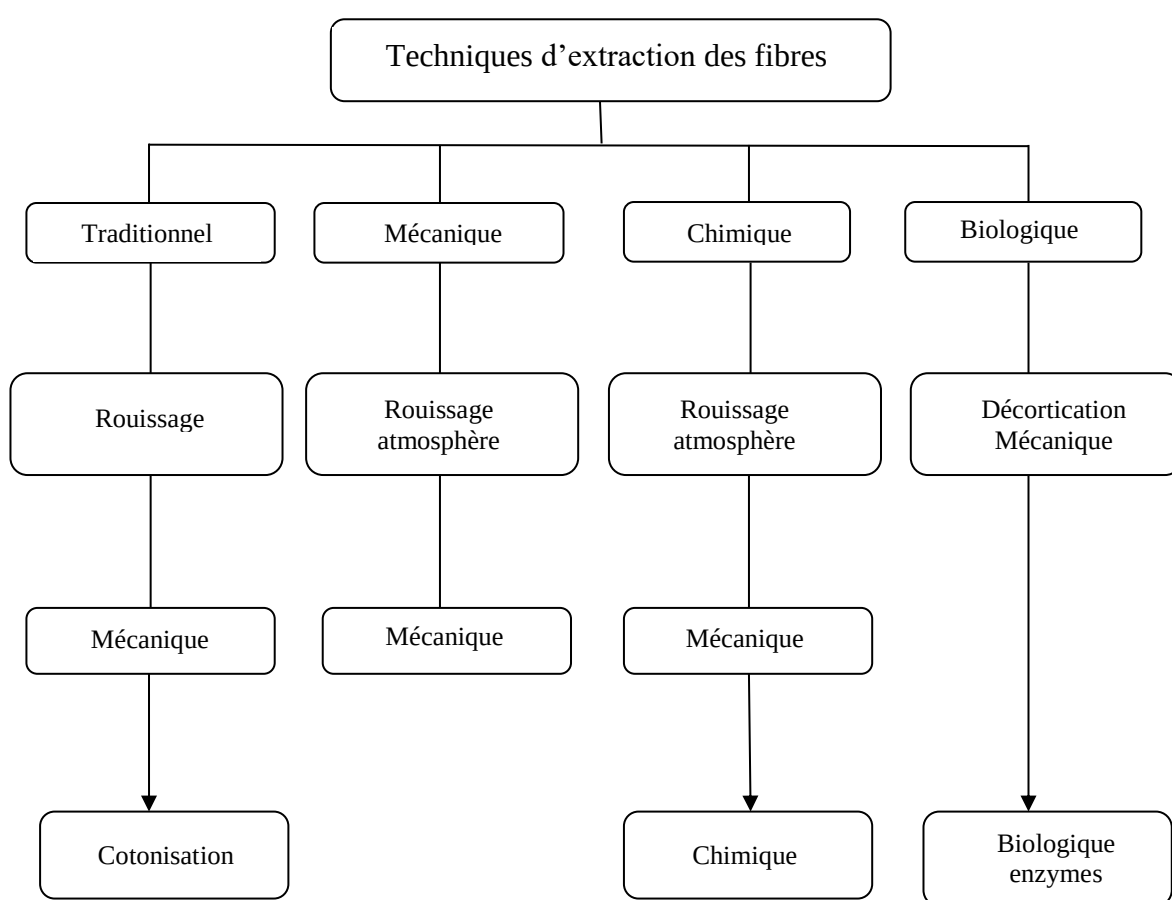


Figure I.5 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales. [7]

La culture du jute nécessite une main-d'œuvre importante mais demande peu d'engrais et de pesticides. La récolte des fibres se fait généralement manuellement, car la mécanisation n'est pas adaptée à la culture à petite échelle des pays en développement. Les fibres sont extraites des tiges par un processus de rouissage. Les tiges sont d'abord coupées

et laissées à reposer sur le champ pour se débarrasser des feuilles. Après quelques jours, elles sont regroupées en faisceaux. Le rouissage, qui dure de une à trois semaines, consiste à immerger les tiges dans l'eau pour séparer la pectine et autres substances qui les lient. Une fois ce processus terminé, l'enveloppe de la tige se détache facilement du cœur ligneux. Après l'extraction des fibres, un lavage et un séchage sont effectués pour finaliser le processus.



Figure I.6 : Extraction des fibres de jute : A) rouissage, B) lavage [7]

1.2.7 Propriétés usuelles des fibres végétales et fibres de verre

1.2.7.1 Propriétés physiques

En général les fibres végétales et de verre sont caractérisés physiquement par leur longueur, leur diamètre, et leur densité. D'après une recherche bibliographique sur les caractéristiques physiques de quelques fibres végétales qui ont été étudiées par plusieurs auteurs, sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales et des fibres synthétiques (Verres, Kevlar et carbone)

Fibres	Longueur (mm)	Diamètre (μm)	Densité (g/cm ³)	Référence
Coton	35	19	1,5-1,6	[7]
Lin	4-77	5-76	1,54	[8]
Sisal	200	0,08-0,30	0,75-1,07	[9]
Coco	-	0,11-0,53	0,67-1	[9]
Alfa	5-50	5-95	1,51	[7]
Jute	9-70	25-200	1,44	[7]
Chanvre	5-55	10-51	-	[8]
Ramie	40-250	16-126	-	[9]
Sisal	0,8-8	7-47	-	[10]
Carbone	5-50	5-10	1,75-1,95	[11]
Kevlar	6 -25	10 -15	1,44	[11]
Verre	3 -50	10-20	2,5	[11]

La variabilité des paramètres géométriques, tels que la longueur et le diamètre des fibres végétales des fibres synthétiques (Verres, Kevlar et carbone), peut être attribuée à une série de facteurs influençant à la fois leur développement agricole et leur transformation industrielle. En outre, les dimensions transversales des fibres varient en fonction de leur emplacement dans la tige.

Une autre caractéristique importante des fibres végétales des fibres synthétiques (Verres, Kevlar et carbone) est leur capacité d'absorption d'eau. En effet, le comportement des fibres sur le long terme peut entraîner des variations volumétriques, ce qui peut provoquer des modifications de l'interface fibre/matrice en raison de cette absorption d'eau.

Tableau I.2 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales [12] et des fibres synthétiques (Verres, Kevlar et carbone)

Fibres	Absorption d'eau (%)
Bagasse	8–12
Coco	8–12

Jute	13
Palmier	10–15
Bambou	10–12
kevlar	7
Carbone	0
Verre	0,2–0,5

I.2.7.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres végétales dépendent de plusieurs facteurs intrinsèques, tels que leur composition chimique (cellulose, hémicellulose, lignine, pectines), la structure de la fibre (section, porosité, angle micro-fibrillaire, facteur de forme, rapport longueur/diamètre, etc.), ainsi que des caractéristiques anthropiques (type de défibrage, itinéraire technique, etc.). De plus, des éléments externes et variables comme le taux d'humidité, la localisation des fibres dans la tige, les défauts naturels et les conditions de croissance influencent également ces propriétés.

Globalement, malgré les variations entre les espèces, le module d'Young des fibres végétales est comparable à celui de la fibre de verre, et leurs propriétés spécifiques par rapport à la densité sont généralement supérieures à celles de la fibre de verre [13] [9]. Le comportement mécanique en traction des fibres végétales est un facteur clé qui détermine l'effet de ces fibres en tant que renfort dans le composite, influençant ainsi les performances globales du matériau final.

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales et des fibres synthétiques (Verres, Kevlar et carbone) [7].

Fibres	Résistance à la traction (MPa)	Déformation à la rupture (%)	Module d'Young (GPa)
Coton	287-597	7-8	5,5-12,6
Lin	1339	3,27	58
Chanvre	389	1,6	35

Jute	393-773	1,5-1,8	26,5
Sisal	350-700	3-7	9-21
Alfa	75-154	1,6	12,7
Carbone	3000 – 5000	1,5 – 2,5	200 – 400
Verre	40 –80	1 – 2,5	5 – 10
Kevlar	3000	2,5-4 %	70– 130

1.2.8 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales et matériaux composites.

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur biodégradabilité ou recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort pour les matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un obstacle au niveau du développement industriel.

Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau I.5 :

Tableau I.4 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [14]

Avantages	Inconvénients
Renouvelables & biodégradables : issues de ressources naturelles.	Hydrophobicité élevée : absorption d'eau entraînant gonflement et dégradation.
Faible densité : matériaux composites plus légers.	Variabilité naturelle : propriétés non homogènes selon origine et traitement.
Coût réduit : production et transformation économiques.	Faible résistance thermique : dégradation au-delà de 200 °C.
Bonnes propriétés mécaniques spécifiques : bon rapport résistance/poids.	Adhésion fibre/matrice limitée : nécessite des traitements de surface.
Faible énergie grise : faible consommation énergétique.	Dérivabilité biologique : sensibles aux agents extérieurs (UV, bactéries...).
Bonne disponibilité : cultivables dans de nombreuses régions.	Traitements nécessaires : pour améliorer performance et durabilité.
Facilité de mise en œuvre : compatibilité avec divers procédés.	

Les matériaux composites présentent un ensemble unique de caractéristiques qui les rendent très attractifs dans de nombreuses applications industrielles. Cependant, comme tout matériau, ils possèdent à la fois des avantages et des inconvénients et qu'il est important de prendre en compte lors de leur sélection et de leur utilisation. Le tableau I.5 résume les principaux points forts et les limites des matériaux composites.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des matériaux composites

Avantages	Inconvénients
Haute résistance mécanique	Coût élevé des matériaux et fabrication
Légèreté (faible densité)	Difficile à recycler
Grande rigidité personnalisable	Sensibilité aux impacts violents
Résistance à la corrosion	Dégradation possible aux UV et à la chaleur
Possibilité d'adapter les propriétés	Contrôle qualité complexe
Bonne isolation thermique et électrique	Réparations difficiles et coûteuses
Durabilité face à la fatigue et à l'usure	
Fabrication de formes complexes	

1.2.9. Application des matériaux composites à base de fibres naturelles

Depuis plusieurs années, les ressources naturelles sont utilisées pour la production de produits de base ainsi qu'une grande quantité de produits techniques. Textiles, cordes, toiles et papiers ont été également faits de fibres naturelles, telles que le jute, le chanvre, le lin, l'alfa, la fibre de coco, et la bagasse de canne à sucre. Dès 1908, les premiers matériaux composites ont été fabriqués pour être utilisés dans des tubes et des tuyaux pour l'électronique [14].

Actuellement dans les pays de l'UE, environ 75% du poids total des véhicules hors d'usage est recyclé, dont 25%, appelés broyage des résidus de l'automobile, sont éliminés comme le remblai en raison de leurs complexité. La réduction de ce pourcentage reste un défi majeur, l'End-of-Life Véhicule (ELV) Directive Européenne stipule qu'à partir 2015, seulement 5% du poids du véhicule peut être éliminé dans des sites de décharge.

L'utilisation des matériaux qui se dégradent naturellement après leur utilisation est une manière d'éviter la complexité du recyclage. C'est dans ce sens que les chercheurs ont, depuis quelque temps développé l'utilisation des dérivés de fibres de jute, de chanvre, de lin, de sisal, et de noix de coco, à partir des matières végétales telles que BAST (l'extérieur de la tige), afin de renforcer le polymère. Ces fibres cellulosiques offrent une haute rigidité spécifique (par rapport aux poids) et ont peu d'impacts environnementaux par rapport aux produits issus de fibres synthétiques. Elles ont fait leurs preuves parmi les matériaux d'intérieur des véhicules.

Aujourd'hui, la solution aux problèmes écologiques est offerte par les matériaux verts [15]. En Europe, les constructeurs automobiles utilisent des tapis fabriqués à base d'abaca. Le lin et le chanvre sont utilisés notamment dans la fabrication des portes à panneaux pressés, tablettes arrière, dossiers de siège, boucliers moteur et appui-tête [16].

Les composites à fibres naturelles offrent également de vastes possibilités d'exploitation en tant que matériaux de remplacement, en particulier les substituts du bois sur le marché de la construction [17]. Divers produits composites basés sur la fibre naturelle, tels que les stratifiés, les panneaux, les cloisons, les cadres de portes, les volets, et toiture constituent une alternative aux matériaux existants.

D'autres applications de l'utilisation des fibres dans la matrice polymère sont présentes, comme la conservation des sols, la fabrication du matériel de sport et de plus en plus dans le secteur du sport automobile, en raison de leur potentiel de réduction de masse. Les structures d'impact dans le sport automobile sont tenues d'agir à la fois comme éléments porteurs et des dispositifs pour l'absorption d'énergie [18]

Dans le domaine de construction les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et des dallages de parking ainsi que le renforcement du plâtre [19].



Figure I.7 : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le domaine d'automobile [20].



Figure I.8 : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le secteur de construction [21].



Figure I.9 : Autres applications des matériaux composites à base de fibres naturelles :
planches de surf [22].

I.3 Etat de l'art sur quelques travaux réalisés sur les composites en fibres végétales, et hybrid

Au cours des dernières décennies, les composites à base de fibres végétales ont suscité un intérêt croissant dans les domaines de la recherche et de l'industrie, en raison de leur caractère renouvelable, biodégradable, léger et économique. Ces fibres naturelles, issues de plantes telles que le lin, le chanvre, le jute, le sisal ou encore la coco, sont utilisées comme renforts dans des matrices polymériques, notamment thermoplastiques et thermodurcissables, afin de développer des matériaux aux propriétés mécaniques acceptables pour des applications variées, notamment dans l'automobile, le bâtiment ou les emballages.

Par ailleurs, afin d'améliorer les performances globales des composites, notamment en termes de rigidité, de résistance à l'humidité ou de stabilité thermique, de nombreux travaux se sont orientés vers les **composites hybrides**, combinant fibres naturelles et fibres synthétiques (comme le verre, le carbone ou le kevlar) dans une même matrice. Ces approches hybrides permettent d'exploiter les avantages complémentaires des différents types de fibres tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental. Le composite renforcé par les fibres naturelles de jute présente de bonnes caractéristiques de résistance en traction, avec des propriétés intéressantes en flexion, bien qu'il puisse présenter quelques problèmes de dureté.

Cette section présente un aperçu des recherches récentes portant sur les composites renforcés par des fibres végétales, ainsi que sur les matériaux hybrides, en mettant en évidence les tendances actuelles, les avantages obtenus, les limites rencontrées et les solutions proposées par la littérature scientifique.

Merzoug et al [23] ont effectués une étude expérimentale sur les propriétés thermiques et mécaniques de composites hybrides obtenus à partir de fibres de palmier dattier (PDPF) et de fibres de verre (GF) comme renforts, avec une résine vinylester (VE) comme matrice. Les résultats (Figures I.10) montrent que l'ajout de fibres de verre améliore la stabilité thermique des composites, en retardant leur dégradation et en augmentant la masse résiduelle. Ces résultats montrent que les fibres de verre renforcent la résistance thermique des matériaux hybrides.

Tableau I.6 Analyse TGA pour les composites hybrides PDPF/GF [23].

Désignation	T°_{onset} (°C)	T°_{max} (°C)	Résidu (%)
30PDPF/0GF	214,89	488,94	2,05
20PDPF/10GF	224,77	497,26	7,71
10PDPF/20GF	231,65	488,09	10,80
0PDPF/30GF	287,48	505,23	59,12

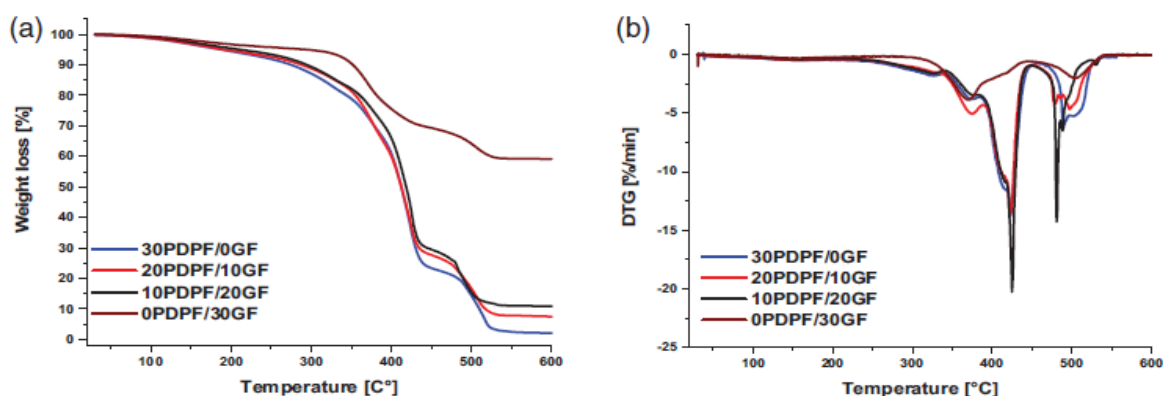


Figure I.10 Courbes TGA/DTG d'échantillons composites [23]

La spectroscopie ATR-FTIR a été utilisée pour déterminer la composition chimique du PDPF traité et non traité. L'analyse spectrale montre plusieurs pics communs aux échantillons traités.

La figure 11 présente les courbes contrainte-déformation des composites élaborés puis testés en traction. Une amélioration est observée du module de Young et de la résistance à la traction avec l'augmentation du taux de fibres de verre (Tableau 7). Les échantillons 30PDPF/0GF présentaient la résistance la plus faible en raison de la nature des composants (hydrophiles et hydrophobes) et peut-être de la répartition aléatoire des fibres de PDP. Les hybridations 20PDPF/10GF et 10PDPF/20GF ont significativement amélioré la résistance à la traction, de 52 % et 73 % respectivement comparés à 30PDPF/0GF. Comme prévu, les échantillons renforcés uniquement de fibres de verre présentaient la résistance à la traction la plus élevée, autour de $287,02 \pm 26,81$ MPa. Ceci était dû aux propriétés mécaniques supérieures et à la répartition uniforme des fibres de verre dans le tissu de verre. L'allongement à la rupture augmentait également avec la quantité de fibres de verre.

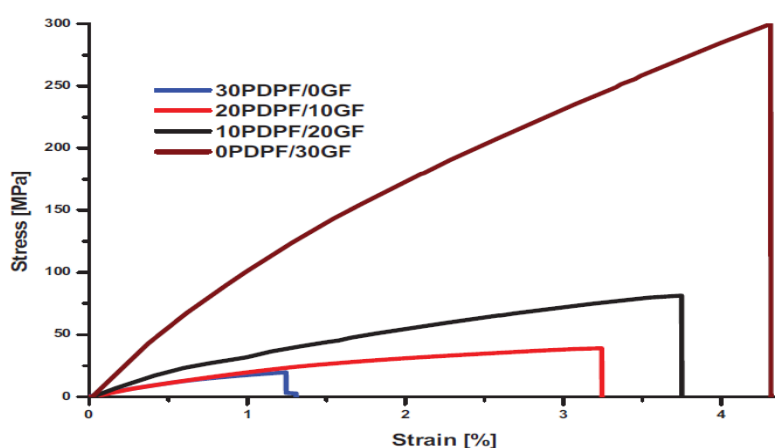


Figure I.11. Courbes typiques de contrainte-déformation en traction pour les échantillons composites hybrides [23].

Tableau I.7 Propriétés en traction des composites. [23].

Spécimens hybrides	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Pression (%)
30PDPF/0GF	$20,78 \pm 2,33$	$2,76 \pm 0,24$	$1,18 \pm 0,21$
20PDPF/10GF	$44,48 \pm 8,7$	$3,26 \pm 0,52$	$2,8 \pm 0,42$
10PDPF/20GF	$73,48 \pm 9,13$	$4,62 \pm 0,33$	$3,24 \pm 0,43$
0PDPF/30GF	$287,02 \pm 26,81$	$11,43 \pm 0,24$	$4,13 \pm 0,19$

Les propriétés de flexion des quatre composites sont présentées dans la Figure 12. Les propriétés de traction et de flexion ont montré des tendances similaires. En raison de la teneur en fibres de verre (GF) dans les composites hybrides et de sa configuration au sein de

la structure (placées dans les couches intérieures et extérieures), une différence considérable dans le comportement en flexion a été observée, comme indiqué dans le Tableau 8. Pendant les essais de flexion, trois mécanismes se produisent simultanément : la tension, la compression et le cisaillement. En raison de l'absence de couches de GF tissées, le composite PDPF seul (30PDPF/0GF) possède les caractéristiques mécaniques les plus faibles. Ce composite a présenté une résistance à la flexion de 60,05 MPa, alors que lorsque la teneur en fibres de verre était de 10 % et 20 %, les valeurs respectives enregistrées sont respectivement égale à 122,68 et 235,59 Mpa correspondant à des augmentations respectives de 104,30 % et 292,32 %. Cette amélioration peut être attribuée à la résistance élevée des fibres de verre et au transfert efficace des contraintes entre le GF et la matrice.

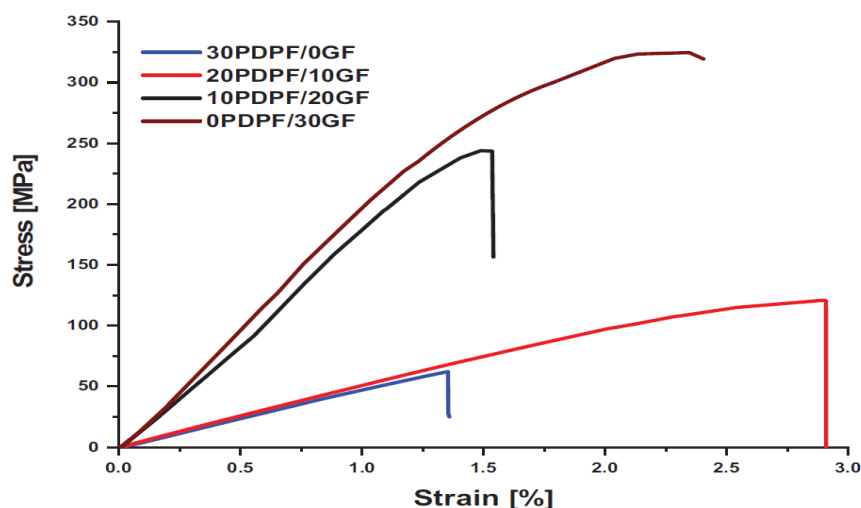


Figure I.12 Courbes contrainte-déformation en flexion pour les échantillons composite [23].

Tableau I.8 Propriétés de flexion des composites textés. [23].

Spécimens hybrides	Résistance à la flexion (MPa)	Module de flexion (GPa)	Déformation (%)
30PDPF/0GF	60,05 ±3,82	3,87 ±0,78	1,7 ±0,3
20PDPF/10GF	122,68 ±10,87	4,92 ±0,68	2,58 ±0,19
10PDPF/20GF	235,59 ±13,65	17,23 ±1,6	1,83 ±0,3
0PDPF/30GF	311,59 ±25,55	18 ±1,53	2,15 ±0,05

Rizal *et al* [24] présentent une étude combinée, numérique et expérimentale, des caractéristiques dynamiques de composites polymères renforcés de fibres de jute, visant à estimer les propriétés mécaniques de ces matériaux. Pour l'étude numérique, le logiciel ANSYS a été utilisé pour réaliser l'analyse modale afin d'obtenir deux modes de fréquences

propres, en flexion et en torsion Les réponses vibratoires du composite JFRPC La figure I.13 ont été obtenues numériquement. La fréquence propre en flexion est d'environ **297,77 Hz**, tandis que celle en torsion est de **222,25 Hz**, avec un déplacement maximal aux extrémités.

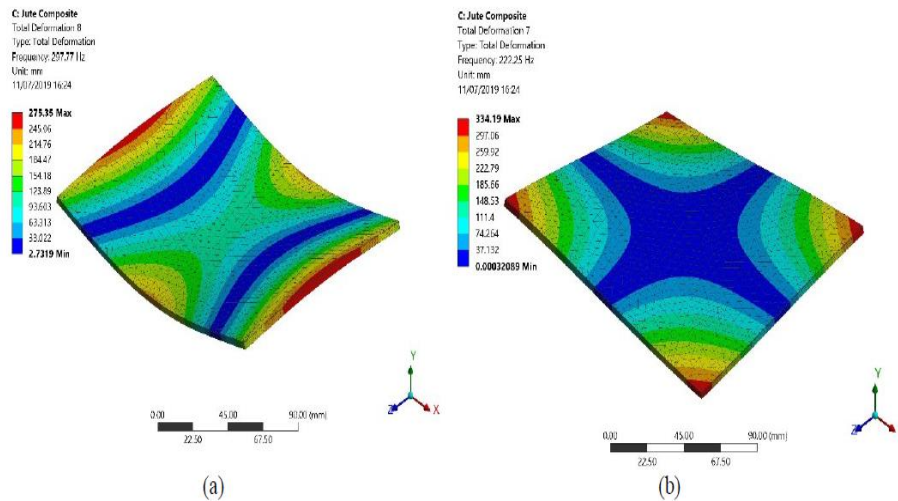


Figure I.13. Caractéristiques de vibration utilisant la simulation FEM :
(a) mode de flexion, (b) mode de torsion. [24].

L'essai a été réalisé en trois étapes pour garantir la cohérence des mesures de fréquence. Les résultats de l'essai d'impulsion ont été enregistrés et analysés à l'aide d'une transformée de Fourier rapide. Les figures 14 et 15 présentent le signal de réponse impulsionnelle mesuré en accélération ainsi que le spectre de fréquences correspondant pour une plaque composite laminée, en modes de flexion et de torsion. Il a été clairement observé que les fréquences propres en mode de flexion (f_f) et en mode de torsion (f_t) étaient respectivement d'environ 297 Hz et 212,5 Hz.

La technique d'excitation impulsionnelle s'est révélée efficace, rapide et non destructive pour déterminer les propriétés mécaniques des plaques composites en fibres de jute. Les valeurs obtenues ($E = 6,8$ GPa, $G = 2,5$ GPa, $\mu = 0,36$) présentent de faibles écarts par rapport aux données de la littérature, confirmant la fiabilité de cette méthode pour la caractérisation des matériaux composites.

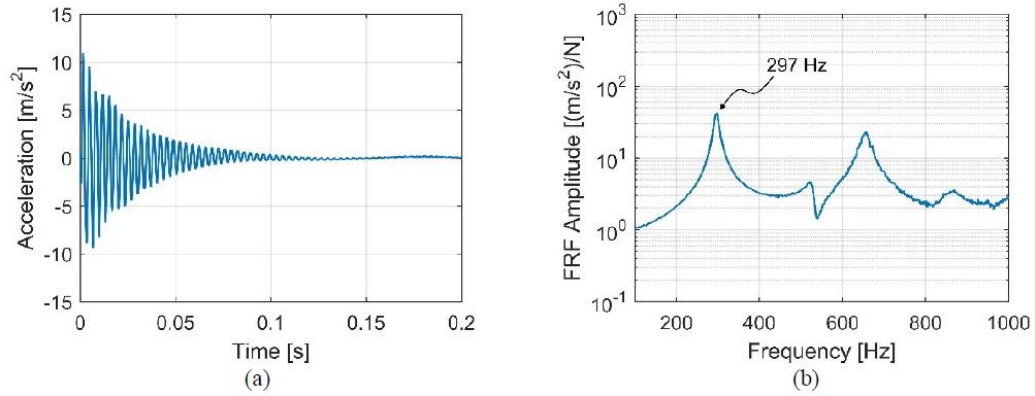


Figure I.14. Signal de réponse vibratoire mesurée et son spectre de fréquence en mode flexion.-[24]

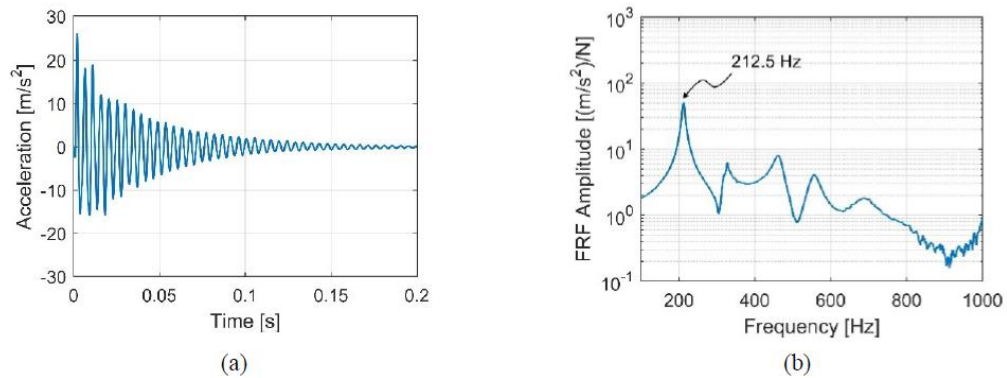


Figure I.15. Signal de réponse vibratoire mesurée et son spectre de fréquence en mode torsion. [24]

Tableau I.9 Caractéristiques des matériaux issus des études numériques et expérimentales. [24]

Caractéristiques des matériaux	Résultats numériques	Résultats expérimentaux	Erreur (%)
Fréquence de flexion, f_f (Hz)	294,8	297	0,27
Fréquence de torsion, f_t (Hz)	222,3	212,5	4,41
Module d'élasticité, E (GPa)	6,788	6,811	0,34
Module de rigidité, G (GPa)	2,744	2,502	8,82
Coefficient de Poisson, μ	0,24	0,36	31,4

Le travail de recherche de *Botelho et al* [25] les propriétés viscoélastiques, telles que la réponse élastique et la réponse visqueuse, ont été obtenues pour l'alliage d'aluminium

2024, les composites à base de fibre de carbone/époxy, de fibre de verre/époxy, ainsi que leurs hybrides (alliage d'aluminium 2024/fibre de carbone/époxy et alliage d'aluminium 2024/fibre de verre/époxy). Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par des mesures d'amortissement des vibrations. Le principe de mesure consiste à enregistrer les vibrations libres d'une poutre en porte-à-faux prismatique excitée en la frappant avec un marteau approprié, comme illustré à la figure I.16. L'amortissement et les modes de vibration des poutres composites ont été étudiés à l'aide d'un système d'acquisition Spectral Dynamics et du logiciel LMS CADA-PC. Les essais ont permis d'enregistrer la décroissance d'amplitude et la réponse en fréquence, avec une résolution de 5 Hz et une plage d'analyse de 1000 Hz. Les dimensions des échantillons ont été mesurées avec précision, et les valeurs moyennes ont été établies à partir de 10 relevés.

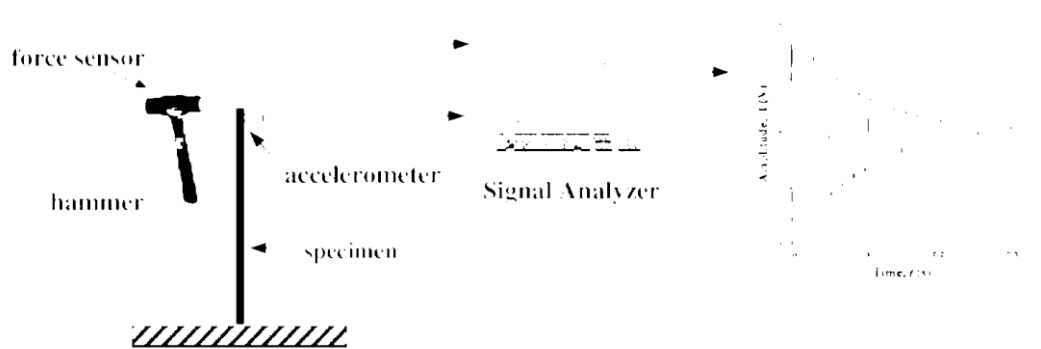


Figure I.16. Dispositif expérimental. [25]

Les Figures 17a à 17e ainsi que le Tableau 11 présentent les résultats des fréquences de résonance pour l'ensemble des échantillons étudiés. Le premier mode de vibration a été utilisé pour calculer les valeurs du module d'élasticité (E_0) et du module de viscosité (E_{00}). Les échantillons en forme de poutre ont été testés en balayant leurs fréquences jusqu'à 500 Hz.

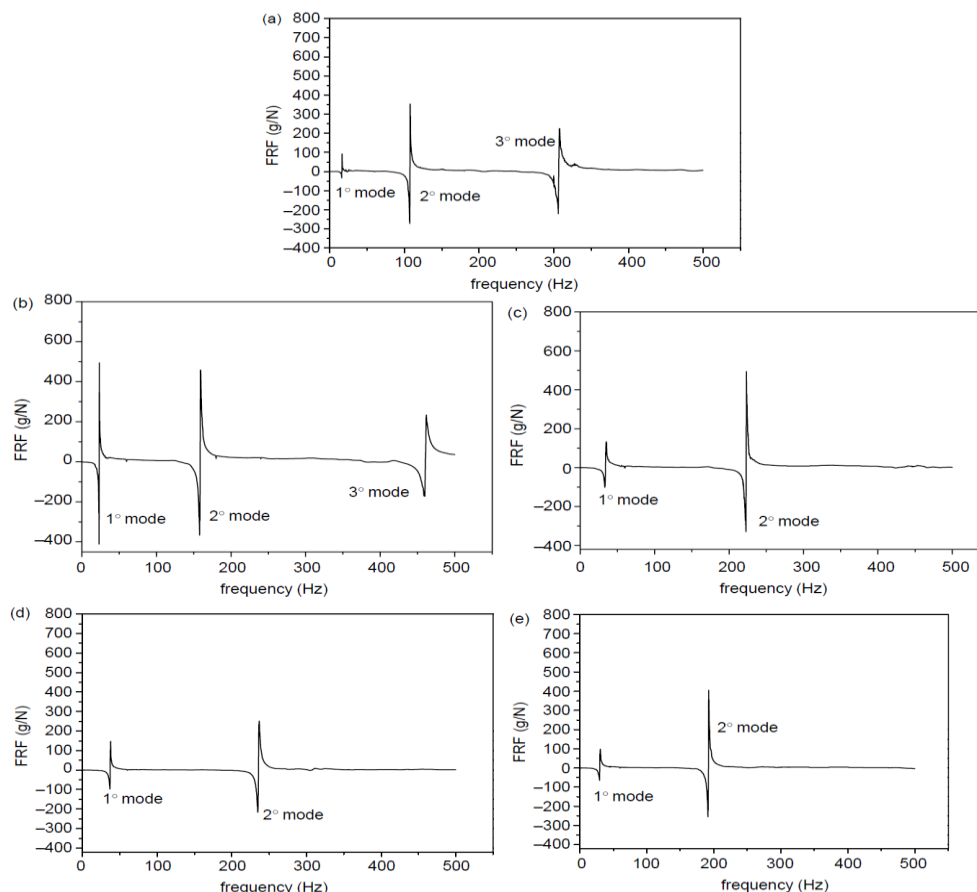


Figure I.17 Résultats des fréquences de résonance des échantillons de stratifiés composites étudiés : (a) Alliage d'aluminium 2024-T3 et Composites, (b) C GF-E ; (c) CF-E ; (d) hybride 1 ; (e) hybride 2. [25]

Tableau I.10 Valeurs des fréquences des matériaux analysés jusqu'à 500 Hz. [25]

Spécimen	Première fréquence (Hz)	Deuxième fréquence (Hz)	Troisième fréquence (Hz)
GF-E	24	158	462
CF-E	35	223	—
Aluminium 2024-T3	17	108	306
Hybride 1	38	237	—
Hybride 2	30	191	—

Les constantes élastiques théoriques, obtenues par l'approche micromécanique, sont présentées dans le tableau 12. L'amortissement dans les composites résulte principalement de quatre mécanismes : la viscoélasticité des constituants, le frottement à l'interface fibre-matrice, l'amortissement thermoélastique et la formation de dommages. En l'absence de fissures, l'amortissement est influencé par les propriétés et proportions des composants, la taille et l'orientation des renforts, les traitements de surface et la teneur en vides.

Tableau I.11 : Constantes d'ingénieries théoriques calculées par l'approche micromécanique [25].

Spécimen	Teneur en fibres (%)	Teneur en Al (%)	E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	ν_{12}
GF-E	60,0	0,00	30,6	30,6	6,03	5,72	0,15
CF-E	60,0	0,00	71,3	71,3	3,86	3,39	0,03
Aluminium 2024-T3	0,00	100	72,4	72,4	28,0	28,0	0,33
Hybride 1	25,3	57,9	71,9	71,9	17,8	17,6	0,20
Hybride 2	25,3	57,9	54,8	54,8	18,8	18,6	0

Les figures 18a à 18e présentent les courbes d'amortissement des vibrations représentatives des échantillons de l'aluminium 2024 et des stratifiés composites. Ces courbes montrent une décroissance exponentielle des amplitudes maximales en fonction du temps. La décroissance d'amplitude des composites CF-E, Hybride 1 et Hybride 2 est plus prononcée pour des matériaux présentant une rigidité élevée.

Il a été observé que le comportement d'amortissement des composites SFM dépend du type de fibre, de la matrice et de la teneur en aluminium. De plus, le traitement de surface de l'aluminium par CAA, effectué avant le moulage des composites hybrides, peut affecter la liaison inter-faciale entre le métal et les composites fibre/époxy, influençant ainsi le comportement d'amortissement.

Les composites GF-E et Hybride 2 se sont comportés différemment lors des essais d'amortissement. Dans ce cas, l'effet de l'interface sur l'amortissement, en particulier dans l'interface entre les lamelles CF-E et la feuille d'aluminium dans le composite Hybrid 1, est plus prononcé en raison de la valeur E_0 plus faible pour les lamelles GF-E par rapport aux lamelles CF-E.

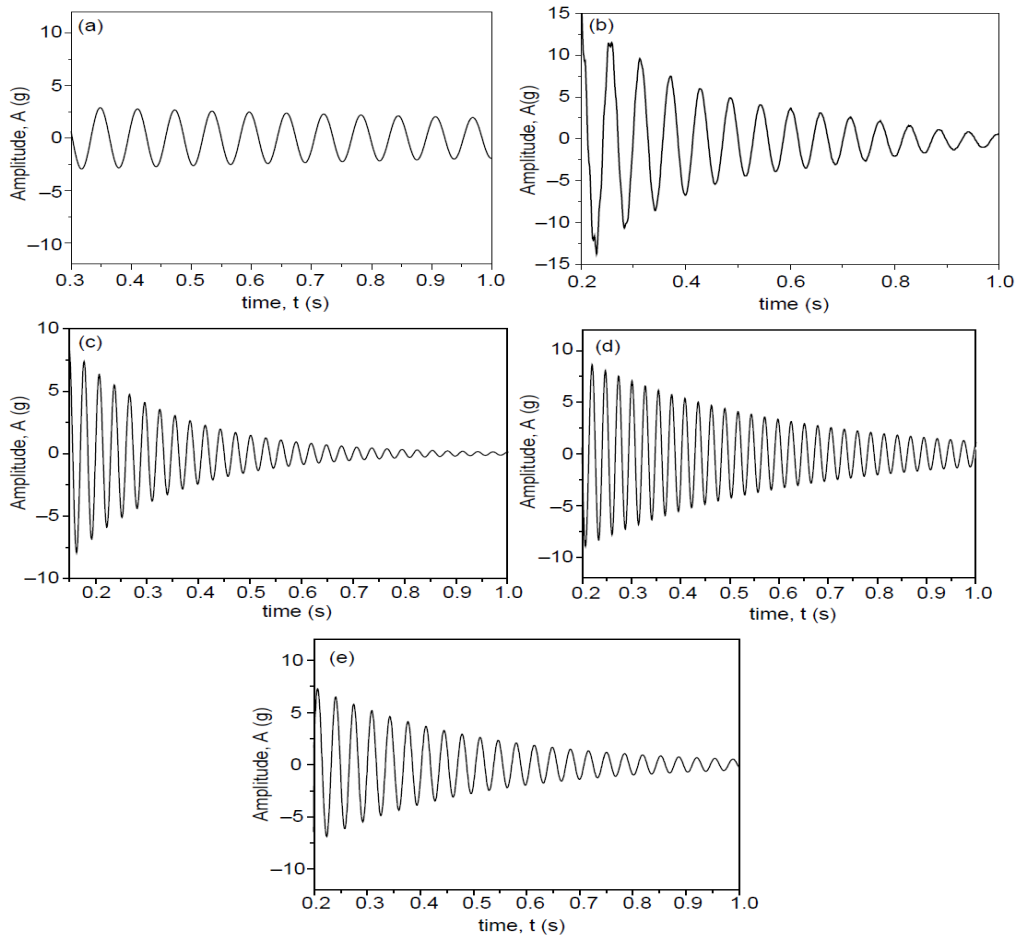


Figure I.18 Courbes de comportement d'amortissement des échantillons de stratifiés composites étudiés : a) alliage d'aluminium 2024-T3, b) GF-E, c) CF-E ; d) Hybride 1, e) Hybride 2. [25].

Botelho et al [25] ont comparé les modules d'élasticité dynamiques (E_0) mesurés expérimentalement à ceux prédits théoriquement. Le modèle micromécanique utilisé ne prend pas en compte les vides dans le composite ni l'effet d'interface métal/fibre induit par le traitement chimique du métal (CAA). Toutefois, la loi des mélanges reste applicable pour estimer le module E_0 des hybrides. Le composite Hybride 2 présente un module E'' supérieur de 44 % à celui de l'Hybride 1, en raison des meilleures propriétés des fibres de carbone et de l'effet du traitement CAA. L'amortissement est dominé par E_0 et l'interface fibre/matrice, et dans les FML, il dépend surtout des modules du métal et du renfort. Les essais vibratoires se révèlent ainsi efficaces pour évaluer l'amortissement des composites hybrides.

Senthilrajan et al [26] Dans cette étude ont étudié l'influence du vieillissement sur les caractéristiques vibratoires d'un composite jute/polyester a été analysée en faisant varier la longueur des fibres et le pourcentage en poids. Le vieillissement du composite a été réalisé

à température ambiante, dans l'eau normale et l'eau de mer. L'absorption d'humidité dans les composites polymères est principalement due à la diffusion, qui influence fortement l'adhésion fibre-matrice et donc les propriétés mécaniques du matériau. Les figures 19 et 20 montrent que l'absorption d'eau augmente rapidement au cours des premiers jours, puis se stabilise après 12 jours. Le taux maximal d'absorption est observé pour des composites à fibres longues et à faible pourcentage de renforcement, avec un maximum de 33 % dans l'eau normale et 25,33 % dans l'eau de mer. Ce phénomène s'explique par la diffusion des molécules d'eau dans les micro-espaces de la matrice et des fibres

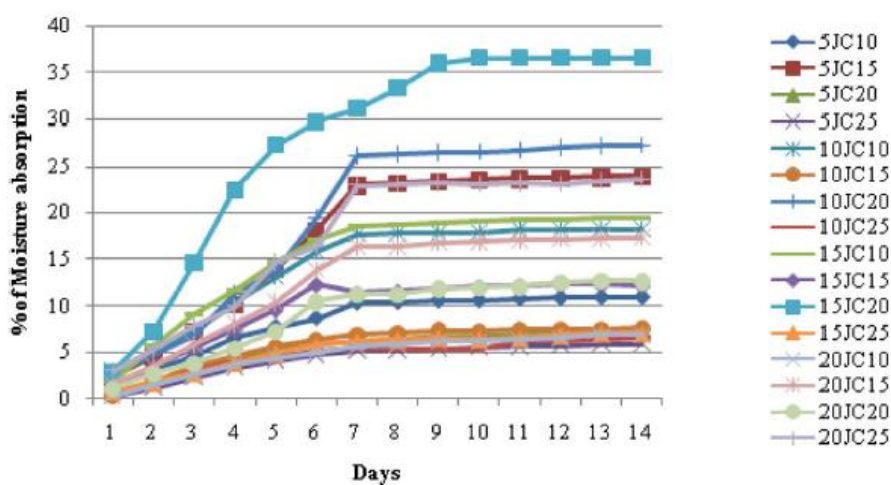


Figure I.19 Comportement d'absorption d'humidité des composés de polyester de jute pour l'eau normale [26]

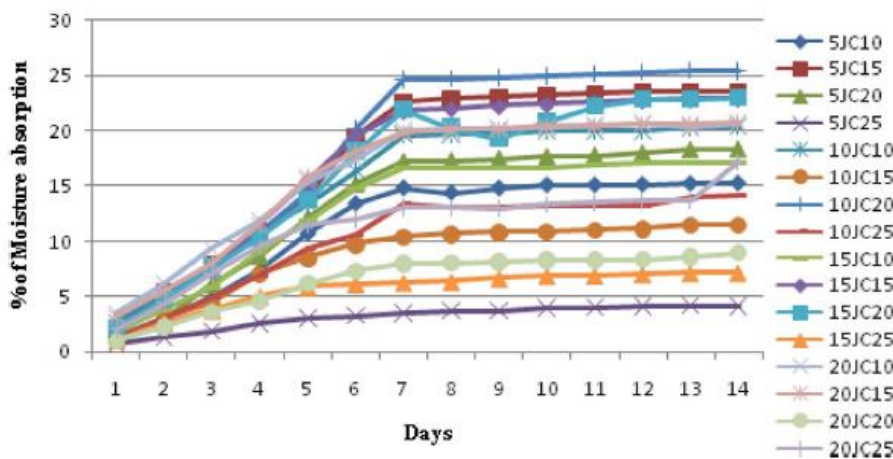


Figure I.20 Comportement d'absorption d'humidité des composés de jute et de polyester pour l'eau de mer [26]

Les propriétés de flexion du composite à longueur de fibre optimale ont été déterminées conformément à la norme **ASTM D-790**, en configuration de flexion en trois points. Selon les recherches antérieures, ce composite présente les meilleures propriétés de flexion, lesquelles sont consolidées et illustrées dans les figures 21 et 22. Les figures montrent l'effet de l'humidité sur la résistance et le module de flexion du composite contenant 5 mm de fibres et 25 % en poids, pour des échantillons secs et humides (exposés à l'eau normale et à l'eau de mer). Les propriétés de flexion de l'éprouvette composite sèche sont supérieures à celles de la résine polyester seule. Cependant, après un vieillissement en eau normale jusqu'à saturation, les propriétés de flexion du composite sont réduites de 6 % ; une réduction de 4 % est observée après vieillissement en eau de mer.

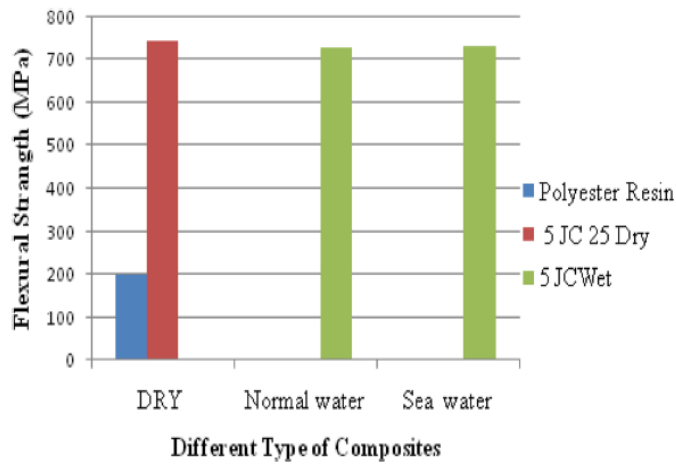


Figure I.21. Résistance à la flexion du composite [26].

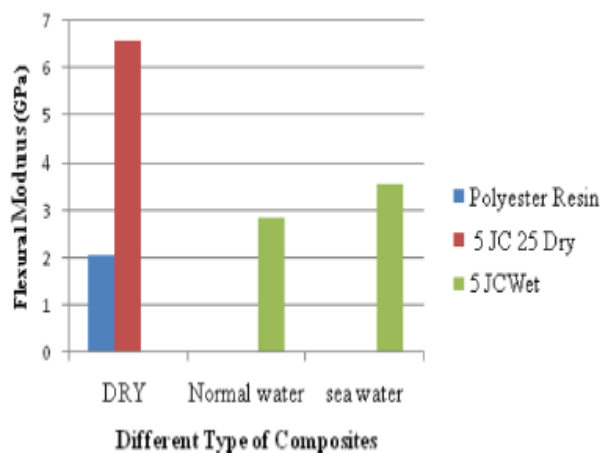


Figure I.22 Module de flexion du composite [26].

La diminution des propriétés mécaniques des composites après vieillissement est principalement attribuée à l'absorption d'eau, qui provoque le gonflement des fibres naturelles et affaiblit l'interface fibre/matrice. Ce phénomène entraîne la formation de fissures et détériore irréversiblement la structure des matériaux. Les fibres courtes (5 mm) présentent une meilleure adhérence inter-faciale en raison de leur agencement plus dense, ce qui limite l'absorption d'humidité. Ainsi, la résistance à la flexion et le module diminuent avec l'augmentation de la longueur des fibres, tant en milieu normal qu'en eau de mer.

La figure 23 montre la sortie de l'échantillon de fréquence propre en fonction du temps et de l'accélération en fonction du temps dans des conditions sèches. D'après le Tableau 14, les fréquences propres des échantillons 5JC25 à l'état sec sont respectivement de 38, 182,9 et 329,8 Hz en modes I, II et III. Les échantillons immergés dans l'eau normale et l'eau de mer ont été retirés après 4, 8 et 12 jours d'immersion pour un test de vibration libre. La fréquence des échantillons âgés (eau normale) est indiquée dans le tableau 4 et celle de l'eau de mer dans le tableau 15. Le tableau 14 montre qu'avec l'augmentation du temps d'immersion, la fréquence naturelle diminue rapidement au début, puis diminue lentement sous tous les modes de vibration. La fréquence naturelle des échantillons secs et immergés dans l'eau normale a un effet considérable, avec des différences de 7 à 9 % dans tous les modes de vibration. Les diminutions de la fréquence naturelle se sont produites en raison de la diminution des valeurs de module due au vieillissement. La perméabilité dans le vieillissement à l'eau de mer est inférieure à celle de l'eau normale et donc la valeur du module du composite est meilleure. Cela influe sur la fréquence naturelle plus élevée du composite vieilli à l'eau de mer que dans le vieillissement normal des déchets. Le vieillissement a entraîné une détérioration des performances de la matrice et de l'interface et la formation de microfissures, qui devraient être responsables de la diminution de la fréquence naturelle et de l'augmentation du coefficient d'amortissement des composites (Tableau 14).

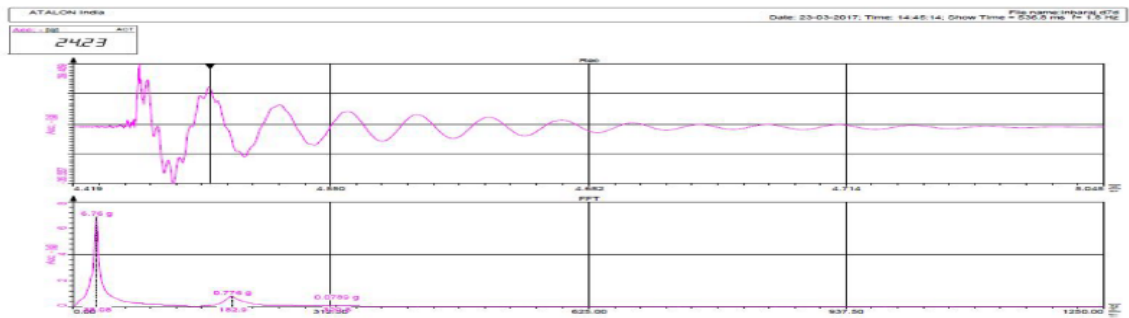


Figure I.23 Fréquence propre en fonction du temps et accélération en fonction du temps (à l'état initial) [26].

Tableau I.12 Effet de l'absorption d'humidité sur le comportement vibratoire (eau normale) [26].

Mode	Fréquence naturelle théorique (Hz)	Fréquence expérimentale à l'état initial (Hz)	Fréquence expérimentale au 4e jour (Hz)	Fréquence expérimentale au 8e jour (Hz)	Fréquence expérimentale au 12e jour (Hz)
1	38,43	38,08	29,95	28,63	25,42
2	185,53	182,9	179,2	176,31	172,7
3	335,53	329,8	318,92	315,2	311,3

Tableau I.13 Effet de l'absorption d'humidité sur le comportement vibratoire (eau de mer). [26]

N°	Fréquence naturelle théorique (Hz)	Fréquence expérimentale à l'état initial (Hz)	Fréquence expérimentale au 4e jour (Hz)	Fréquence expérimentale au 8e jour (Hz)	Fréquence expérimentale au 12e jour (Hz)
1	38,43	38,08	32,37	31,4	35,14
2	185,53	182,9	181,2	181,05	183,2
3	335,53	329,8	326,6	328,3	325,21

I.4 Conclusion et position du problème

L'intégration des fibres naturelles dans les matériaux composites s'impose progressivement comme une alternative crédible et durable aux fibres synthétiques, notamment la fibre de verre. Leurs avantages faibles densité, coût réduit, biodégradabilité et origine renouvelable répondent aux exigences actuelles en matière de performance et de respect de l'environnement.

Parmi ces fibres, le jute se distingue par son potentiel élevé, en particulier lorsqu'il est combiné à des matrices polymères comme le polyester. Ce chapitre a permis de poser les fondations théoriques essentielles à la compréhension du comportement des composites à fibres naturelles et hybrides. Il a présenté les principaux types de fibres végétales, leurs applications, ainsi que les paramètres influençant leurs performances mécaniques, tels que la nature de la matrice et le type de renfort.

Ces éléments offrent une base solide pour aborder, dans les chapitres suivants, l'étude expérimentale des composites à base de jute, de verre, et hybrides.

Chapitre II

Matériels et Techniques Expérimentales

II.1 Introduction

Ce chapitre présente de manière détaillée les différentes techniques expérimentales à savoir : les constituants des composites, leur élaboration et mises en œuvre ainsi que leur caractérisation mécanique par une technique vibratoire. L'objectif est de caractériser les composites élaborés et de déterminer leurs propriétés mécaniques élastiques à travers une série d'essais normalisés et reproductibles. Les conditions d'essai, les dispositifs expérimentaux utilisés, ainsi que les méthodes de mesure et de traitement des données sont décrits afin de garantir la précision et la cohérence des résultats. Ces essais incluent notamment les tests et analyses de vibrations libres. L'ensemble de ces procédures vise à mieux comprendre le comportement global des composites et l'influence des fibres de renfort, qu'elles soient naturelles ou synthétiques, sur leurs propriétés finales.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Tissue de fibre

Le tissu e, fourni en rouleaux par une usine de fabrication de cordes en fibres naturelles située dans la wilaya de Bejaïa. Le tissu de jute comporte deux directions principales : la chaîne (Y) et la trame (X), comme illustré sur la figure II.1.

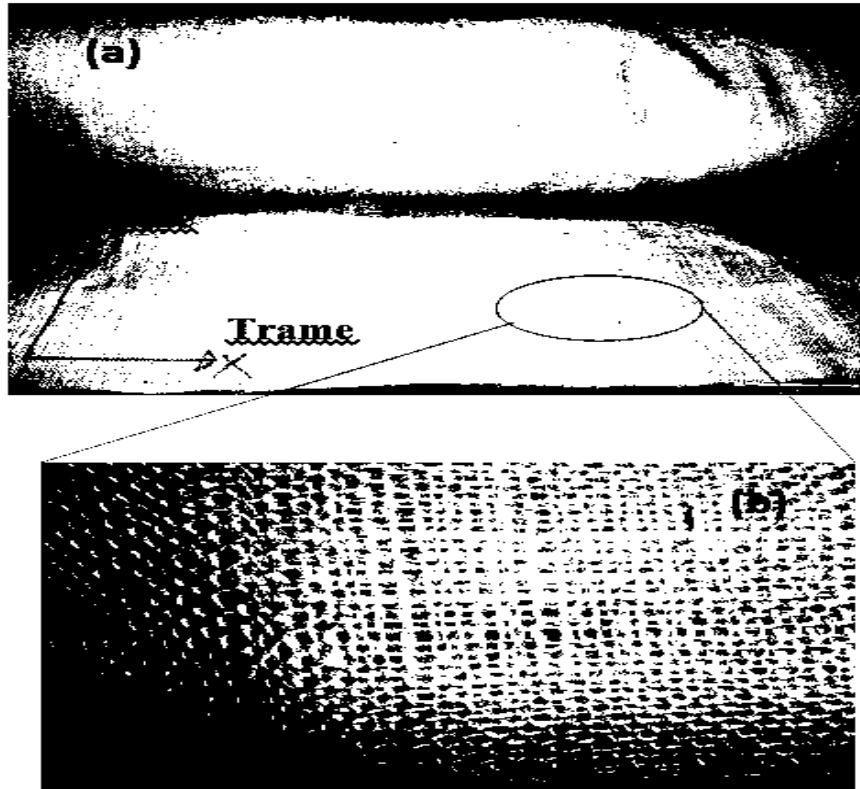


Figure II.1 : (a) Rouleau de tissu de jute de densité 300 g/m^2 et (b) Zone sélectionnée.

II.2.2 Tissue de fibre de verre

La fibre de verre est un matériau synthétique constitué de très fins filaments de verre, utilisés principalement comme renfort dans les matériaux composites (Figure I.2).

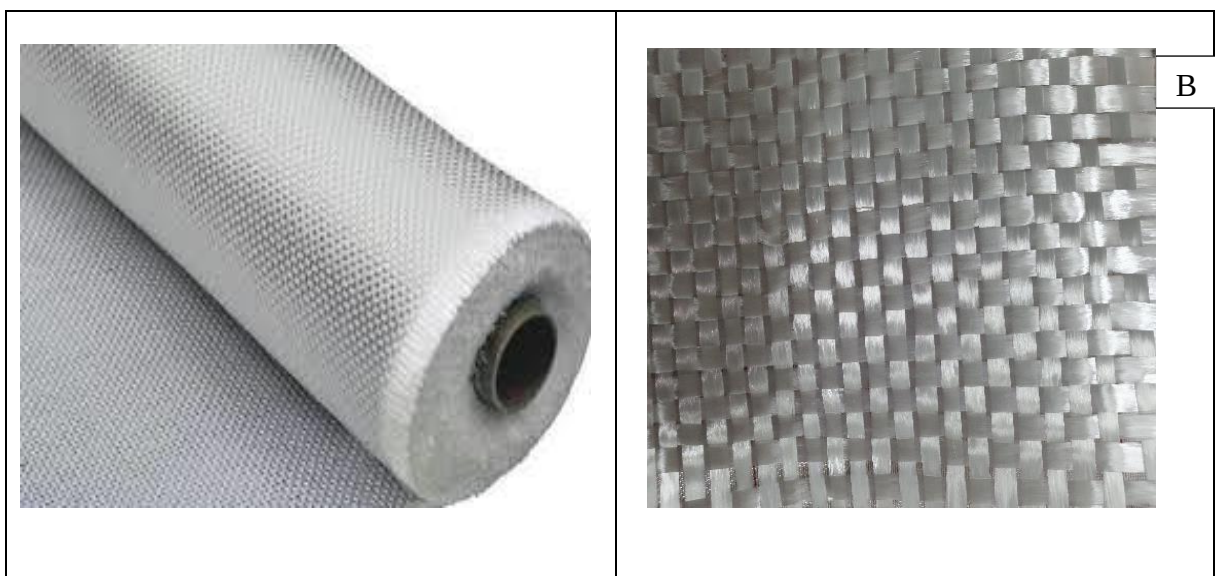


Figure II.2 : (A) Rouleau de tissu de Verre de densité 500 g/m^2 et (B) Un pli de tissu de fibre de verre.

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

La fibre de verre est un matériau synthétique constitué de très fins filaments de verre, utilisés principalement comme renfort dans les matériaux composites. Grâce à ses caractéristiques telles que la légèreté, la résistance mécanique et la bonne tenue à la corrosion, elle est devenue un composant essentiel dans divers secteurs industriels. Employée dans la fabrication de pièces automobiles, de structures navales, d'éléments de construction ou encore d'équipements sportifs, la fibre de verre offre une alternative économique et performante aux matériaux métalliques traditionnels. Son développement s'inscrit dans une recherche constante d'optimisation des matériaux en alliant performance, durabilité et coût réduit.

II.2.3. La matrice (résine polyester)

La matrice utilisée dans cette étude est une résine polyester, choisie pour son faible coût et sa large utilisation dans les composites à usage courant (Figure II.3). Il s'agit d'une résine synthétique thermodurcissable, adaptée aux applications où des performances mécaniques modérées. Elle est couramment employée avec des renforts synthétiques (fibres de verre longues ou courtes) ou naturels (fibres végétales ou animales).



Figure II.3 : Résine polyester utilisée.

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

Les résines polyesters insaturées nécessitent l'ajout d'un durcisseur et d'un accélérateur (1 à 1,5 % chacun) pour initier une réaction de polymérisation irréversible, entraînant le durcissement du matériau (Figure II.3).

II.3 Protocole de préparation des plaques composite et leur découpe en éprouvettes

II.3.1 Méthode de préparation des plaques composites

Les plaques composites élaborés sont des stratifiés constitués de huit plies de tissu bidirectionnel, imprégné manuellement dans une et d'une résine polyester, soit :

- ✓ de verre de densité surfacique /m²
- ✓ de jute ayant une masse surfacique de /m²,
- ✓ hybride Verre/

Les stratifiés sont élaborés sous forme de plaques de dimensions 340 x 340 mm², composées de huit plis, et fabriqués par la technique du moulage sous vide (Figure II.4). Les plaques en résine seule, quant à elles, sont fabriquées par coulée dans un moule en verre de dimensions mm² (Figure II.6).

Les biocomposites sont imprégnés à température ambiante, et la résine est catalysée puis durcie à des concentrations comprises entre 1 % et 1,5 % en masse. Après l'application de la résine, l'ensemble reste dans le moule pendant 24 heures pour permettre une solidification totale de la résine. Les plaques stratifiées ainsi obtenues sont ensuite laissées à l'air libre pendant 7 jours (Figure II.7) pour compléter le processus de durcissement.

Préparation du renfort

La préparation du renfort est réalisée avant l'élaboration des biocomposites par la découpe des plis de tissu de verre ou de jute à partir de rouleaux (Figure II.1 et II.2) aux dimensions de mm². Ces plis sont regroupés en lots de huit, puis pesés à l'aide d'une balance électronique de précision 0,01 g (Figure II.4a).

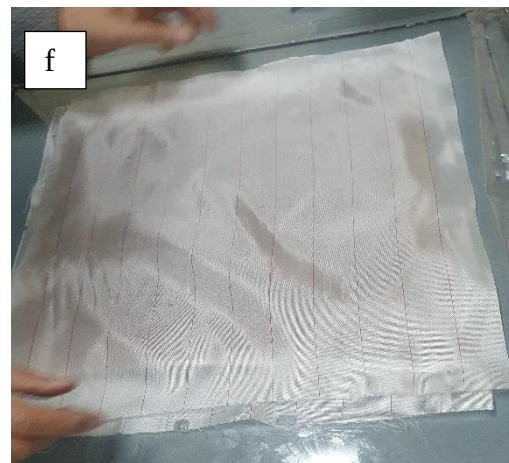
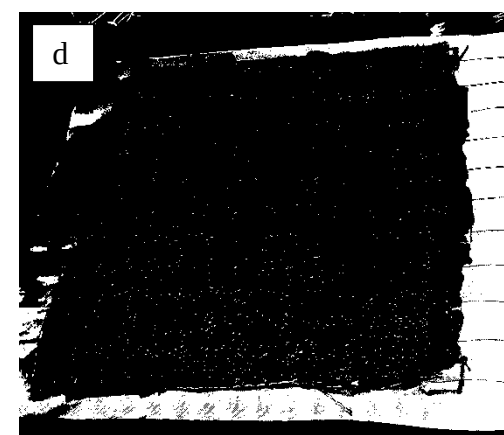
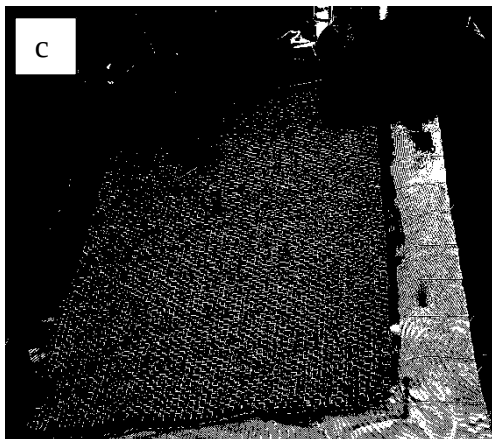
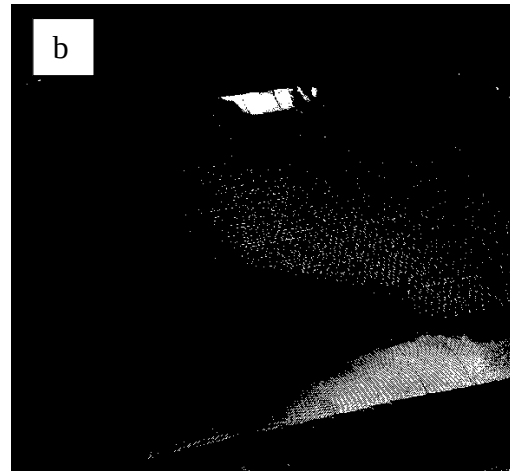
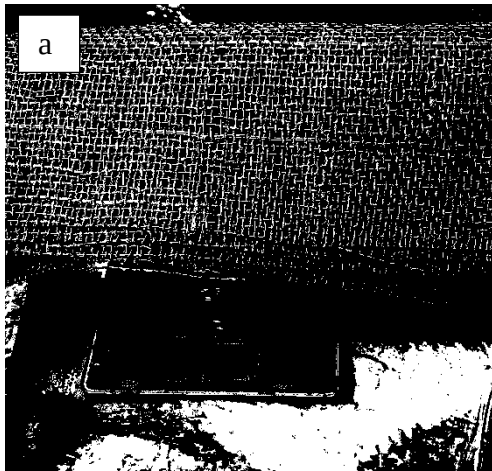
Étapes de préparation d'une plaque biocomposite

La préparation d'une plaque biocomposite (Figure II.4) suit un procédé en plusieurs étapes

1. **Nettoyage du moule**
2. **Pesés des fibres** (Figure II.4.a)
3. **Dépôt du tissu d'arrachage** : Un tissu d'arrachage est déposé sur un moule préparé, étalement de la résine.
4. **Dépôt du premier pli de tissu** : Le premier pli de tissu de fibres est positionné sur le moule (Figure II.4.b).
5. **Application de la résine** : La résine est étalée uniformément sur toute la surface du pli à l'aide d'un pinceau (Figure II.4.c et II.4.d).
6. **Répétition des étapes 4 et 5** : L'opération de dépôt de pli et d'étalement de résine est répétée pour les plis suivants, jusqu'à ce que les huit plis soient placés.
7. **Dépôt du tissu d'arrachage** (Figure II.4.f)
8. **Dépôt du film perforait** (Figure II.4.g). Ce film plastique perforait permet de faire passer la résine en surplus.
9. **Dépôt du tissu de blaidage absorbant** : C'est un tissu qui permet absorber l'excédent de résine. (Figure II.4.h).
10. **Fermeture du moule** (Figure II.4.i). Une fois terminé le moule est fermé par un film plastique.
11. Démarrage de la pompe à vide pendant quatre heures (Figure II.4.j) : Ceci permet d'une part de faire une dépression du moule et d'autre part d'absorber les bulles d'air qui se forme dans le moule due à la réaction chimique du durcisseur et de l'accélérateur.

Moulage sous vide

Avant d'activer la pompe à vide, le moule est scellé avec un film plastique transparent, qui est collé sur le pourtour de la plaque à l'aide d'une bande adhésive afin d'assurer une étanchéité optimale. La dépression générée par la pompe atteint environ 30 bars et est maintenue pendant 6 heures, jusqu'à la polymérisation complète de la plaque. Cette dépression exerce une force de compression sur la plaque, ce qui permet de densifier le stratifié tout en éliminant les bulles d'air emprisonnées dans le moule. Après 6 heures, la plaque est démoulée (Figure II.5) et laissée à température ambiante pendant 15 jours afin de garantir une polymérisation complète.



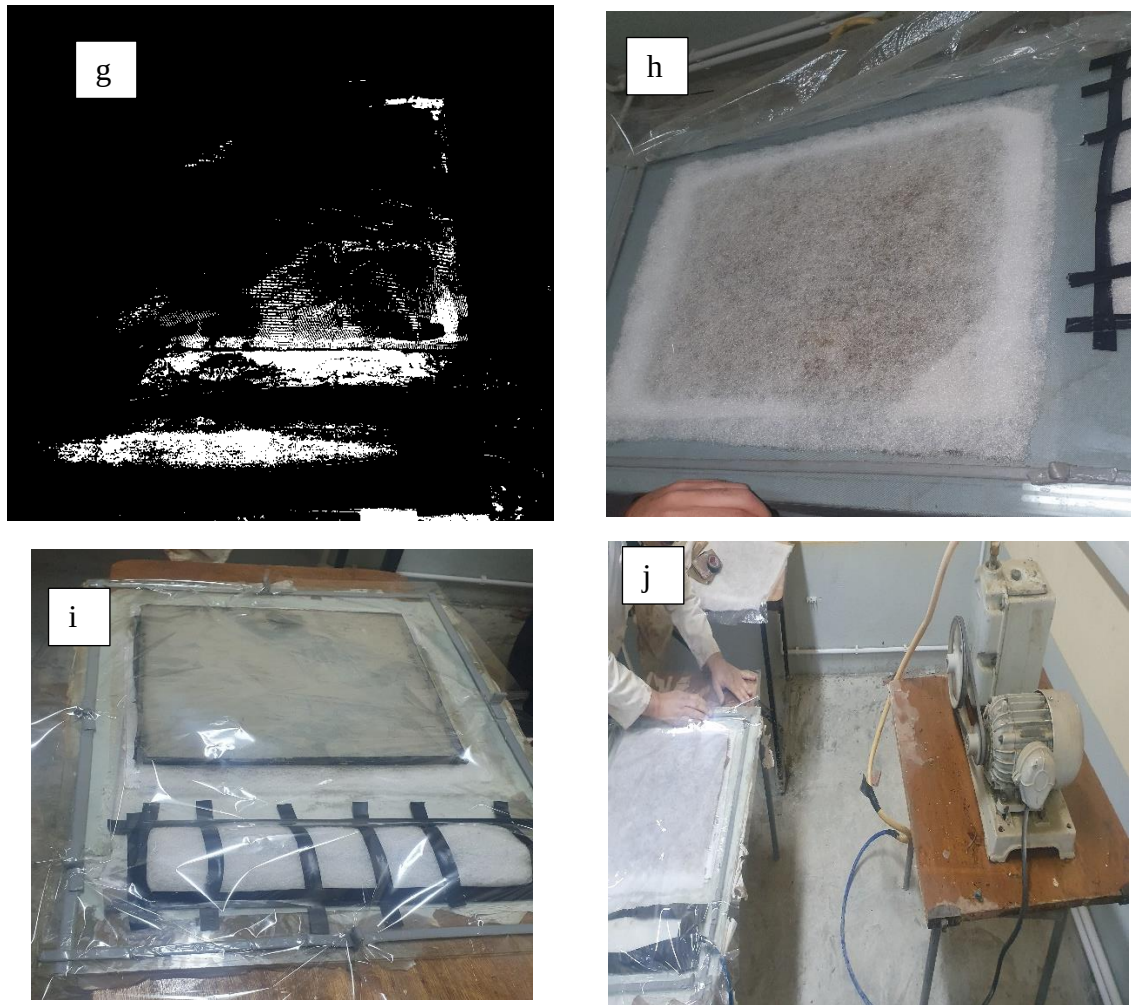
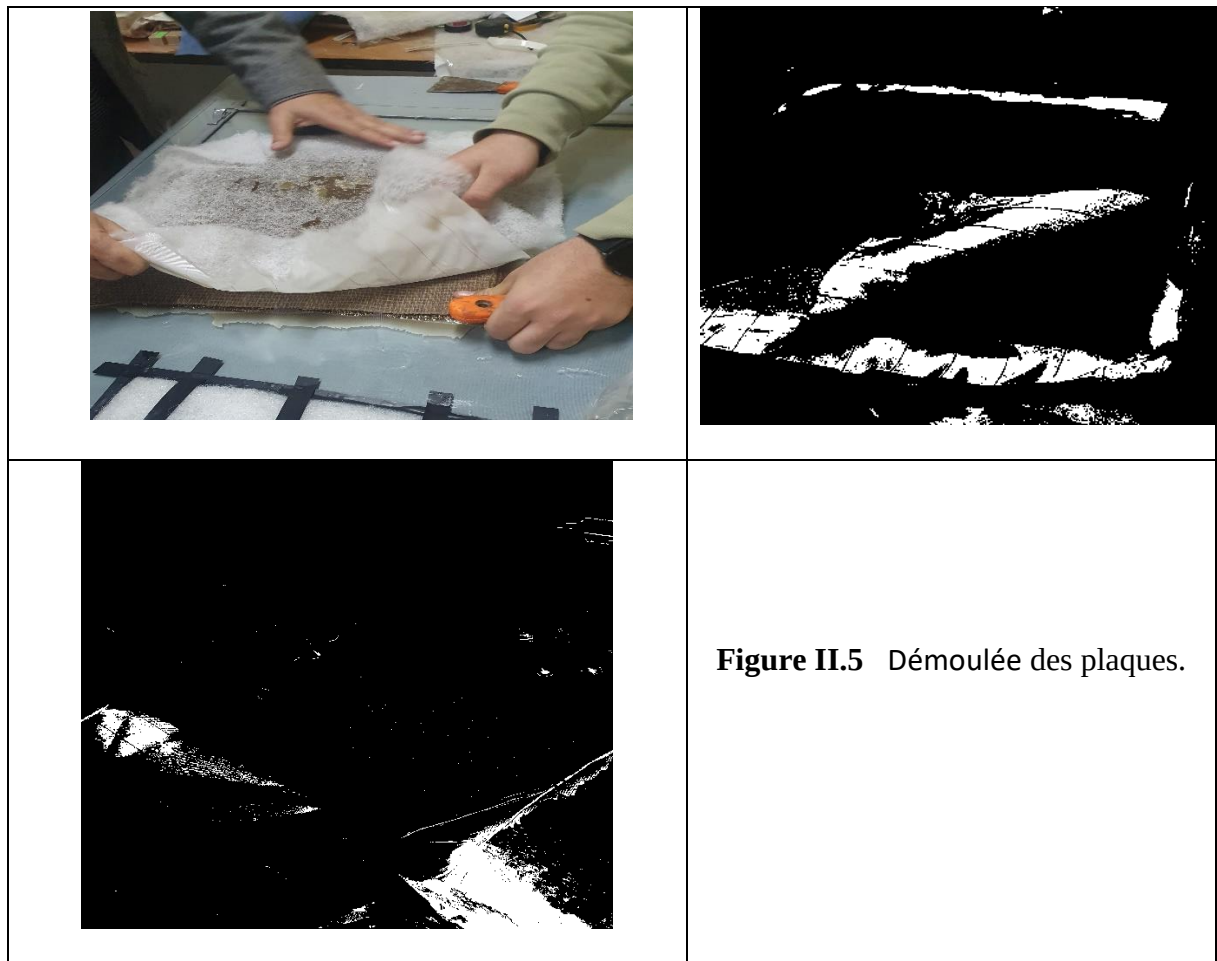


Figure II.4 : Préparation de plaques composites stratifiées par la technique du sac

Après quatre heures la pompe est arrêtée et le démoule de la plaque est effectué après au moins 20h ou le moule est ouvert et les tissus d'absorption et d'arrachage sont enlevés (Figure II5).



Les plaques en résines sont obtenues après avoir mélangé une quantité de résine avec le durcisseur et l'accélérateur ensuite le mélange est versé dans un moule (Figure II6).

Les plaques élaborées sont présentées dans la figure 7.

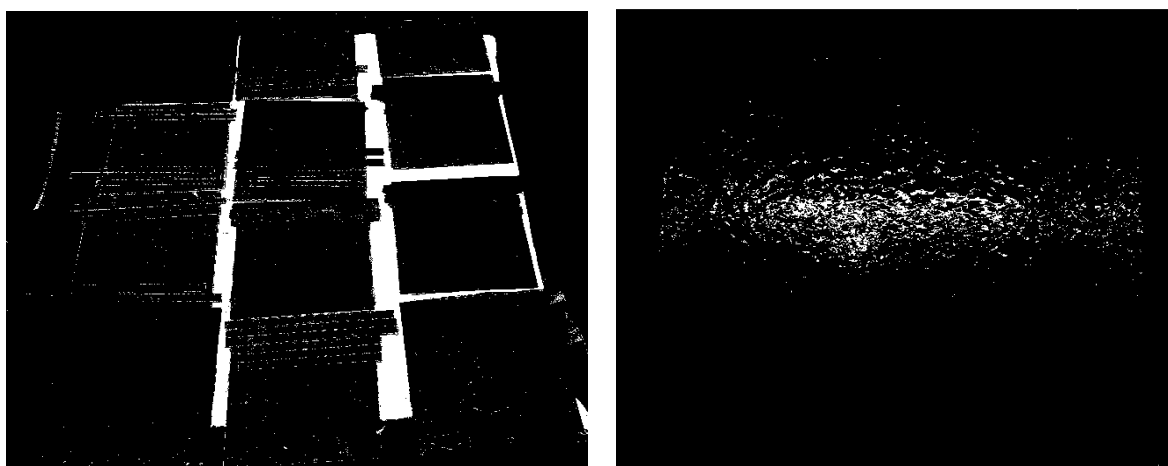
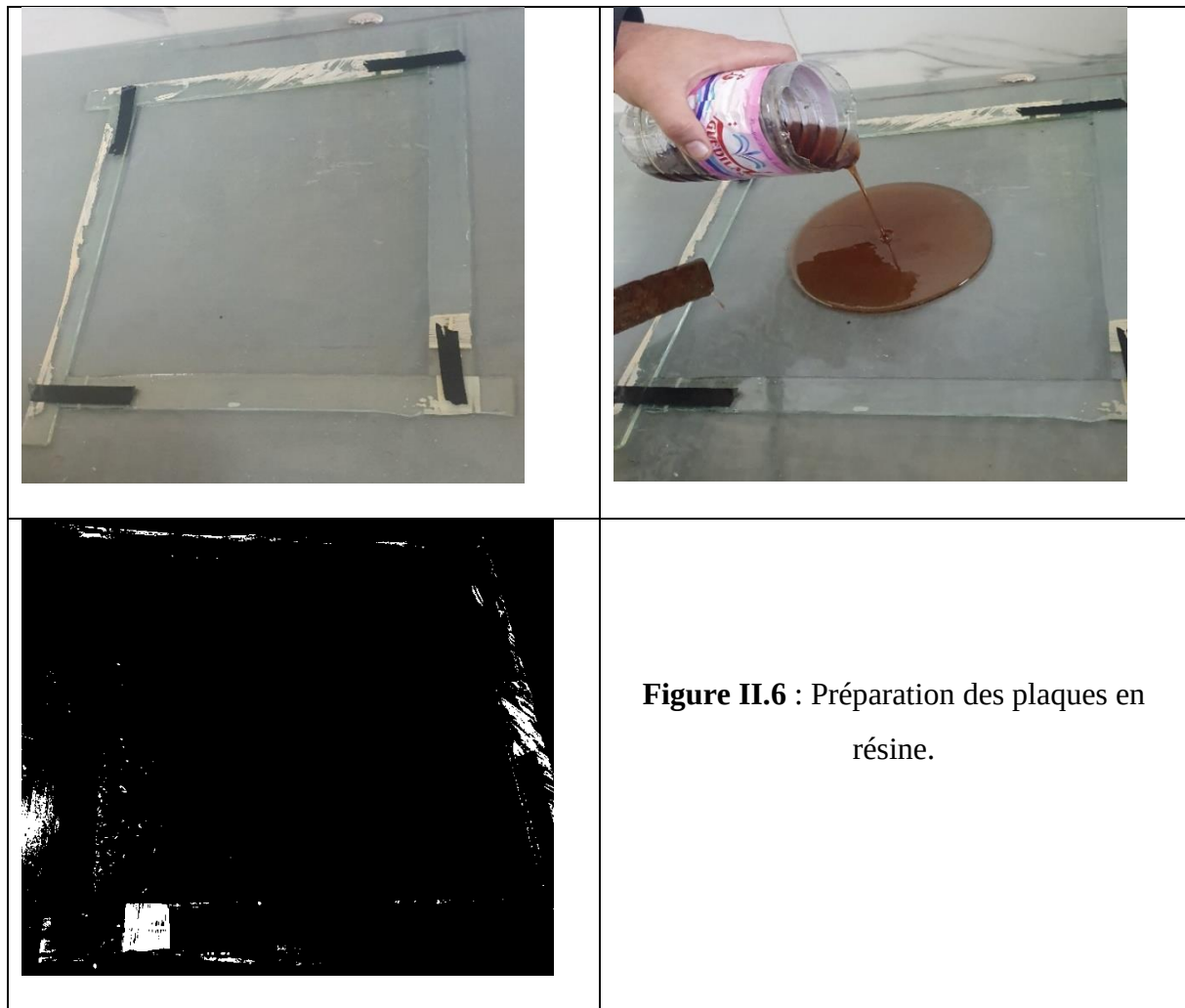


Figure II.7 Plaques composites et plaque en résine.

II.3.2 Découpe des plaques composites en éprouvettes

Les plaques composites et de résine élaborés ont été découpées en éprouvettes, à l'aide d'une tronçonneuse équipée d'un disque en diamant (Figure II.8 et II.9), dans le sens de la chaîne du tissu bidirectionnel, conformément à la norme **ASTM E 1876-01**, ainsi que suivant trois autres orientations 25, 45 et 65 degrés par rapport à la direction de la chaîne des fibres. Avant d'être découpées en éprouvettes les plaques composites ont été séchées dans une étuve à une température de 70°C pendant 5 heures, afin d'assurer une polymérisation complète.



Figure II.8 : Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques composites et de résine en éprouvettes.

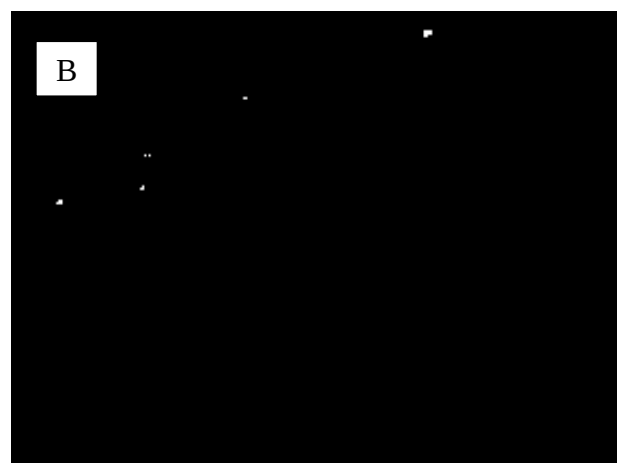
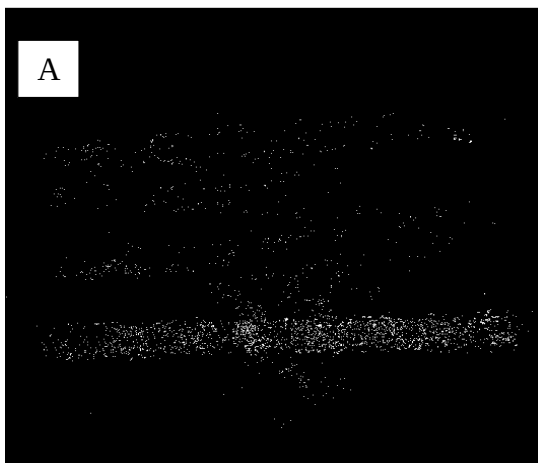


Figure II.9 : Exemple d'éprouvettes découpé selon la norme de flexion 3-points : (A) de jute, (B) de résine.

II.3.3 Capteur et son collage

Le protocole de collage de capteur commence par la préparation du matériel nécessaire : capteurs munis de fils électriques, ruban adhésif, outils de nettoyage et un multimètre (Figure II.10). La première étape consiste à nettoyer soigneusement la surface sur laquelle le capteur sera fixé afin d'éliminer toute poussière, graisse ou impureté pouvant altérer l'adhérence. Une fois la surface propre et sèche, le capteur est positionné à l'endroit désiré avec la face active orientée vers l'extérieur. Pour une fixation temporaire ou dans un cadre expérimental, on utilise du ruban adhésif sur les deux faces pour maintenir fermement le capteur en place, en veillant à ne pas créer de bulles d'air. Après fixation, les connexions électriques sont vérifiées à l'aide d'un multimètre pour s'assurer de la continuité et de l'intégrité du capteur. Enfin, les fils sont reliés à un système de mesure tel qu'un oscilloscope ou une carte d'acquisition de données afin de vérifier la réponse du capteur à des sollicitations mécaniques. Ce protocole assure une installation fiable et reproductible du capteur pour la mesure de vibrations, d'ondes acoustiques ou d'impacts (Figure II.10).



Figure II.10 : Capteur et matériel utilisé pour le collage.

II.4. Protocole expérimental

II.4.1 Norme utilisée

Pour la détermination des propriétés mécaniques des matériaux composites polymères renforcés de fibres naturelles, verre et hybrides, notamment les modules d'élasticité (E) et rigidité (G), et du coefficient de Poisson (μ) à partir des caractéristiques vibratoires, la norme

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

ASTM E1876-01 est appliquée. Ces références décrivent la méthode de calcul de **E**, **G** et de **μ** à partir des fréquences propres de flexion, ainsi que des dimensions et de la masse d'un solide [4,7,8]. Le module *E* d'une plaque composite peut être exprimé comme suit :

$$\dots\dots\dots(1)$$

où **E** est le module d'élasticité (Pa), **m** est la masse (g), **f_r** est la fréquence de résonance en flexion (Hz), **b** est la largeur (mm), **L** est la longueur (mm), **t** est l'épaisseur (mm) et **T** est le facteur de correction pour le mode de flexion et de torsion, qui tient compte de l'épaisseur des plaques. Ce facteur **T** peut être calculé par l'expression suivante :

$$T = \frac{1,000 + 6,338(1 + 1,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{L}{t}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4}{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{L}{t}\right)^4} \dots\dots\dots(2)$$

Où **μ** est le coefficient de Poisson. Pour simplifier le calcul, si $L/t \geq 20$, T peut être simplifié comme suit :

$$T = 1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L}\right)^2 \dots\dots\dots(3)$$

Pour déterminer le module de rigidité, **G** peut être utilisé à partir de la fréquence de torsion d'une plaque, exprimée par :

$$= \frac{B}{(1 + A)} \dots\dots(4)$$

Avec :

$$= \frac{b/t + t/b}{4 + 0,21 \left(\frac{t}{b}\right)^6} \dots\dots\dots(5)$$

$$= \left[\frac{\begin{bmatrix} 0 & -0,0078(b/t)^3 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 12,03 \left(\frac{b}{t}\right) + 9,892 \left(\frac{b}{t}\right)^2 \end{bmatrix}} \right] \dots \dots \dots (6)$$

Où **G** est le module de rigidité ou de cisaillement (Pa), f_t est la fréquence de résonance de torsion de la plaque (Hz). **A** et **B** sont les facteurs de correction empiriques dépendant du rapport largeur/épaisseur.

En utilisant les valeurs du module d'élasticité et du module de rigidité, le coefficient de Poisson peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\mu = -1 \dots \dots \dots (7)$$

II.4.2 Méthodologie et expérience

L'échantillon, qu'il soit en matériau composite naturel, synthétique ou hybride, est fixé en porte-à-faux à une extrémité, tandis que l'autre reste libre pour vibrer. L'excitation est assurée par un choc mécanique manuel contrôlé à l'aide d'un impacteur sphérique composé d'une bille en acier montée sur un bras en polymère (Figure II.11a). Un capteur piézoélectrique miniature (4), collé sur l'extrémité libre de la plaque à l'aide d'un ruban adhésif haute température ou d'une colle adaptée, capte la réponse vibratoire. Ce capteur est connecté à un amplificateur (2), puis au système d'acquisition PicoScope, après équilibrage du logiciel. Un support métallique articulé (1) permet un positionnement stable et précis du capteur, limitant les perturbations extérieures. Le signal acquis est affiché sur l'écran d'un ordinateur (3), et le logiciel PicoScope en extrait les pics de résonance correspondant aux modes de flexion ou de torsion. À partir des fréquences mesurées et en tenant compte des dimensions géométriques et de la masse de la plaque, les propriétés mécaniques sont calculées selon les équations définies

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

par la norme. Ce protocole expérimental permet ainsi une caractérisation rapide, fiable et sans endommagement des matériaux composites testés.

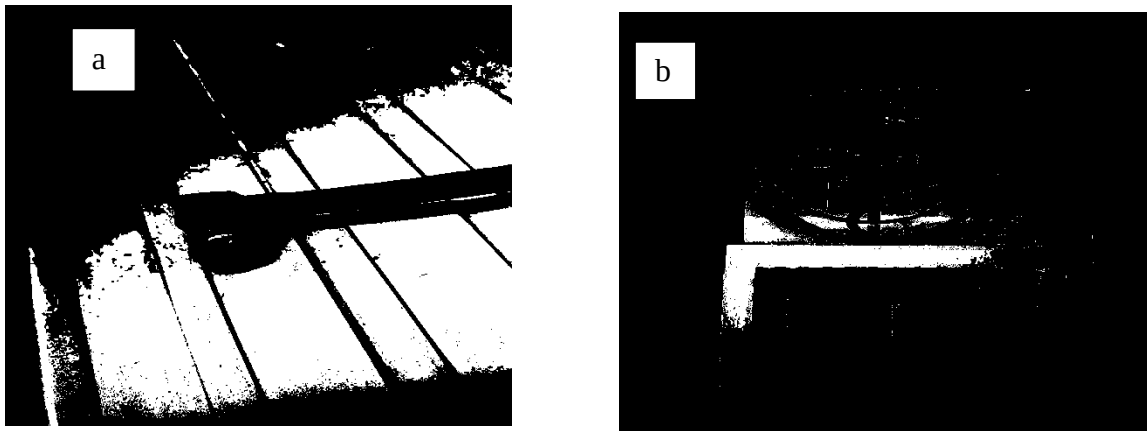


Figure II.11 : (a) Impacteur utilisé pour l'excitation vibratoire des plaques composites (b) appareil du *PicoScope*.

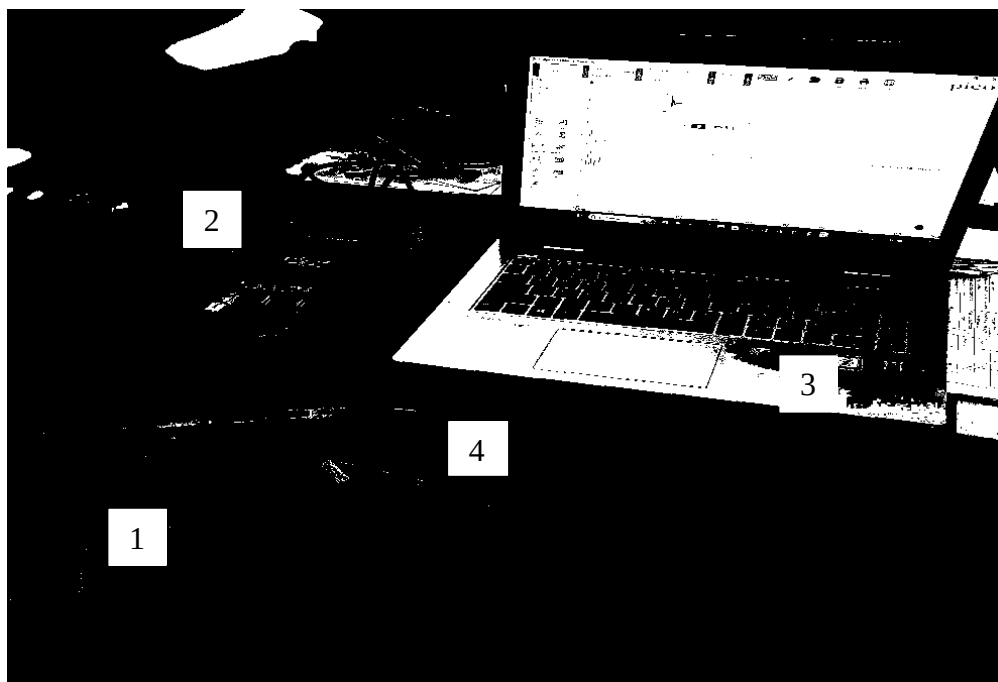


Figure II.12 : L'essai expérimental réalisé (1) Un support métallique, (2) le PicoScope, (3) La signal de réponse vibratoire, (4) l'éprouvette avec capteur montée.

II.5. Conclusion

Chapitre II : Matériels et Techniques Expérimentales

Ce chapitre a été consacré à décrire les méthodes d'élaboration et de caractérisation vibratoire appliquée aux matériaux composites polymères renforcés de fibres naturelles, verre et hybrides s'est révélée efficace et non destructive pour l'évaluation de leurs propriétés mécaniques. Grâce à l'utilisation du PicoScope, du capteur piézoélectrique et de l'impacteur sphérique, il a été possible de mesurer avec précision les fréquences propres des plaques composites en flexion et en torsion. L'exploitation de ces données, selon la norme

, a permis de déterminer des grandeurs fondamentales telles que le module d'élasticité E , le module de rigidité G et le coefficient de Poisson μ . Cette approche expérimentale offre ainsi un moyen fiable, rapide et reproductible pour l'étude des performances mécaniques des matériaux composites, en particulier dans le cadre de l'ingénierie des matériaux et de l'optimisation de structures légères.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce travail nous avons utilisé la fibre de naturelle de jute tandis que les fibres synthétiques c'est bien la fibre de verre (V500) qui sont largement utilisées pour leurs excellentes performances mécaniques. En combinant ces types de fibres dans des composites hybrides, il est possible d'optimiser les propriétés mécaniques globales des matériaux pour répondre à des exigences spécifiques dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, du bâtiment ou du sport.

Pour concevoir et valider les matériaux élaborés, il est indispensable de déterminer avec précision leurs propriétés mécaniques fondamentales, telles que :

- le module d'élasticité (E),
- le module de cisaillement (G),
- le coefficient de Poisson (μ).

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussions des différents résultats expérimentaux obtenue par une technique vibratoire. Dans ce travail, les propriétés E , G et μ sont obtenues à partir de l'analyse des caractéristiques vibratoires d'éprouvettes composites. La méthode appliquée est basée sur la norme ASTM , qui permet, à l'aide d'un test de vibration non destructif, d'extraire les fréquences propres en flexion et en torsion. Ces fréquences, combinées aux dimensions et à la masse des plaques, permettent de calculer les modules mécaniques recherchés.

III.2 Résultats et Discussion

Les réponses en vibration libre des éprouvettes de la résine et des composites stratifiés à matrice polymère renforcée de fibres ont été obtenues par voie numérique. Cette étude vise à analyser le comportement dynamique des matériaux composites à travers l'identification de leurs fréquences naturelles.

Chapitre III : Résultats et discussions

L'éprouvette utilisée pour les essais vibratoires est une plaque de résine présentant les dimensions suivantes : une longueur de 120 mm, une largeur de 15 mm et une épaisseur de 2,5 mm. La masse de l'échantillon est de 5,9 grammes. Ces caractéristiques géométriques et physiques sont essentielles pour le calcul des propriétés mécaniques dynamiques

Les résultats obtenus mettent en évidence les différentes formes de modes de vibration pour trois types de composites : Ces modes correspondent aux fréquences propres mesurées selon différentes orientations des plaques (et 25°). Ils permettent de comprendre comment chaque matériau réagit sous une excitation libre, en fonction de ses propriétés mécaniques, de sa géométrie et des conditions aux limites imposées. Chaque mode de vibration est associé à une fréquence particulière, révélant ainsi les comportements dynamiques spécifiques à chaque composite. Pour garantir la fiabilité des résultats, **au moins trois essais expérimentaux ont été réalisés pour chaque configuration.** La figure retenue pour l'analyse est celle dont le mode de vibration est le plus représentatif et cohérent avec les résultats moyens obtenus. Ce choix permet d'assurer une bonne corrélation entre l'observation visuelle du mode et les valeurs expérimentales mesurées.

Après la détermination des fréquences naturelles pour chaque composite à l'aide de l'analyse vibratoire, la norme **ASTM** a été appliquée pour le calcul des propriétés mécaniques dynamiques, notamment le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ). Cette norme fournit les équations nécessaires pour convertir les fréquences mesurées en valeurs de modules mécaniques, en tenant compte des dimensions, de la masse de l'échantillon et de ses caractéristiques géométriques qui sont présentés dans le Tableau III.1. Cette méthode présente l'avantage d'être non destructive et fiable pour l'évaluation de matériaux composites.

Tableau III.1 Dimensions et caractéristiques physiques des éprouvettes en composites.

Matériau	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Masse surfacique (g/m ²)	Taux de fibre (%)	Masse (g)
JUTE						
V500						
JUTE/V500						

III.2.1 La résine

Le signal de réponse vibratoire libre mesuré pour les éprouvettes de résine correspond à la vibration que le matériau subit après avoir été brièvement excité, ce signal se caractérise par une oscillation dont l'amplitude diminue progressivement au fil du temps (Figure III.1). Ce comportement traduit la présence d'un amortissement naturel dans le matériau, lié à la structure interne de la résine. La vibration n'est donc pas permanente, mais s'éteint peu à peu. Visuellement, le signal présente une série d'ondes qui deviennent de moins en moins fortes, ce qui est typique des matériaux amortis comme les polymères. Les résultats de la fréquence, de E ; G et μ des trois tests effectués sont récapitulés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 Propriétés mécaniques de la résine obtenue expérimentalement.

Résine		Test 1	Test 2	Test 3	Valeur moyenne	Standard déviation
	Fréquence (Hz)					
	Module d'élasticité, E (GPa)					
	Module de cisaillement, G (GPa)					
	Coefficient de Poisson, μ					

Les mesures de fréquences naturelles de la résine révèlent une réponse dynamique remarquable, avec une valeur moyenne élevée de 1565 Hz et une faible dispersion (écart maximal de 22,61 Hz), ce qui traduit une bonne homogénéité du matériau ainsi qu'une excellente reproductibilité des résultats. Ce comportement vibratoire stable positionne cette résine comme un matériau de référence fiable pour des modélisations destinées à des applications techniques exigeantes.

Chapitre III : Résultats et discussions

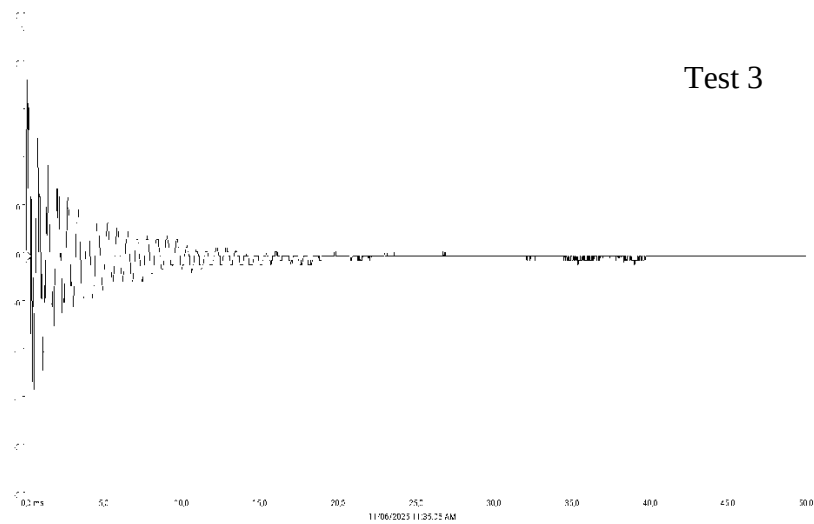
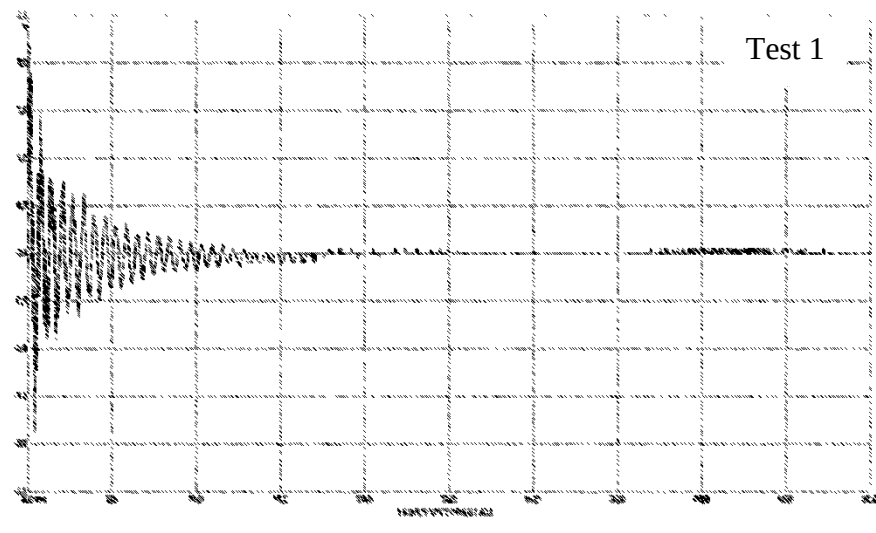


Figure III.2 Signaux de réponse vibratoire mesurés pour les éprouvettes de résine des trois tests effectués.

La résine utilisée dans la composite présente des caractéristiques mécaniques typiques d'un matériau polymère non renforcé. Le module d'élasticité (E) atteint en moyenne 3,36 GPa, ce qui traduit une rigidité modérée. Cette valeur reste pratiquement constante au vue de la faible différence entre les différentes mesures, témoignant d'un comportement homogène du matériau. Le module de cisaillement (G) suit la même tendance avec une moyenne de 49 GPa. Le coefficient de Poisson (μ) est relativement bas, autour de 0,1, ce qui reflète une faible déformabilité latérale. Globalement, ces valeurs confirment que la résine seule possède des propriétés mécaniques limitées par rapport aux composites, mais joue un rôle essentiel en tant que matrice de liaison et de transmission des efforts dans les structures renforcées (Figure 2).

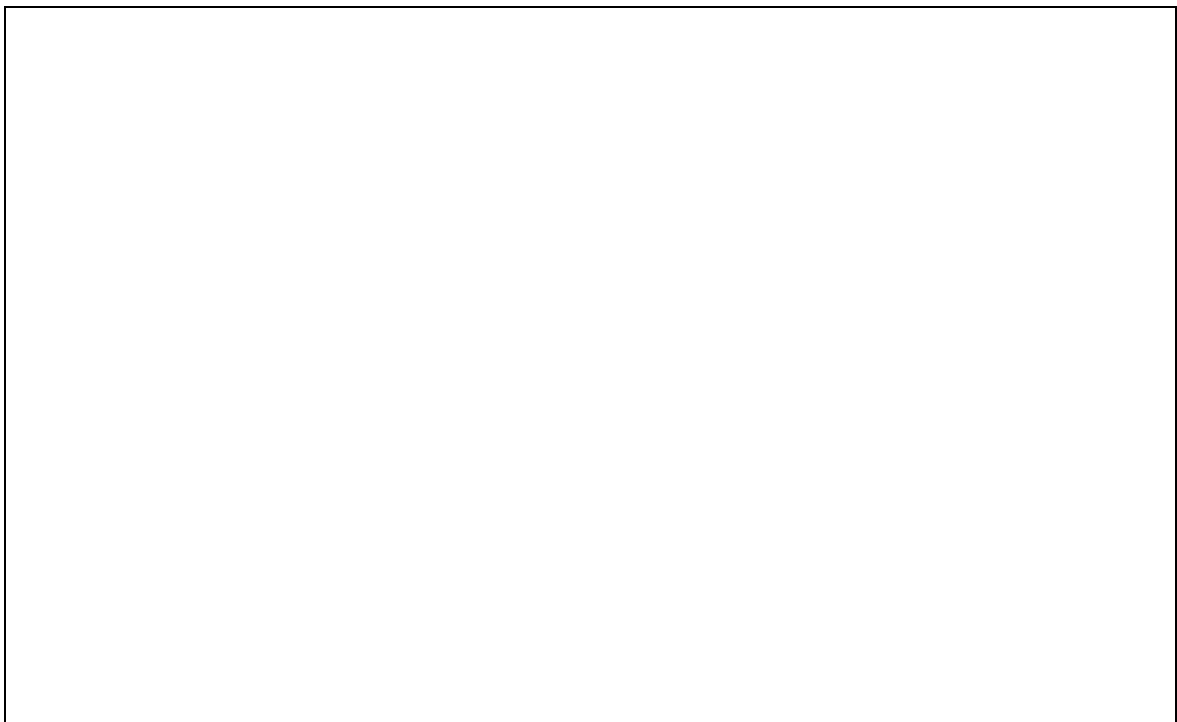


Figure III.2 : une représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de la résine.

III.2.2 Composite

Le signal de réponse vibratoire libre mesuré pour le composite V500 révèle un comportement dynamique fortement influencé par l'orientation des fibres. Pour les quatre orientations étudiées à savoir : 0/90°, 65°, 25° et 45° ou le matériau présente une réponse typique d'un système amorti, avec des oscillations qui décroissent progressivement dans le

temps après une excitation initiale (Figures III.3 à III.6). L'analyse vibratoire de ces figures révèle un comportement mécanique anisotrope, avec des fréquences naturelles variant selon l'orientation des fibres. Les fréquences les plus élevées sont observées à 65° (972,3 Hz) et à 0/90° (968,7 Hz), indiquant une bonne stabilité et une réponse rigide dans ces directions. À 25°, la fréquence chute à 819 Hz, traduisant une plus grande flexibilité. À 45°, une fréquence intermédiaire de 866 Hz est mesurée, accompagnée d'une dispersion plus marquée, suggérant une hétérogénéité locale. Les résultats obtenus récapitulés dans le Tableau III.3 mettent en évidence l'impact direct de l'orientation des fibres sur le comportement dynamique du composite V500.



Figure III. 3 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite V500/Polyester pour l'orientation 0/90.



Figure III.4 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite V500/Polyester pour l'orientation 65°.



Figure III.5 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite V500/Polyester pour l'orientation 25°.

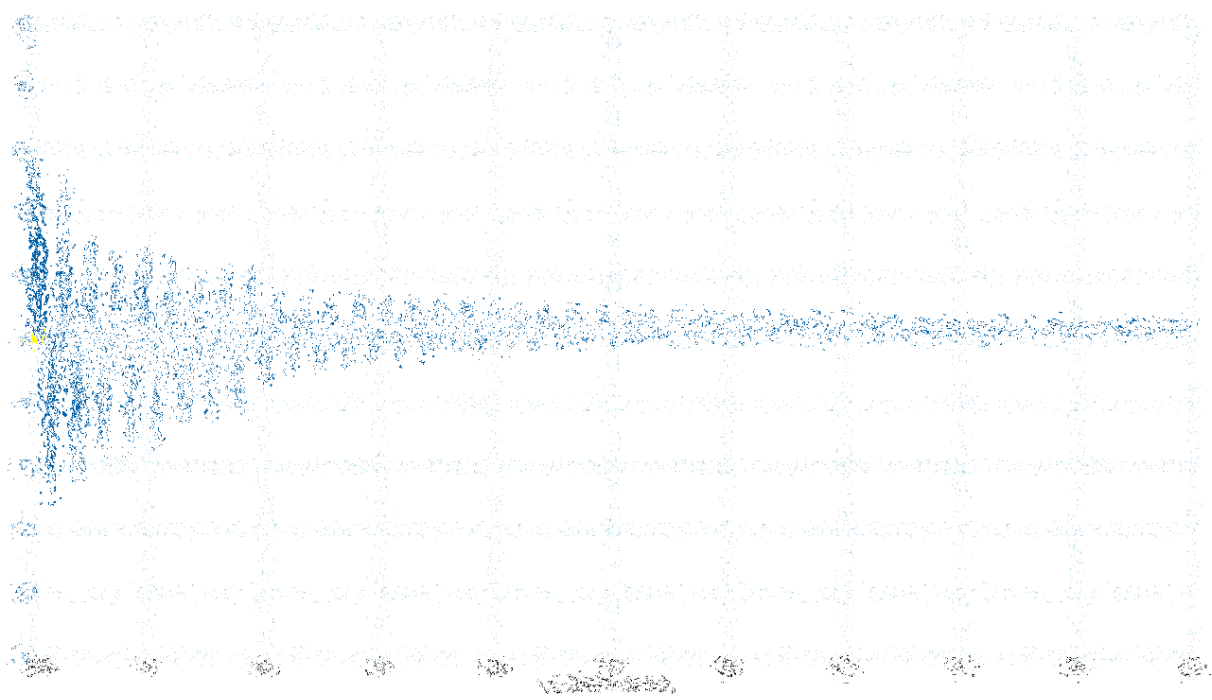


Figure III.6 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite V500/Polyester pour l'orientation 45°.

Tableau III.3 Propriétés mécaniques expérimental du composite V500.

V500			Test 1	Test 2	Test 3	Valeur moyenne	Standard déviation
	0/90	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	25	Fréquence (Hz)					

		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	65	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	45	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					

La Figure III.7 récapitule des propriétés mécaniques moyennes de V500 qui varient sensiblement en fonction de l'orientation des fibres. Le module d'élasticité (E) atteint sa valeur maximale dans la bordure standard avec 3,34 GPa, et reste élevé pour l'orientation à

65° avec 33 GPa. À l’opposé, l’orientation à 25° présente la plus faible rigidité, avec une valeur moyenne de 43 GPa. L’orientation à 45° montre un comportement intermédiaire avec un module moyen de GPa, représentant un bon compromis entre souplesse et rigidité.

Le module de cisaillement (G) suit une tendance similaire. Il est le plus élevé pour la bordure standard (1,291 GPa) et pour l’orientation à (1,287 GPa), indiquant une meilleure résistance aux déformations angulaires dans ces configurations. Il diminue pour les orientations à 45° (1,119 GPa) et surtout à 25°, où il atteint sa valeur la plus faible (0,938 GPa), traduisant une structure plus souple et plus déformable en cisaillement.

Quant au coefficient de Poisson (μ), il varie légèrement entre les différentes orientations. Il reste globalement stable, avec des valeurs comprises entre 93 et 98, montrant que le comportement transversal du matériau est peu affecté par l’orientation des fibres. Une légère augmentation est toutefois observée à 25°, ce qui pourrait indiquer une déformabilité latérale légèrement plus marquée dans cette configuration (Figure 7).

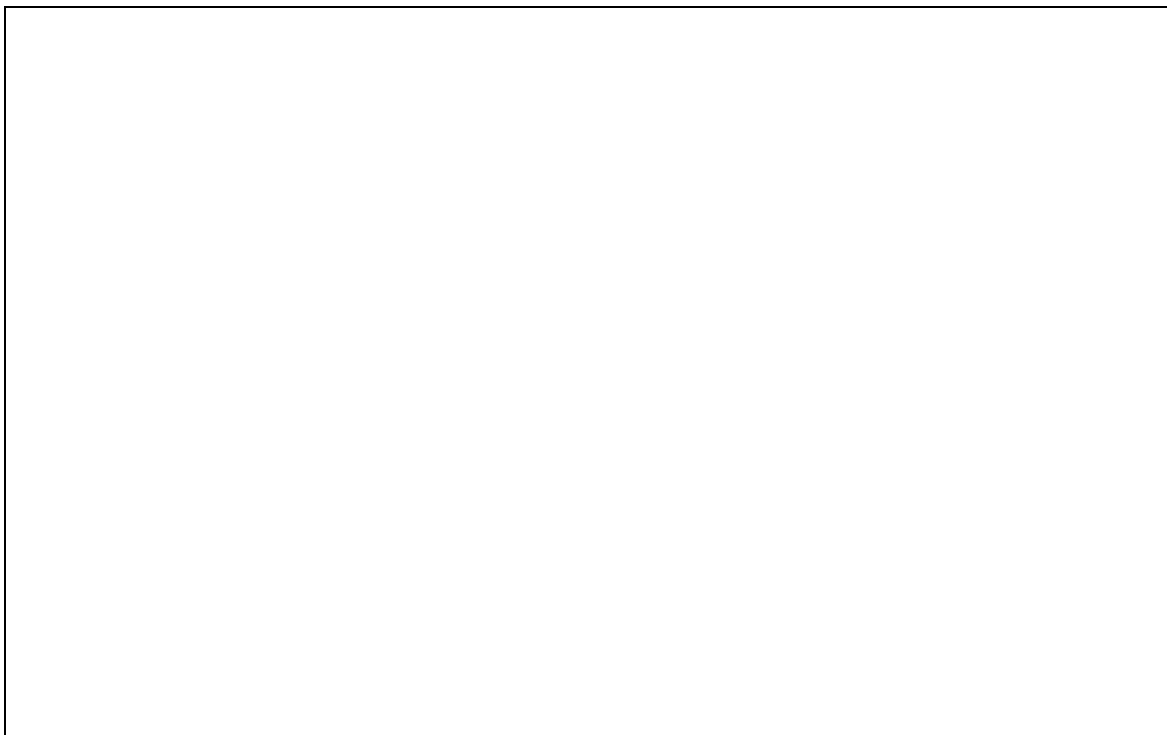


Figure III.7 Représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de V500.

III.2.3 Composite

Le signal de réponse vibratoire libre mesuré pour le composite renforcé par des fibres de jute montre un comportement fortement dépendant de l'orientation des fibres (Figures III.8 à III.11). L'analyse vibratoire de ce composite met en évidence une forte anisotropie mécanique, avec des fréquences variant selon l'orientation des fibres. Les orientations à 0° et 90° présentent des fréquences basses, autour de 550 Hz, traduisant une flexibilité accrue. En revanche, les orientations à 45° et 65° affichent des fréquences supérieures à 2300 Hz, indiquant une rigidité plus marquée. Une dispersion importante, notamment à 45° , suggère une hétérogénéité dans la structure du matériau. Les signaux vibratoires enregistrés montrent que les configurations à 0° et 90° produisent des oscillations rapides et bien définies, alors que celle à 25° présente une atténuation rapide, caractéristique d'une structure plus souple. Ces résultats confirment que l'orientation des fibres influence fortement le comportement dynamique du jute, un critère essentiel pour optimiser les performances des composites naturels dans des applications soumises à des charges vibratoires, comme les structures de bordures (voir Tableau 4).



Figure III.8 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite Jute/Polyster pour l'orientation 0/90.



Figure III.9 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite Jute/Polyster pour l'orientation 65°.



Figure III.10 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite Jute/Polyster pour l'orientation 25°.

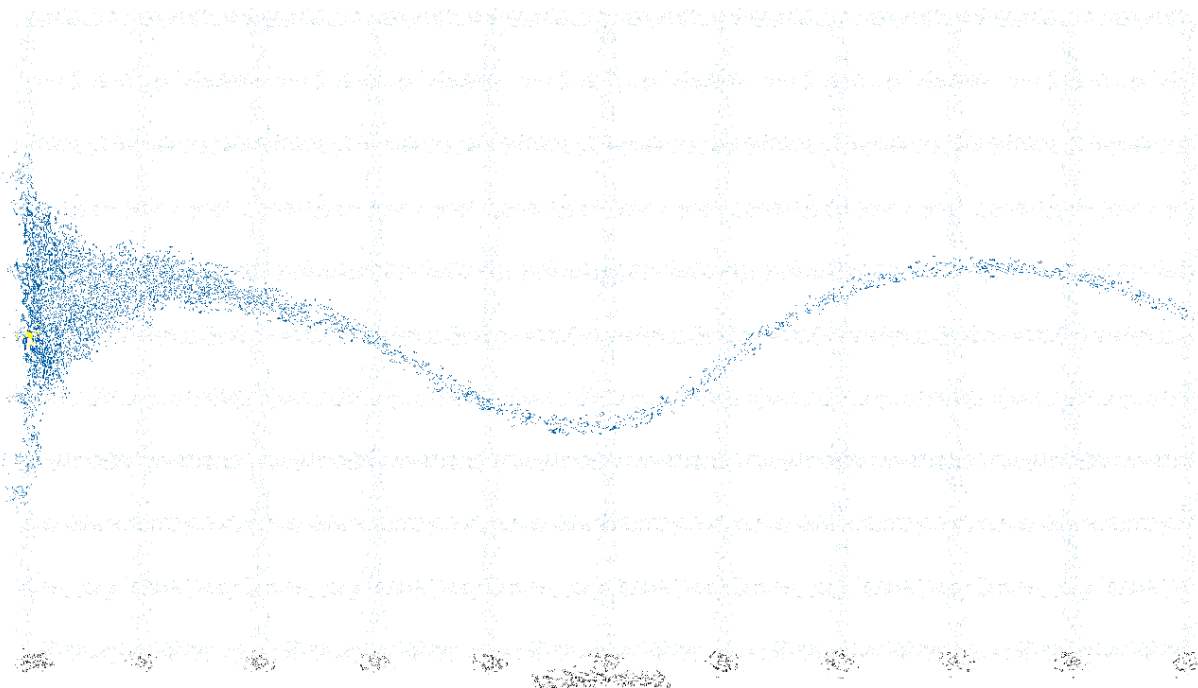


Figure III.11 Signal de réponse vibratoire mesurée du composite Jute/Polyster pour l'orientation 45°.

Le Tableau III.4 récapitule les résultats obtenus pour le composite Jute/Polyster où les propriétés mécaniques du composite à base de fibres de jute présentent des variations marquées selon l'orientation des fibres. Le module d'élasticité (E) est relativement stable dans les orientations basses : pour la bordure standard et l'orientation à 25°, il est respectivement de 9 GPa et 7 GPa en moyenne, ce qui reflète une rigidité modérée. En revanche, une hausse spectaculaire est observée pour les orientations plus élevées. À 65°, le module atteint 11 GPa, et à 45°, il monte jusqu'à 20 GPa, avec un pic ponctuel à plus de 94 GPa. Cette progression montre que l'alignement des fibres dans ces directions améliore considérablement la rigidité du matériau.

Le module de cisaillement (G) suit la même tendance. Il reste autour de 6 GPa pour ° standard et 3 GPa pour l'orientation à °, témoignant d'un comportement plutôt souple en cisaillement. Mais il augmente fortement à 65° (21,55 GPa) et surtout à 45° (24,02 GPa en moyenne), traduisant une résistance beaucoup plus grande aux déformations angulaires. Ces valeurs confirment que l'orientation des fibres a un effet de renforcement majeur.

Quant au coefficient de Poisson (μ), il est élevé pour la bordure (0,694) et encore plus pour l'orientation 0° (jusqu'à 0,745), ce qui indique une forte tendance à la déformation latérale. En revanche, pour les orientations à 25° et 65° , il se stabilise autour de 0,3, montrant une meilleure cohérence structurelle et moins de déformation transversale.

Tableau III.4 Propriétés mécaniques expérimental de composite

JUTE			Test 1	Test 2	Test 3	Valeur moyenne	Standard déviation
	0/90	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	25	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	65	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					

45	Coefficient de Poisson, μ					
	Fréquence (Hz)					
	Module d'élasticité, E (GPa)					
	Module de cisaillement, G (GPa)					
	Coefficient de Poisson, μ					

La Figure 12 illustre graphiquement les propriétés mécaniques moyennes des composites renforcé par de la fibre de jute, notamment le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ), déterminés à partir des essais vibratoires.

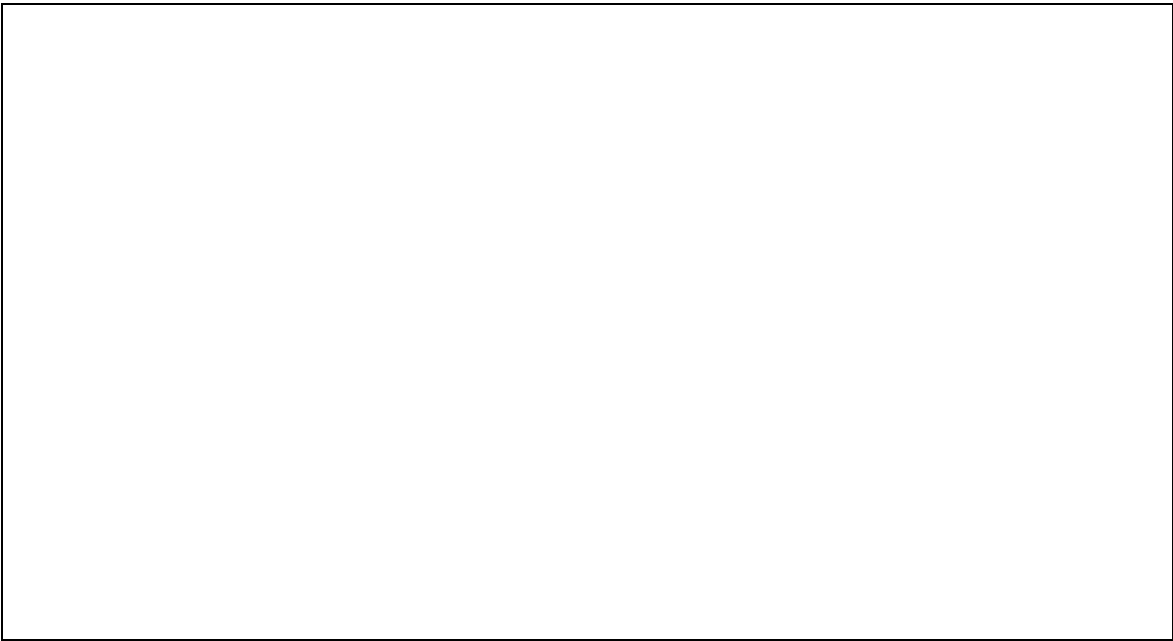


Figure III.12 Représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de Jute/Polyester.

III.2.4 Composite

Le signal de réponse vibratoire libre du composite hybride , reflète un comportement dynamique complexe influencé par la combinaison des matériaux et l'orientation des fibres. Pour les trois orientations analysées ° les signaux montrent des oscillations amorties typiques d'un système viscoélastique (Les figures III.13 a 16). L'analyse vibratoire du composite hybride Jute/V500/Polyester met en évidence des performances dynamiques élevées et stables, avec des fréquences naturelles supérieures à 2500 Hz pour toutes les orientations testées. Cette quasi-indépendance à l'orientation traduit un comportement proche de l'isotropie, attribué à l'action équilibrante du renfort synthétique V500, qui compense l'anisotropie intrinsèque des fibres de jute. Les configurations à ° présentent des fréquences de vibration particulièrement élevées, accompagnées de signaux bien définis et faiblement amortis, ce qui indique une rigidité renforcée. À l'inverse, l'orientation à 25° génère un signal de plus faible fréquence, avec une décroissance rapide, traduisant une structure plus souple et plus amortie. Cette adaptabilité des propriétés vibratoires en fonction de l'orientation, rendue possible par la combinaison des fibres naturelles et synthétiques, est un atout majeur pour concevoir des structures de bordures optimisées face aux sollicitations dynamiques réelles (voir Tableau 5).



Figure III.13 Signal de réponse vibratoire mesurée de composite Jute/V500/Polyester pour l'orientation 0/90.



Figure III.14 Signal de réponse vibratoire mesurée de composite Jute/V500/Polyester pour l'orientation 65°.



Figure III.15 Signal de réponse vibratoire mesurée de composite Jute/V500/Polyester pour l'orientation 25°.

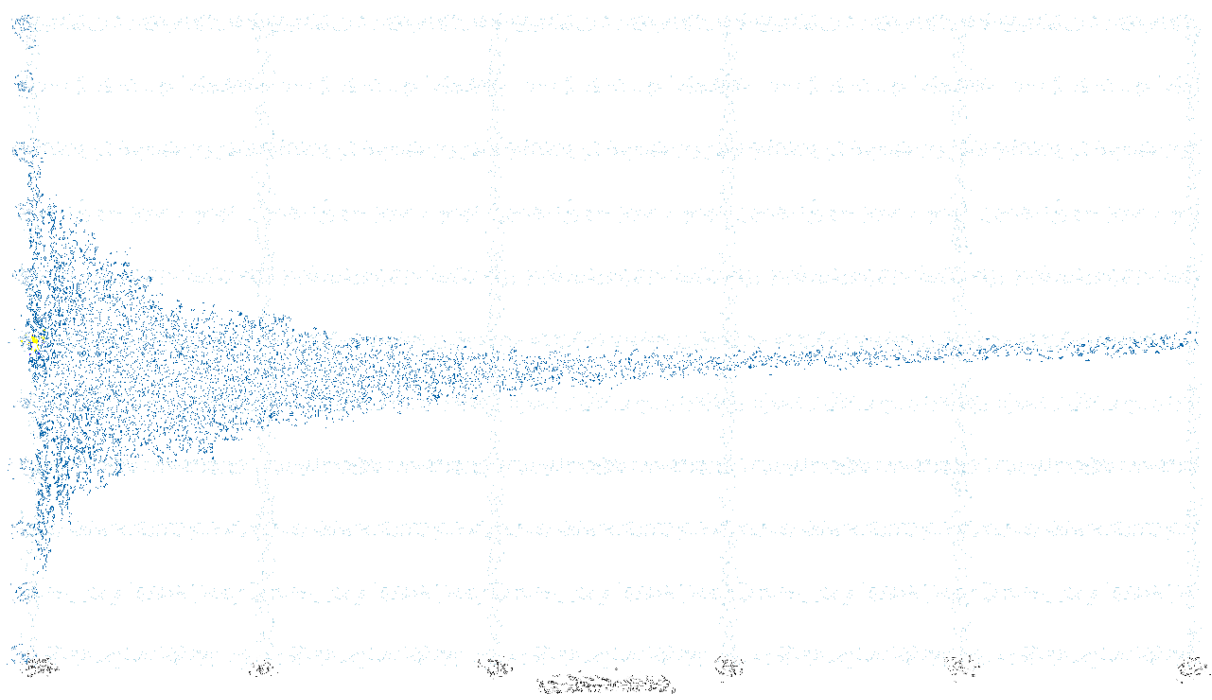


Figure III.16 Signal de réponse vibratoire mesurée de composite Jute/V500/Polyester pour l'orientation 45°.

Tableau III.5 Propriétés mécaniques expérimental de composite Jute/V500/Polyester.

JUTE/V500			Test 1	Test 2	Test 3	Valeur moyenne	Standard déviation
	0/90	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	25	Fréquence (Hz)					

		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	65	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					
	45	Fréquence (Hz)					
		Module d'élasticité, E (GPa)					
		Module de cisaillement, G (GPa)					
		Coefficient de Poisson, μ					

Le composite hybride **Jute/V500/Polyester** présente des propriétés mécaniques intermédiaires entre celles du jute pur et du composite V500, tout en affichant une amélioration notable en rigidité et stabilité par rapport aux deux matériaux pris séparément. Le module d'élasticité (E) est relativement homogène dans toutes les orientations, avec une moyenne allant de 28,44 GPa à 32,87 GPa. La valeur la plus élevée est observée à

l'orientation 25°, indiquant une rigidité légèrement supérieure dans cette configuration. Les autres orientations (0/90°, 45°, 65°) se situent autour de 28 à 29 GPa, traduisant une bonne stabilité mécanique quelle que soit la direction des fibres.

Le module de cisaillement (G) suit une tendance similaire, avec des valeurs moyennes comprises entre 10,87 GPa et 12,84 GPa. Ce niveau élevé de résistance au cisaillement démontre que l'association des fibres de jute et de la résine V500 permet de renforcer significativement la capacité du matériau à résister aux efforts de torsion, tout en maintenant une bonne souplesse directionnelle.

En ce qui concerne le coefficient de Poisson (μ), il reste globalement stable, autour de 0,30 dans presque toutes les configurations, sauf à 25°, où il est légèrement plus bas (0,2802). Ce comportement indique que le composite hybride présente une déformation latérale modérée et bien maîtrisée, ce qui contribue à sa performance globale en tenue mécanique (Figure 17).

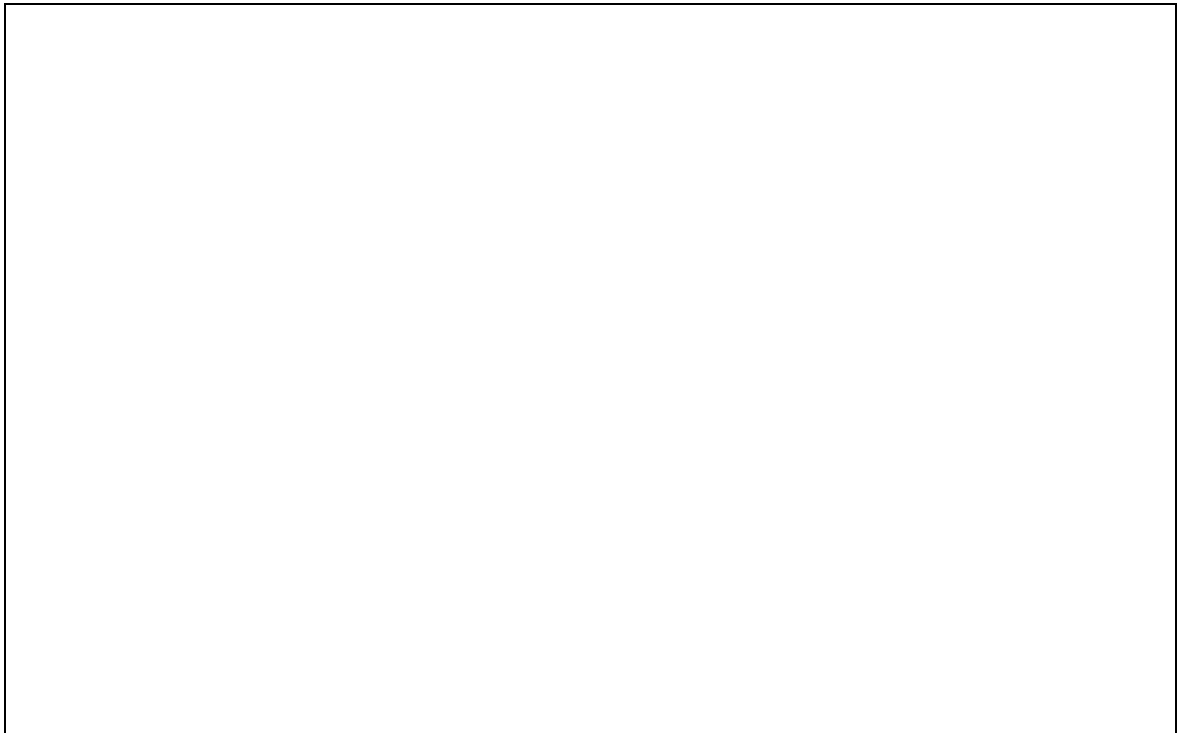


Figure III.17 Représentation graphique des propriétés mécaniques moyennes de Jute/V500/Polyester.

Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'influence significative de la nature des fibres de renforcement sur le comportement vibratoire des composites. En général, les composites à base de fibres naturelles, comme le jute, présentent des fréquences propres relativement faibles, traduisant une rigidité dynamique réduite. Cette caractéristique peut limiter leur usage dans des applications nécessitant une grande stabilité vibratoire. À l'inverse, l'incorporation de fibres synthétiques (comme le composite) ou l'utilisation de structures hybrides (comme) permet d'augmenter sensiblement les fréquences de résonance, ce qui traduit une amélioration notable de la rigidité et donc des performances mécaniques globales du matériau.

L'analyse comparative des propriétés mécaniques moyennes montre que la résine seule possède les caractéristiques les plus faibles, avec un module d'élasticité et un module de cisaillement bas, ainsi qu'un faible coefficient de Poisson. Ces propriétés en font un matériau peu adapté aux sollicitations mécaniques importantes, bien qu'il serve de matrice efficace dans les composites.

Le composite , composé de fibres synthétiques, présente une nette amélioration des propriétés mécaniques par rapport à la résine seule. Il affiche des modules d'élasticité et de cisaillement modérés et relativement stables, ce qui le rend adapté à des applications standards, où un bon compromis entre coût et performance est recherché.

Le composite en jute, quant à lui, se distingue par des performances particulièrement élevées à certaines orientations (°), en termes de rigidité. Toutefois, ces performances s'accompagnent d'une grande variabilité des résultats et d'un coefficient de Poisson élevé, indiquant des déformations latérales importantes. Cela peut poser des limites dans des conditions de charges complexes ou anisotropes.

Enfin, le composite hybride représente le meilleur compromis. Il combine les avantages des deux matériaux précédents : une rigidité élevée, une bonne résistance au cisaillement, et une stabilité mécanique renforcée. Son comportement vibratoire est également équilibré, ce qui en fait un excellent candidat pour des applications structurelles exigeantes, notamment dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique ou des équipements sportifs.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés mécaniques fondamentales de différents matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles, synthétiques et hybrides. L'objectif principal était de caractériser ces matériaux en termes de module d'élasticité (E), module de cisaillement (G) et coefficient de Poisson (μ), en utilisant une méthode d'analyse vibratoire non destructive conforme à la norme ASTM

Les résultats obtenus ont mis en évidence la grande variabilité des performances selon la nature des fibres utilisées et leur combinaison. Les composites à base de fibres naturelles, tels que la jute, présentent des propriétés mécaniques modestes mais un fort potentiel environnemental. À l'inverse, les fibres synthétiques, notamment la fibre de verre (), offrent de meilleures performances mécaniques.

Les composites hybrides ont montré un comportement très dépendant de la compatibilité entre les fibres. Le composite s'est révélé le plus performant, tirant parti à la fois de la rigidité de la fibre de verre et de la légèreté de la fibre naturelle. Cette étude démontre que le choix judicieux des fibres et leur bonne intégration dans la matrice polymère permettent d'optimiser les propriétés mécaniques des matériaux composites, tout en répondant aux exigences de durabilité et de performance imposées par les secteurs industriels modernes.

Conclusion général

L'étude menée a permis de mieux comprendre l'influence de la nature des fibres de renforcement sur les propriétés mécaniques des matériaux composites à matrice polymère, à travers une méthode vibratoire non destructive conforme à la norme ASTM . Cette approche s'est révélée efficace pour évaluer le module d'élasticité, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson des composites étudiés, tout en évitant les contraintes liées aux essais destructifs classiques.

Les résultats ont clairement montré que les performances mécaniques des composites varient significativement selon le type de fibres utilisées. Les composites à fibres naturelles, comme la jute, affichent des propriétés mécaniques plus faibles, mais présentent un intérêt environnemental certain. À l'inverse, les fibres synthétiques telles que la fibre de verre de type V500 offrent une rigidité et une résistance nettement supérieures.

L'hybridation des fibres s'est avéré une solution prometteuse, bien que son efficacité dépende fortement de la compatibilité entre les composants. Le composite s'est distingué comme le plus performant, démontrant une bonne synergie entre la rigidité de la fibre synthétique et la légèreté de la fibre naturelle.

En définitive, cette étude confirme que l'optimisation des matériaux composites passe par un choix raisonné des fibres de renforcement et une maîtrise des interactions entre composants. Elle montre également que la méthode vibratoire constitue un outil fiable et non destructif pour la caractérisation mécanique de ces matériaux. L'exploration plus poussée de différentes configurations hybrides, ainsi que l'intégration d'analyses complémentaires, pourrait permettre à l'avenir d'affiner encore les stratégies de conception de composites performants et durables.

Références

- [1] Behera, A. K., Avancha, S., Basak, R. K., Sen, R., & Adhikari, B. (2012). *Fabrication and characterizations of biodegradable jute reinforced soy based green composites*. Carbohydrate Polymers, 88, 329–335.
- [2] Gay, D. (1991). *Matériaux composites* (3e éd.). Hermès, Paris.
- [3] ISO 11827:2012. *Textiles — Essai de composition — Identification des fibres*.
- [4] SAA (2011). *Coton, lin, chanvre & co : tout savoir sur les fibres textiles végétales*. <https://www.ecoconso.be/...>
- [5] Couhert, C. (2007). *Pyrolyse flash à haute température de la biomasse lignocellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse* (Thèse de doctorat). École des Mines de Paris.
- [6] Wikipédia. *Jute (plante)*. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute>
- [7] Saaidia, A. (2018). *Étude de l'influence de la résine polyester sur le comportement mécanique du composite à renfort en fibre de jute*. Université de Guelma.
- [8] Mukherjee, P. S., & Satyanarayana, K. G. (1986). *Structure and properties of some vegetable fibres II. Pineapple fibre*. Journal of Materials Science, 21, 51–56.
- [9] Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). *Composite reinforced with cellulose based fibers*. Progress in Polymer Science, 24, 221–274.
- [10] Silva, F. de A., Chawla, N., & de Toledo Filho, R. D. (2008). *Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers*. Composites Science and Technology, 68, 3438–3443.
- [11] Mallick, P. K. (1993). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.
- [12] Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). *Flax fibre and its composites – A review*. Composites Part B: Engineering, 56, 296–317.
- [13] Baley, C. (2004). *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, Techniques de l'Ingénieur. [Référence : Bois, verre, céramique et textile].
- [14] Semoune, M. L. (2013). *Étude des fibres végétales et de leurs composites : avantages et limites*. Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger.
- [15] Sadvov, F., Korshagin, M., & Matetsky, A. (1978). *Chemical technology of fibrous materials*.
- [15] Ofomaja, A. E., & Naidoo, E. B. (2011). *Biosorption of copper from aqueous solution by chemically activated Pinecone: A kinetic study*. Chemical Engineering Journal, 175, 260–270.

- [16] Fung, J. C. M. (2009). *A new composite material consisting of flax fibers, recycled tire rubber and thermoplastic* (Thesis).
- [17] Yanjun, X., Qinglin, W., & Yong, L. Y. (2010). *Creep behavior of Bagasse fiber reinforced polymer composites*. *Bioresource Technology*, 101, 3280–3286.
- [18] La Rosa, A. D., & Recca, G. (2001). New composite materials for sports applications: Natural fibre-reinforced composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1–3), 364–370.
- [19] Khan, F., & Ahmad, S. R. (1996). *Chemical modification and spectroscopic analysis of jute fibre*. *Polymer Degradation and Stability*, 52, 335–340.
- [20] Saxena, S., Chen, J., & Dibble, R. (2011). *Maximizing Power Output in an Automotive Scale Multi-Cylinder Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine*. SAE Technical Paper 2011-01-0907. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0907>
- [21] Freepik – *Photos/Vecteurs libres sur les matériaux composites*. <https://fr.freepik.com/photos-vecteurs-libre/materiau-composite>
- [22] Mediabask – *Polyola surfe sur la vague composite*. [https://www.mediabask.eus/...](https://www.mediabask.eus/)
- [23] Merzoug, A., Bouhamida, B., Sereir, Z., Bezazi, A., Kilic, A., & Candan, Z. (2022). *Performances mécaniques et thermiques quasi-statiques et dynamiques des composites hybrides palmier dattier/fibre de verre*. *Journal of Industrial Textiles*, 51(5S), 7599S–7621S.
- [24] Muhammad Rizal, Mubarak, A. Z., Razali, A., & Asyraf, M. (2019). *Caractéristiques de vibration libre d'un composite renforcé de fibres de jute pour la détermination des propriétés du matériau : études numériques et expérimentales*. *AIP Conference Proceedings*, 2187, 050020.
- [25] Botelho, A. N., Campos, E., de Barros, L. C., Pardini, M. C., & Rezende, M. C. (2006). *Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method*. *Composites Part B*, 37, 255–263.
- [26] Senthilrajan, S., & Venkateshwaran, N. (2019). *Ageing and its influence on vibration characteristics of jute/polyester composites*. *Journal of Polymers and the Environment*.