

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



Mémoire de fin d'étude
Présenté par : GUEBAILIA MOUNIR
Master
Option : Construction Mécanique

**Elaboration de matériaux composites et détermination de leurs propriétés
élastiques par une méthode non destructives**

Sous la Direction de :
Pr : Abderrezak BEZAZI

24 Juin 2025

Dédicaces

*À la mémoire de mon père et de ma sœur,
Que je n'oublie jamais, et dont le souvenir m'inspire et me donne la force
d'avancer.*

*À ma chère mère,
Pour son amour inconditionnel, ses prières et son soutien indéfectible tout au
long de mon parcours.*

*À mes enfants, Takï et Kossay,
Source de ma joie et de ma motivation au quotidien.*

*À mon ami fidèle Chokri,
Pour sa présence constante et son amitié sincère.*

*À mes chers amis Akram et Mounder,
Pour leur soutien, leur bonne humeur et leurs encouragements.*

Merci à vous tous, de faire partie de ma vie et de ce chemin.

Remerciement

Ce présent travail est le fruit de longues années d'études et d'efforts constants. À cet effet, je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants qui ont su nous transmettre leur savoir et nous accompagner tout au long de notre parcours.

Je remercie tout particulièrement **Monsieur le Professeur Abderrezak BEZAZI**, notre promoteur, pour sa disponibilité, ses orientations pertinentes, son encadrement rigoureux ainsi que ses précieux conseils qui ont grandement contribué à la réalisation de ce projet.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux **membres du jury** qui ont accepté d'évaluer ce travail de fin d'études avec bienveillance et professionnalisme.

Je tiens à adresser ma reconnaissance à **Madame FERIQUI**, cheffe du département de Génie Mécanique, pour son soutien et sa confiance, ainsi qu'à **Monsieur GUENDOUZE Abdellah** pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Je remercie également l'ensemble du **personnel du laboratoire de Génie Mécanique** pour leur accueil, leur assistance technique et leur collaboration tout au long de cette recherche.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Résumé

Le marché des fibres naturelles utilisées comme renfort dans les matériaux composites connaît une forte croissance, estimée entre 10 et 15 % par an, portée par l'intérêt croissant pour des solutions écologiques et durables. Les fibres végétales telles que le lin, le chanvre, le jute ou le sisal sont de plus en plus utilisées comme alternatives aux fibres synthétiques notamment la fibre de verre, surtout dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, des infrastructures et du sport. Bien que les fibres synthétiques dominent encore en raison de leurs excellentes performances mécaniques, leur impact environnemental soulève de nombreuses préoccupations. Dans ce contexte, une approche hybride, combinant fibres naturelles et synthétiques, émerge comme une solution prometteuse permettant de concilier performance et durabilité. L'objectif principal de ce travail est donc de concevoir des matériaux composites, de maîtriser leur processus de fabrication, puis d'évaluer leurs caractéristiques mécaniques à l'aide d'une méthode non destructive. Quatre types de matériaux ont été élaborés : une résine pure, ainsi que trois composites stratifiés renforcés respectivement par des fibres de verre V300, des fibres de jute naturelles et un renfort hybride Jute/V300. Les tests sur les composites élaborés ont été réalisés par une méthode non destructive, en particulier à l'aide de la technique d'excitation impulsionnelle conforme à la norme ASTM E1876 01. Cette méthode permet de déterminer les propriétés mécaniques en domaine élastique, à savoir le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ). Ces approches sont particulièrement adaptées à la caractérisation des matériaux innovants, ainsi qu'à la surveillance de l'intégrité des structures en service. Les résultats obtenus, présentés sous forme de tableaux et de graphiques, permettent d'analyser l'influence de la composition et de la structure interne sur les performances dynamiques des composites, en vue d'applications structurelles à l'échelle industrielle.

Mots-Clés *Fibres naturelles , Fibres de verre , Composites hybrides, Matériaux composites , Méthode non destructive*

Abstract

The market for natural fibers used as reinforcement in composite materials is experiencing strong growth, estimated between 10 and 15% per year, driven by the increasing demand for ecological and sustainable solutions. Plant-based fibers such as flax, hemp, jute, and sisal are increasingly being used as environmentally friendly alternatives to synthetic fibers, particularly glass fiber, especially in sectors such as automotive, aerospace, infrastructure, and sports. Although synthetic fibers still dominate due to their excellent mechanical performance, their environmental impact raises significant concerns. In this context, a hybrid approach combining natural and synthetic fibers is emerging as a promising solution to balance performance with sustainability. The main objective of this work is to design composite materials, master their manufacturing process, and evaluate their mechanical properties using a non-destructive method. Four types of materials were developed: pure resin, and three laminated composites reinforced respectively with V300 glass fibers, natural jute fibers, and a hybrid reinforcement of Jute/V300. The composites were tested using a non-destructive method, specifically the impulse excitation technique, in accordance with ASTM E1876-01. This method allows for the determination of mechanical properties in the elastic domain, namely Young's modulus (E), shear modulus (G), and Poisson's ratio (μ). These approaches are particularly well-suited for the characterization of innovative materials and for monitoring the integrity of structures in service. The results, presented in the form of tables and graphs, provide insight into the influence of composition and internal structure on the dynamic performance of the composites, with a view toward structural applications at the industrial scale.

ملخص

يشهد سوق الألياف الطبيعية المستخدمة كدعائم في المواد المركبة نموًا قويًا يُقدَّر ما بين 10% و15% سنويًا، وذلك بفضل الاهتمام المتزايد بالحلول البيئية والمستدامة. تُستخدم الألياف النباتية مثل الكتان، والقنب، والجوت، والسيزال بشكل متزايد كبديل صديقة للبيئة للألياف الصناعية، وخاصة ألياف الزجاج، وخصوصًا في قطاعات السيارات، والطيران، والبنى التحتية، والرياضة. وعلى الرغم من أن الألياف الصناعية لا تزال مهيمنة بفضل أدائها الميكانيكي الممتاز، إلا أن تأثيرها البيئي يثير العديد من المخاوف. وفي هذا السياق، تبرز المقاربة الهجينة، التي تجمع بين الألياف الطبيعية والصناعية، كحل واعد يهدف إلى التوفيق بين الأداء والاستدامة. يهدف هذا العمل أساسًا إلى تصميم مواد مركبة، والتحكم في عملية تصنيعها، ثم تقييم خصائصها الميكانيكية باستخدام طريقة لا إتلافية. تم إعداد أربعة أنواع من المواد: راتنج خالص، وثلاث مواد مركبة مصفحة مدعّمة على التوالي بألياف زجاج V300، وألياف جوت طبيعية، وتقوية هجينة من جوت V300/تم إجراء الاختبارات على هذه المواد المركبة باستخدام طريقة لا إتلافية، وتحديدًا عبر تقنية الإثارة بالنبض، وفقًا للمعيار ASTM E1876-01. تتيح هذه الطريقة تحديد الخصائص الميكانيكية ضمن المجال المرن، مثل معامل المرونة (E)، ومعامل القص (G)، ومعامل بواسون (μ). تُعدّ هذه المنهجيات ملائمة بشكل خاص لتوصيف المواد المبتكرة، وكذلك لمراقبة سلامة الهياكل أثناء الخدمة. وقد أتاحت النتائج، التي تم عرضها في شكل جداول ورسوم بيانية، تحليل تأثير التركيب والبنية الداخلية على الأداء الديناميكي للمواد المركبة، تمهيدًا لاستخدامها في تطبيقات هيكلية على المستوى الصناعي.

Index des figures

Figure	Chapitre I : Etude bibliographique	Page
I.1	Matériau composite [BER 10].	18
I.2	Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales et les fibres synthétiques et hybrid.	19
I.3	Quelques plantes, origine des fibres utilisées comme renfort dans les matériaux composites [AZI 18].	20
I.4	La plante de jute.	21
I.5	Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétale.	22
I.6	Extraction des fibres de jute : a) rouissage, b) lavage.	23
I.7	Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le domaine d'automobile.	26
I.8	Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le secteur de construction.	27
I.9	Autres applications des matériaux composites à base de fibres naturelles : a) Eolienne et b) planches de surf	27
I.10	Photos de verre impacté et de composites hybrides à différents niveaux d'énergie	32
I.11	Photos de composites de fibres naturelles impactées à différents niveaux d'énergie (20–50 J).	33
I.11	Zones de dommages causés par les impacts sur le verre et les composites hybrides à différents niveaux d'énergie.	33
I.12	La courbe contrainte-déformation composite.	33
I.13	La résistance à la flexion des composites.	34
I.14	Résistance aux chocs des composites électroniques.	36
I.15	Elastomère très amortissant, Valeur absolue du module d'Young complexe (a) et facteur de perte $\eta (= \tan\delta)$ (b).	37
I.16	Module de cisaillement G^* , module d'Young E^* et coefficient de Poisson évalués sur un polyamide.	37
I.17	Fonction typique fréquence/réponse pour un essai d'impulsion d'un échantillon composite.	38
I.18	Fonction typique temporelle impulsion/réponse pour un essai d'impulsion sur un échantillon composite.	39

I.19	Comparaison des fréquences modales des panneaux composites de fermeture de capot automobile collés avec et sans dommage de décollement induit par un accident.	41
	Chapitre II : Application de la norme ASTM E1876-01 à l'analyse dynamique des composites.	
II.1	(a) Rouleau de tissu de fibre de Verre de densité 500 g/m ² et (b) Tissu de fibre de verre. Mat haché.	44
II.2	(a) Rouleau de tissu de fibre de jute de densité 300 g/m ² / (b) tissus perforé (c) tissus d'arrachage.	44
II.3	(A) La plante de jute, (B) Transport de fibres de jute sous forme de bottes.	45
II.4	Matériaux de base pour fabrication de composites.	46
II.5	Préparation de fibres de Jute, Mat, Verre 300, Verre 500, et Tissu d'arrachage après découpe.	47
II.6	Préparation d'une plaque de matériau composite de la fibre de Jute. + fibre de verre 300.	48
II.7	Préparation d'une plaque de matériau composite de la fibre de Jute. + fibre de verre 500.	49
II.8	Préparation de matériau composite de fibre de verre 500+fibre de verre.300.	50
II.9	Préparation de matériau composite de Résine seule.	51
II.10	Plaques de composites déferents : (A) Plaques composites 500 mat Et (B) plaque composite 300 mat (C) plaque composite jute mat (D) plaque en résine.	51
II.11	Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques biocomposites en éprouvettes.	52
II.12	Eprouvettes utilisées en flexion : (a) Jute /V300, (b) jute avec capteurs, (c) Résine.	52
II.13	Le capteur et matériel utilisé pour le collage.	53
II.14	(A) Impacteur utilisé pour l'excitation vibratoire des plaques composites (B) Appareil du <i>PicoScope</i> .	55
II.12	Mesures expérimentales effectuées.	55
	Chapitre III : Résultats et discussion	63
III.1	Schéma fonctionnel d'un appareil de teste typique.	62
III.2	Diagramme d'un impulsionneur typique pour petits échantillons.	62
III.3	Le signale de réponse vibratoire mesurée pour échantillon en résine.	65

III.4	Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne de la Résine.	66
III.5	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon V300 pour la bordure.0/90.	67
III.6	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon V300 pour L'orientation 65°.	68
III.7	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon V300 pour L'orientation 25°.	68
III.8	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon V300 pour L'orientation 45°.	69
III.9	Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne de matériau V300.	70
III.10	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour la bordure.0/90.	70
III.11	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation jute 65°.	71
III.12	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation 25°.	71
III.13	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation jute 45°.	72
III.14	Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne de Jute.	73
III.15	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon de JUTE/V300 pour la bordure 0/90.	74
III.16	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 25°.	74
III.17	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 45°.	75
III.18	Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 65°.	75
III.19	Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne de l'hybride Jute/V300.	76

Index des tableaux

Tableau	Chapitre I : Etude bibliographique	Page
I.1	Composition chimique de quelques fibres végétales.	24
I.2	Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales.	24
I.3	Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales.	25
I.4	Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales.	25
I.5	Propriétés des tissus.	28
I.5.1	Études expérimentales majeures	29
I.6	Séquences d'empilement et propriétés des stratifiés composites élaborés.	30
I.7	Propriétés d'impact des stratifiés composites.	31
I.8	Les propriétés d'interface des stratifiés composites.	35
I.9	Bambou, Jute, et Fibre de verre.	41
	Chapitre II : Application de la norme ASTM E1876-01 à l'analyse dynamique des composites.	
	Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1	Les dimensions et la masse des éprouvettes testés.	65
III.2	Fréquences de résonance en flexion d'éprouvettes en résine.	66
III.3	La fréquence de résonance en flexion d'un matériau V300.	69
III.4	La fréquence de résonance en flexion d'un matériau jute.	73
III.5	La fréquence de résonance en flexion d'un matériau JUTE/V300.	77

Sommaire

Chapitre I : Etude bibliographique.

I.1 Introduction	17
I.2 Généralités sur les matériaux composite	17
I.3 Les constituants des matériaux composites	18
I.3.1 La matrice	18
I.3.2 Types de matériaux composites	18
I.3.3 Le renfort	19
I.3.4 Fibre naturelle	20
I.3.5 Présentations de quelques fibres végétales	21
I.3.6 Morphologie de la plante de jute	21
I.3.6 1. Fibre de jute	22
I.3.6 2. Extraction de la fibre de jute	22
I.3.7 Structure et morphologie de la fibre végétale	24
I.3.7.1 La fibre végétale	24
I.3.8 Propriétés usuelles des fibres végétales	24
I.3.8.1 Propriétés physiques	24
I.3.8.2 Propriétés mécaniques	25
I.3.8.3 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales et des fibres de verres	25
I.4 Applications des fibres naturelles	26
I.5 Etat de l'art sur les travaux réalisés sur les composites en fibres végétales	28
I.6 Conclusion	28

Chapitre II : Application de la norme ASTM E1876-01 à l'analyse dynamique des composites.

II.1 Introduction	45
II.2 Matériaux utilisés	45
II.2.1 Tissu en fibres de jute	45
II.2.2 Tissu en fibres de verre	47
II.2.3 La matrice (résine polyester)	48
II.3 Protocole de préparation des plaques composites et découpe des éprouvettes	48
II.3.1 Elaboration des biocomposites	48
II.3.2 Elaboration des biocomposites	48
II.3.3 Préparation du renfort	49
II.3.4 Étapes de préparation d'une plaque biocomposite	49
II.3.5 Moulage sous vide	49
II.3.6 Découpe des plaques composites en éprouvettes	52

Sommaire

II.3.7 Capteur et son collage	54
II.4 Protocole expérimental	55
II.4.1 Norme utilisée	55
II.4.2 Méthodologie et expérience	57
II.5 Conclusion	58
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1 Introduction	60
III.1.1 Objet de la méthode ASTM E1876 01	60
III.1.2 Application à d'autres températures	61
III.1.3 Normes associées	61
III.2 Principe de la Méthode	61
III.3 Portée et Avantages de la Méthode	62
III.3.1 Types de géométries	62
III.3.2 Avantages comparatifs	62
III.3.3 Utilisation en contrôle qualité	62
III.4. Adaptation et limites de la méthode	62
III.4.1 Influence de l'environnement	62
III.4.2 Application aux matériaux composites ou hétérogènes	62
III.5 Analyse et Interprétation des Résultats	63
III.5.1 Principe de la méthode	63
III.5.2 Comportement élastique	63
III.5.3 Vibrations et modes	63
III.5.4 Mise en œuvre expérimentale	63
III.5.5 Points clés	64
III.5.6 Appareillage	65
III.5.7 Spécifications géométriques des échantillons	65
III.5.8 Procédure expérimentale	65
III.5.9 Précautions et limitations	66
III.6 Discussion des Résultats	66
III.6.1 Résine seule	67
III.6.2 Matériau V300	68
III.6.3 Discussion sur la fréquence et le spectre – Matériau V300	69
III.6.4 Matériau JUTE	72

Sommaire

III.6.5 Matériau composite JUTE/V300	76
III.7 Analyse comparative (description graphique)	79
III.7.1 Module d'élasticité (E)	79
III.7.2 Module de rigidité (G)	80
III.7.3 Coefficient de Poisson (μ)	80
III.7.4 Conclusion synthétique	80
III.8 Conclusion	80
III.9 Références Bibliographiques	83
III.9 Références Bibliographiques	84

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

Dans un contexte industriel en constante évolution, la recherche de matériaux alliant performance mécanique, légèreté et durabilité est devenue une priorité majeure dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire ou encore le génie civil. C'est dans cette dynamique que s'inscrit le développement des matériaux composites, qui offrent des propriétés mécaniques supérieures à celles des matériaux conventionnels, tout en permettant une réduction significative du poids des structures.

Les matériaux composites, constitués d'un renfort (fibres, particules) et d'une matrice (polymère, métallique ou céramique), présentent des comportements mécaniques anisotropes et complexes, dont la caractérisation constitue un enjeu central pour la conception et la fiabilité des composants industriels. Ainsi, il devient essentiel de disposer de méthodes d'analyse fiables, précises et non invasives pour évaluer leurs propriétés mécaniques.

Dans ce contexte, les méthodes d'essai non destructives (END) apparaissent comme des outils de choix. Parmi elles, les techniques basées sur la mesure des fréquences de résonance permettent d'accéder aux propriétés élastiques dynamiques (module d'Young, module de cisaillement, coefficient de Poisson) sans endommager les échantillons testés. Ces approches sont particulièrement adaptées à la caractérisation de matériaux innovants ou à la surveillance de l'intégrité des structures en service.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette thématique et porte sur deux volets complémentaires :

- L'élaboration de matériaux composites stratifiés renforcés par des fibres de verre, de jute et hybride verre/jute, en mettant l'accent sur les choix des composants, les procédés de fabrication, et les paramètres influençant les performances mécaniques notamment l'orientation des fibres ;
- La détermination de leurs propriétés élastiques par une méthode non destructive, notamment à travers la technique d'excitation impulsionnelle basée sur la norme ASTM E1876.

L'objectif principal de ce travail est donc de concevoir des matériaux composites, de maîtriser leur processus de fabrication, puis d'évaluer leurs caractéristiques mécaniques par une approche non destructive, tout en comparant les résultats obtenus, dans la mesure du possible, à des données de référence ou à des mesures issues de méthodes conventionnelles.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente un état de l'art sur les matériaux composites et les méthodes de caractérisation mécanique.
 - Le deuxième chapitre décrit la méthodologie d'élaboration des composites testés.
 - Le troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre de la méthode d'analyse non destructive et à l'interprétation des résultats.
 - Enfin, une conclusion générale synthétise les apports de l'étude ce qui permet d'ouvrir la voie à d'autres travaux dans ce domaine.

Chapitre I
Etude bibliographique

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction

Le marché des fibres naturelles pour les matériaux composites est en pleine expansion, avec une croissance annuelle de 10 à 15 %. Les fibres végétales telles que le sisal, le lin, le jute et le chanvre sont utilisées comme renfort dans ces composites, représentant une alternative durable et biodégradable aux fibres synthétiques, notamment la fibre de verre. Ces fibres naturelles, légères, peu coûteuses et issues de ressources renouvelables, suscitent l'intérêt de nombreux secteurs industriels comme l'automobile, les infrastructures, l'aéronautique et le sport.

En parallèle, les fibres synthétiques telles que la fibre de verre, la fibre de carbone et le Kevlar continuent de dominer le marché des composites hautes performances, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, leur résistance à la fatigue et leur durabilité. Toutefois, leur impact environnemental, leur coût de production et leur non-biodégradabilité posent des défis en matière de durabilité.

Pour combiner les avantages des deux types de fibres, l'approche hybride — consistant à associer fibres naturelles et fibres synthétiques dans une même matrice — émerge comme une solution prometteuse, visant à optimiser les performances mécaniques tout en réduisant l'empreinte écologique.

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles, synthétiques (verre, carbone, Kevlar) et hybrides, ainsi que sur leur comportement structurel. La deuxième partie est un état de l'art consacrée aux recherches récentes sur les fibres végétales, en particulier le jute, et sur les biocomposites.

I.2 Généralités sur les matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage de matériaux non miscibles (Figure I.1), créant des propriétés supérieures à celles de chaque élément pris séparément. Par exemple, l'ajout de fibres à une résine polymère améliore ses propriétés mécaniques, thermiques et sa stabilité dimensionnelle. Un composite est composé de deux éléments principaux : le renfort, qui assure la résistance mécanique, et la matrice, qui assure la cohésion. Les propriétés du composite dépendent de la nature des matériaux, de la géométrie du renfort et du processus de fabrication [1].

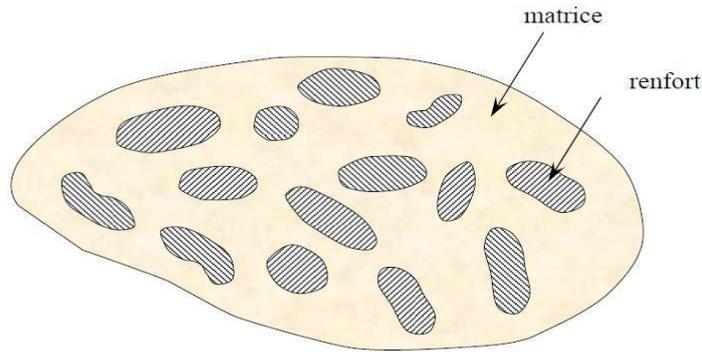


Figure I.1 : Matériau composite [1].

I.3 Les constituants des matériaux composites

Dans les matériaux composites sont essentiels pour leurs performances, comme la rigidité et la résistance à la rupture. Ils doivent posséder des caractéristiques mécaniques élevées, une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec la résine, une facilité de mise en œuvre et un coût réduit. La concentration du renfort, mesurée par la fraction volumique ou massique, influence les propriétés du composite, généralement entre 0,3 et 0,7. L'anisotropie du composite dépend de l'orientation des fibres, et une distribution homogène des renforts améliore la résistance en évitant la rupture dans les zones pauvres en renfort [1].

I.3.1 La matrice

Souvent constituée de résine mélangée à des charges pour améliorer ses caractéristiques, sert de lien entre les fibres et assure la transmission des sollicitations. Elle protège les fibres contre les agents extérieurs et conditionne la tenue thermique et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire. Les résines doivent être déformables, compatibles avec les fibres et de faible masse volumique. Il existe deux familles de résines : thermoplastiques et thermodurcissables [1].

I.3.2 Types de matériaux composites

Composites se classent en trois types : à fibres longues (fibres continues), à fibres courtes (fibres discontinues orienté aléatoirement) et à renfort tissé (fibres tissées dans deux directions perpendiculaires) [2]. Les fibres naturelles, composées principalement de cellulose, proviennent de plantes : fibres libériennes, extraites des tiges comme le lin et le chanvre, ou des feuilles comme le sisal, des animaux : cheveux, plumes, laine ou des minerais.

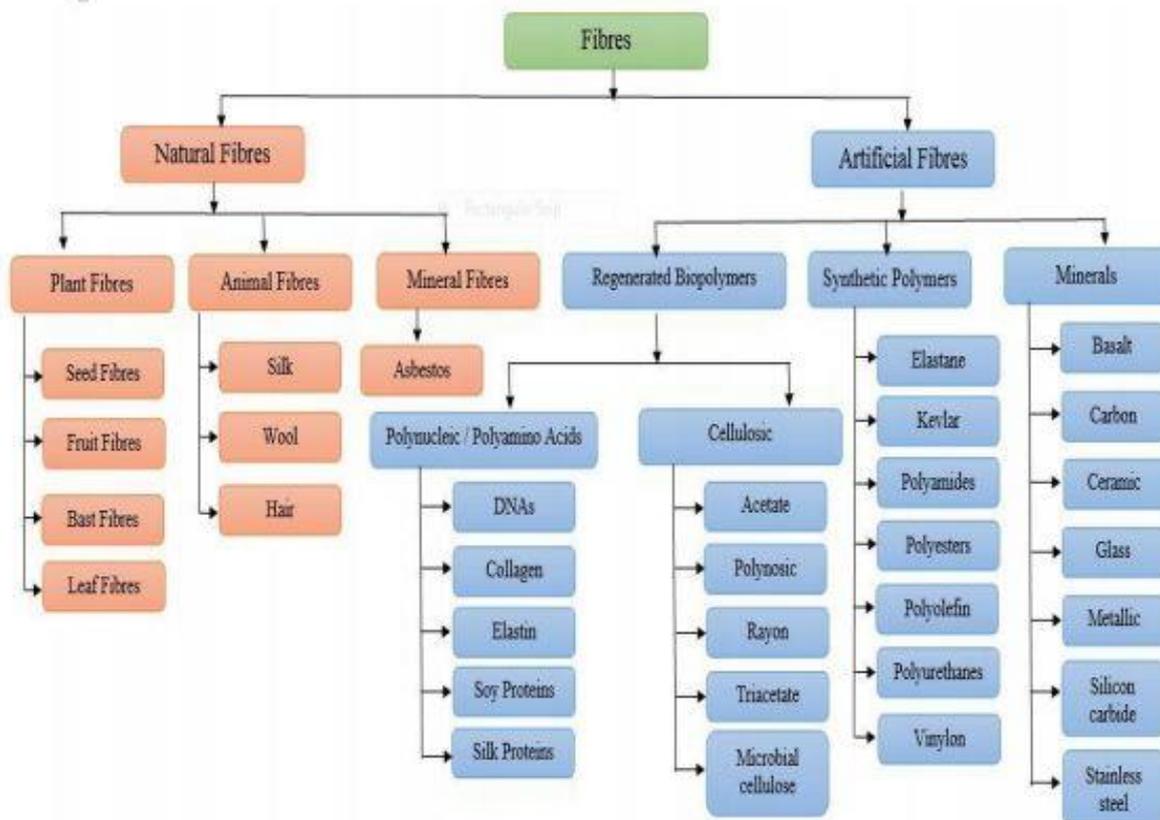


Figure I.2 : Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales et les fibres synthétiques et hybrid [2].

1.3.3 Renfort dans les matériaux composites

Les renforts représentent les éléments porteurs fondamentaux des matériaux composites. Ils sont à l'origine de leurs performances élevées, notamment en matière de rigidité et de résistance à la rupture.

Pour être pleinement efficaces, les renforts doivent répondre à plusieurs critères essentiels : de bonnes propriétés mécaniques, une faible masse volumique, une compatibilité chimique avec la matrice (généralement une résine), une facilité de mise en œuvre ainsi qu'un coût raisonnable. La concentration en renforts dans le composite joue un rôle déterminant sur les propriétés finales du matériau. Cette concentration est généralement exprimée en fraction volumique ou massique, avec des valeurs typiquement comprises entre 0,3 et 0,7.

L'un des aspects fondamentaux des matériaux composites est leur anisotropie, particulièrement marquée lorsque les renforts sont sous forme de fibres. L'orientation de ces fibres a une influence majeure sur les propriétés mécaniques dans les différentes directions du matériau. En plus de la concentration et de l'orientation, la distribution spatiale des renforts au sein de la matrice est également un facteur clé. Une répartition homogène favorise une bonne uniformité des propriétés, tandis qu'une distribution irrégulière peut entraîner l'apparition de

zones appauvries en renfort, souvent à l'origine d'amorces de fissures, réduisant ainsi la résistance globale du composite.

1.3.4 Fibre naturelle

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).



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

Les fibres végétales jouent un rôle crucial dans la fabrication des composites en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur origine renouvelable. Plusieurs types de fibres végétales sont utilisées dans ce domaine, chacune ayant des caractéristiques particulières.

1.3.5 Présentations de quelques fibres végétales

Les fibres végétales constituent une alternative écologique et performante aux fibres synthétiques dans la fabrication de composites. Parmi elles, les fibres de chanvre, extraites du *Cannabis sativa*, se distinguent par leur bonne compatibilité avec les matrices polypropylène et leur recyclabilité, tandis que les fibres de lin, dotées d'un module d'élasticité supérieur à celui du verre, offrent d'excellentes performances mécaniques. Le kénaf, bien que principalement utilisé dans l'industrie papetière, commence à être intégré dans les composites grâce à ses fibres courtes mais robustes. Les fibres de sisal, issues de l'*Agave sisalana*, sont adaptées aux environnements arides et appréciées pour leur résistance mécanique. De même, la ramie (*Boehmeria nivea*), après mercerisation, renforce les composites malgré une baisse de son module d'élasticité. Les fibres d'abaca, longues et résistantes, sont souvent associées à des polymères comme le PLA ou le polypropylène pour des applications industrielles. Les fibres de coco, riches en composants aliphatiques, assurent une bonne liaison fibre/matrice, bien qu'un traitement soit nécessaire pour certains polymères. Plus artisanales, les fibres de raphia et de doum, extraites de palmiers africains, sont utilisées pour la fabrication de paniers, nattes et objets décoratifs, grâce à leur finesse et leur robustesse. Enfin, le jute, bien qu'assez rigide à

cause de sa forte teneur en lignine, peut être amélioré par traitement chimique, ce qui en fait une fibre prometteuse pour les composites, notamment en Algérie où elle est étudiée pour la production de plaques stratifiées. Ces fibres naturelles, biodégradables, économiques et disponibles localement, suscitent un intérêt croissant dans le domaine des matériaux composites.

1.3.6 Morphologie de la plante de jute

La plante de jute, connue pour sa fibre à l'aspect soyeux et surnommée « fibre d'or », est une culture annuelle qui met environ 120 jours pour atteindre sa maturité. Elle pousse principalement dans les régions tropicales, à faible altitude, et préfère un taux d'humidité compris entre 60 % et 90 %. Le jute est une plante peu exigeante en engrais et en pesticides, ce qui en fait une culture respectueuse de l'environnement. Avec un rendement d'environ deux tonnes de fibres sèches par hectare, le jute est l'une des fibres naturelles les moins coûteuses. Elle se classe juste derrière le coton en termes de volume de production et de diversité d'utilisations [4].



Figure. I.4: La plante de jute [4].

1.3.6.1. Fibre de jute

La fibre de jute est longue, douce et brillante, avec une longueur variante entre 1 et 4 mètres et un diamètre compris entre 17 et 20 microns. Elle est principalement constituée de cellulose végétale et de lignine, les deux composants majeurs des fibres naturelles. Outre sa biodégradabilité et sa facilité de recyclage, la fibre de jute est respectueuse de l'environnement. On estime qu'un hectare de jute absorbe environ 15 tonnes de dioxyde de carbone et libère 11 tonnes d'oxygène. La rotation des cultures de jute contribue également à améliorer la fertilité des sols, ce qui est bénéfique pour les cultures suivantes. En cas d'incinération, le jute ne dégage pas de gaz toxiques, ce qui renforce son caractère écologique. Traditionnellement utilisée dans la fabrication de sacs, la fibre de jute est également employée dans divers produits tels que les toiles pour mottes destinées à la plantation d'arbres, ou encore dans les géotextiles pour la lutte

contre l'érosion. Ces applications profitent de la biodégradabilité naturelle du jute, une propriété souvent incompatible avec les matériaux synthétiques [5].

1.3.6 2. Extraction de la fibre de jute

L'extraction des fibres de jute s'effectue généralement par des méthodes manuelles, en raison du mode de culture à petite échelle, principalement pratiqué dans les pays en développement. La récolte des fibres est réalisée manuellement, la mécanisation étant souvent inadaptée aux conditions locales. Une fois les tiges de jute fauchées et débarrassées de leurs feuilles, elles sont regroupées en faisceaux. Vient ensuite l'étape du rouissage, qui consiste à immerger ces faisceaux dans l'eau afin de libérer les fibres des substances mucilagineuses, notamment la pectine. Ce processus dure généralement entre une et trois semaines, selon les conditions climatiques et la qualité de l'eau. Une fois le rouissage terminé, les fibres sont extraites à la main, puis lavées soigneusement et séchées à l'air libre pour être prêtes à l'utilisation.

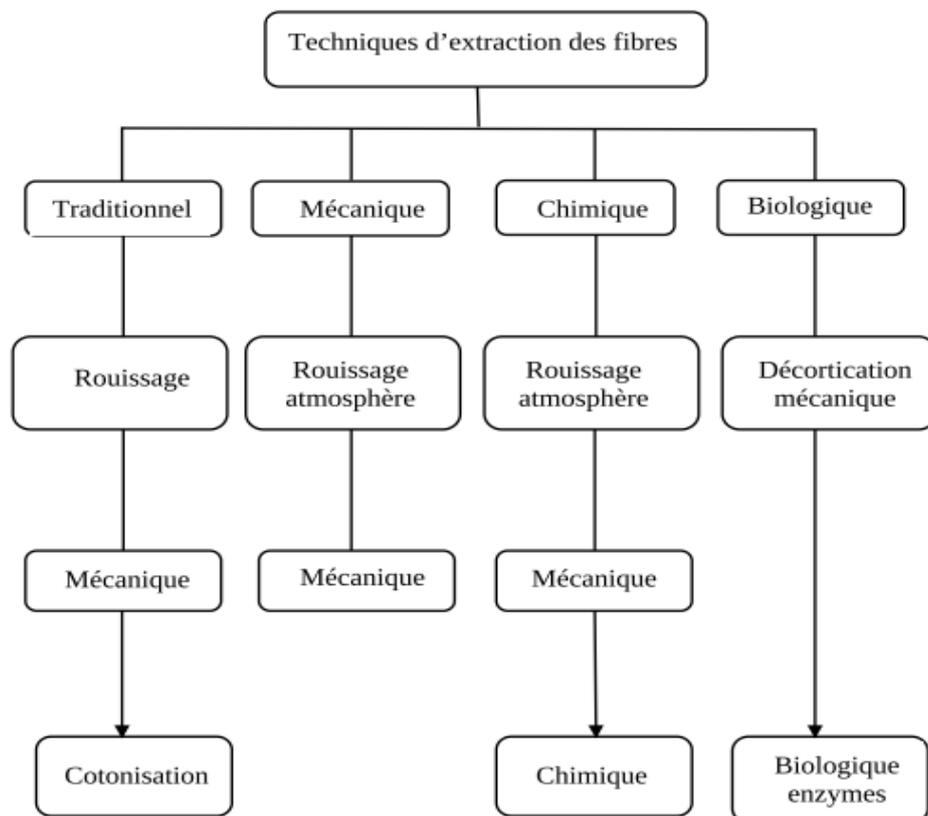


Figure I.5 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétale [4]



Figure I.6: a) Extraction des fibres de jute : rouissage, b) lavage [4].

1.3.7 Structure et morphologie de la fibre végétale

1.3.7.1 La fibre végétale

La fibre végétale est composée de plusieurs couches concentriques qui lui confèrent ses propriétés mécaniques.

Tableau I.1 : Composition chimique de quelques fibres végétales [6].

Composantes (%)	Coton	Jute	Lin	Ramie	Sisal	Bois
Cellulose	82,7	64,4	64,1	68,6	65,8	40 – 50
Hémicellulose	5,7	12	16,7	13,1	12	25 – 40
Pectine	5,7	0,2	1,8	1,9	0,8	-
Lignine	-	11,8	2	0,6	9,9	15 – 35
Cires	0,6	0,5	1,5	0,3	0,3	-
Eau	11	11	1	13,9	15,5	11,2

1.3.8 Propriétés usuelles des fibres végétales

1.3.8.1 Propriétés physiques

En général les fibres végétales sont caractérisées 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.2 : Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales [7].

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

La variabilité des paramètres géométrique comme la longueur, et le diamètre s'explique comme la même manière que celle de sa composition chimique, est influencée par divers facteurs agricoles et industriels. Les dimensions transversales des fibres varient selon leur position dans la tige.

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales. [7].

Fibres	Module d'Young (GPa)	Déformation à la rupture %	Resistance à la traction (MPa)
Coton	5,5-12,6	7-8	287-597
Lin	58	3,27	1339
Chanvre	35	1,6	389
Jute	26,5	1,5-1,8	393-773
Sisal	9-21	3-7	350-700
Alfa	12,7	1,6	75-154

1.3.8.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres végétales dépendent de leur composition chimique (cellulose, hémicellulose, lignine, pectines), de leur structure interne (section transversale, porosité, angle micro fibrillaire), ainsi que de facteurs externes tels que le type de défibrage utilisé et les conditions de croissance de la plante. Bien que ces propriétés varient selon l'espèce végétale, les fibres naturelles présentent généralement un module d'Young comparable à celui de la fibre de verre. En outre, leurs propriétés spécifiques (rapport propriétés/densité) sont souvent meilleures que celles de cette dernière. Leur comportement en traction joue un rôle déterminant dans le renfort qu'elles apportent aux matériaux composites, comme le montre le tableau 3 [8].

I.3.8.3 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales, synthétiques (verre, carbone, Kevlar) et hybrides

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre, notamment en raison de leur biodégradabilité et de leur recyclabilité. Elles présentent de nombreux avantages lorsqu'elles sont utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Cependant, certains inconvénients peuvent freiner leur développement à l'échelle industrielle.

Les principaux avantages et inconvénients des fibres végétales sont présentés dans le tableau 4.

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

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faible densité et faible coût - Facile à recycler et biodégradables - Neutre pour l'émission de CO₂ - Pas d'irritation cutanée lors de la Manipulation des fibres - Absence de résidus après incinération - Ressource renouvelable, non abrasives pour les outillages - Demande peu d'énergie pour être produite - Bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique - Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) 	<ul style="list-style-type: none"> - Absorption d'eau - Faible stabilité dimensionnelle - Mauvaise tenue en vieillissement - Faible résistance au feu (200 à 230 °C max) - Fibres anisotropes - Variation de qualité en fonction du lieu De croissance, de la météo ... - Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock - Renfort discontinu

I.4 Applications des fibres naturelles :

Les fibres naturelles, comme le jute, le chanvre, le lin, l'alfa, la fibre de coco et la bagasse de canne à sucre, sont utilisées depuis longtemps dans la production de textiles, cordes, toiles et papiers. Elles sont également appliquées dans des matériaux composites, notamment dans l'industrie automobile, où elles renforcent les polymères pour fabriquer des composants comme des panneaux de portes, appui-têtes et boucliers moteurs. Ces fibres offrent une rigidité spécifique élevée et un faible impact environnemental par rapport aux fibres synthétiques. Elles trouvent aussi des applications dans la construction, comme le renforcement de ciments et la fabrication de matériaux de substitution au bois. De plus, elles sont utilisées dans la conservation des sols et le sport automobile en raison de leur capacité à réduire la masse [9].



Figure I.7: Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le domaine d'automobile [10].

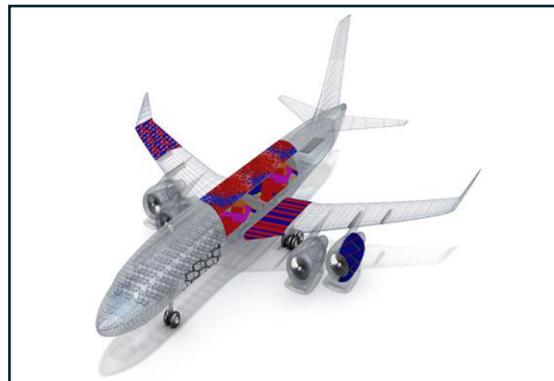


Figure I.8 : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le secteur de construction [11].

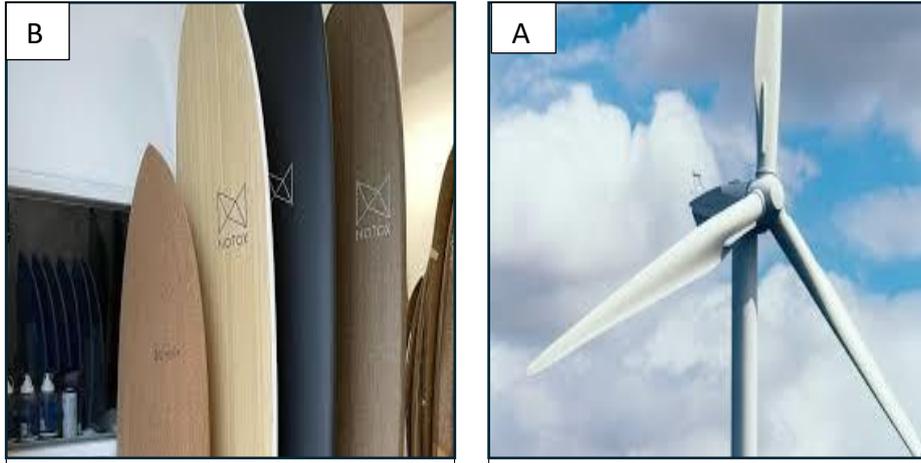


Figure I.9 : Autres applications des matériaux composites à base de fibres naturelles : a) Eolienne et b) planches de surf [11].

I.5 Etat de l'art sur les travaux réalisés sur les composites en fibres végétales

Les recherches récentes témoignent d'un intérêt croissant pour la caractérisation des fibres naturelles, en particulier les fibres végétales utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Si la majorité des études se concentre sur les fibres individuelles, peu d'attention est accordée aux faisceaux de fibres, bien qu'ils soient couramment utilisés dans des applications telles que le tissage ou le cordage.

Parmi ces fibres végétales, la fibre de jute est l'une des plus étudiées. Sa structure interne complexe, constituée de microfibrilles de cellulose liée par de la lignine et de l'hémicellulose, détermine en grande partie ses propriétés mécaniques. Ces caractéristiques varient selon l'orientation des fibrilles (angle micro fibrillaire) et la composition chimique de la fibre. Ainsi, un angle micro fibrillaire faible confère à la fibre une plus grande rigidité et résistance, tandis qu'un angle plus élevé favorise une meilleure capacité d'allongement avant rupture [12].

Les travaux scientifiques portant sur le jute couvrent l'ensemble de sa chaîne de valeur, depuis la culture jusqu'aux propriétés mécaniques finales :

- Au niveau agricole, les recherches s'intéressent à la variabilité génétique des plants et à son impact sur le rendement.
- Lors des étapes de filature et de tissage, l'accent est mis sur l'optimisation de l'ouverture des fibres, un paramètre crucial pour améliorer les performances mécaniques.
- Enfin, l'angle micro fibrillaire fait l'objet d'analyses approfondies en raison de son influence déterminante sur les propriétés mécaniques du matériau final.

I.5.1 Études expérimentales majeures

Selver *et al* [13] ont développé différents composites stratifiés à matrice époxy, comprenant : verre /époxy, jute/époxy, lin/époxy, verre-jute/époxy, verre-lin/époxy, jute-verre/époxy et lin-verre/époxy. Les propriétés des matériaux constitutifs ainsi que les séquences d'empilement correspondantes sont présentées respectivement dans les Tableaux I.5 et I.6. Les composites ainsi élaborés ont été soumis à des caractérisations expérimentales et théoriques, aussi bien en phase d'impact qu'en phase post-impact.

Tableau I.5 : Propriétés des tissus. [13]

Matière	Densité (g/m ³)	Densité surfacique (g/m ²)	Motif de tissage	Chaîne/cm	Trame/cm
Verre	2.55	300	Plaine	3	3
Jute	1.46	292	Plaine	7	7
Lin	1.40	296	Toile	20	10

Tableau I.6 : Séquences d'empilement et propriétés des stratifiés composites élaborés. [13]

Exemple de code	Séquence d'empilement	Densité (g/cm ³)	Epaisseur (mm)	GF VF (%)	Jute Vf (%)	Lin Vf (%)
GG	[(0/90) ₃] _s	1,81 (±0,01)	3,00 (±0,07)	46,50	-	-
JJ	[0/90] _s	1,22 (±0,01)	2,95 (±0,04)	-	26,90	-
FF	[0/90/0/90/0]	1,26 (±0,03)	2,79 (±0,04)	-	-	37,9
GJ	[(0/90/0) ^G / (0) ^J] _s	1,47 (±0,02)	2,95 (±0,07)	23,90	13,50	-
JG	[(0)J / (0/90/0) ^G] _s	1,48 (±0,02)	2,96 (±0,08)	23,50	13,50	-
GF	[(0/90) ₂ ^G / (0) ^F] _s	1,61 (±0,01)	3,09 (±0,07)	30,50	-	13,7
FG	[(0) ^F (0/90) ₂ ^G] _s	1,61 (±0,01)	3,09 (±0,09)	30,00	-	13,7

La densité des éprouvettes composites a été mesurée conformément à la norme ASTM D792-08. La fraction volumique de fibres de verre a été déterminée selon la méthode ISO 1172 :1999. La résistance à l'impact a été évaluée à l'aide d'une machine d'impact BES-MAK, équipée d'un percuteur de 16 mm de diamètre. Des essais de compression, ainsi que des essais de compression après impact (CAI), ont été réalisés sur les échantillons endommagés à l'aide d'une machine de traction Zwick Roell/Z100. Enfin, les dommages induits par l'impact ont été examinés au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB).

Les propriétés des matériaux composites ont été extraites de travaux antérieurs, et les critères de Hashin ont été appliqués pour quantifier les dommages intra-lamellaires. Ces critères prennent en compte quatre mécanismes d'initiation de dommages : la rupture des fibres en traction, la rupture des fibres en compression, la rupture de la matrice en traction et la rupture de la matrice en compression.

Les taux de libération d'énergie pour les modes I, II et III sont désignés respectivement par GIGI, GIIGII et GIIGIII, tandis que leurs valeurs critiques sont notées GcIGcI, GcIIGcII et GcIIIGcIII. Les paramètres aa, bb et cc, nécessaires à l'évaluation des critères de rupture, sont déterminés expérimentalement. Les paramètres de rigidité et de résistance des matériaux composites utilisés dans le modèle par éléments finis (FEM) sont présentés dans le Tableau 3. Par ailleurs, les propriétés et les paramètres de rupture de l'interface entre les couches adjacentes des stratifiés composites, essentiels à la simulation des défaillances inter-lamellaires (telles que le délaminage), sont indiqués dans le Tableau 7.

Tableau I.7 : Propriétés d'impact des stratifiés composites. [13]

	Force (N)	Déformation maximale(mm)	Energie absorbée (J)
20 J			
GG	5309 (± 63)	7.25 (± 0.01)	12.62 (± 0.07)
JJ	623 (+119)	12.65 (+2.2)	3.18 (+0.75)
FF	896 (+45)	27.78 (+2.31)	12.77 (+0.34)
GF	4776 (± 173)	7.84 (± 0.05)	13.52 (± 0.15)
FG	458 (± 73)	8.44 (± 0.08)	13.77 (± 0.17)
GJ	3754 (± 105)	8.79 (± 0.13)	14.25 (± 0.13)
JG	3592 (± 155)	9.87 (± 0.07)	15.37 (± 0.13)
30 J			
GG	6044 (± 60)	8.87 (± 0.11)	22.14 (± 0.52)
JJ	580 (± 32)	12.34 (± 1.52)	2.95 (± 0.30)
FF	897 (± 40)	35.76 (± 5.14)	15.43 (± 2.25)
GF	5206 (± 252)	9.69 (± 0.18)	23.57 (± 0.54)
FG	5170 (± 212)	10.43 (± 0.03)	24.14 (± 1.03)
GJ	4118 (± 166)	11.66 (± 0.28)	24.84 (± 0.20)
JG	3713 (± 318)	13.36 (± 0.68)	25.12 (± 0.19)
40 J			
GG	6581 (± 108)	10.47 (± 0.15)	33.18 (± 0.27)
JJ	560 (+33)	13.47 (+0.69)	3.22 (+0.30)
FF	825 (± 31)	25.55 (± 3.4)	17.52 (± 2.78)
GF	5622 (± 281)	11.80 (± 0.30)	34.14 (± 0.08)
FG	5500 (± 270)	12.78 (± 0.06)	34.81 (± 0.07)
GJ	4055 (± 206)	15.42 (± 0.39)	34.60 (± 0.06)
JG	3756 (± 189)	20.42 (± 1.76)	35.38 (± 1.33)
50 J			
GG	6768 (± 179)	12.14 (± 0.18)	43.67 (± 0.34)
JJ	583 (± 34)	13.27 (± 0.69)	3.47 (± 0.52)
FF	888 (± 39)	32.25 (± 1.75)	15.3 (± 0.31)
GF	5622 (± 281)	11.80 (± 0.30)	34.14 (± 0.08)
FG	5394 (+186)	15.70 (± 0.10)	45.37 (+0.07)
GJ	4007 (+45)	26.87 (+3.45)	42.55 (+2.37)
JG	4003 (± 335)	37.65 (± 3.23)	46.89 (± 1.55)

Tableau I.8 : Les propriétés d'interface des stratifiés composites. [13]

	Code du Composite	Composite à base de verre	Composite à base de lin	Composite à base de jute
. Résistance de la matrice (MPa)	σ	70	70	72
	τ	55	55	60
. Raideur des éléments cohésifs d'interface (10^6 N/mm ³)	K_n	0.15	0.038	0.025
	K_t	0.15	0.038	0.025

Parmi ces paramètres, σ et τ représentent respectivement les contraintes normales et de cisaillement dans l'interface, correspondant aux contraintes normales et de cisaillement de la résine époxy. Les valeurs K_n et K_t désignent les rigidités normales et tangentielles de l'interface. En outre, E_{33} représente la rigidité dans la direction de l'épaisseur des stratifiés, t correspond à l'épaisseur de la couche connectée par un élément cohésif, et a est un paramètre sans dimension.

Selver et al [13] ont trouvé que l'ajout de fibres naturelles réduit la résistance aux chocs des composites, ce qui entraîne une déflexion plus importante lorsque les zones d'endommagement sont plus étendues, comme l'illustre la figure 10. La figure 11 montre que les composites **JJ** (jute jute) et **FF** (lin lin) subissent une pénétration complète de l'impacteur à tous les niveaux d'énergie, la déformation des composites **FF** étant supérieure à celle des composites **JJ**.

Par ailleurs, les composites **JG** (jute verre) et **GJ** (verre jute) présentent des valeurs de déformation plus élevées que les composites **GF** (verre lin) et **FG** (lin verre), à tous les niveaux d'énergie, en raison de zones d'endommagement plus importantes, comme indiqué dans la figure 10. La comparaison des séquences d'empilement révèle que les composites dont les couches de fibres naturelles sont placées à l'extérieur présentent des déformations plus importantes que ceux dont ces couches sont situées à l'intérieur, quel que soit le niveau d'énergie.

Une explication possible est que les fibres naturelles se fracturent ou se déforment plus rapidement que les fibres de verre, ce qui permet à l'impacteur de pénétrer plus profondément dans ces composites hybrides.

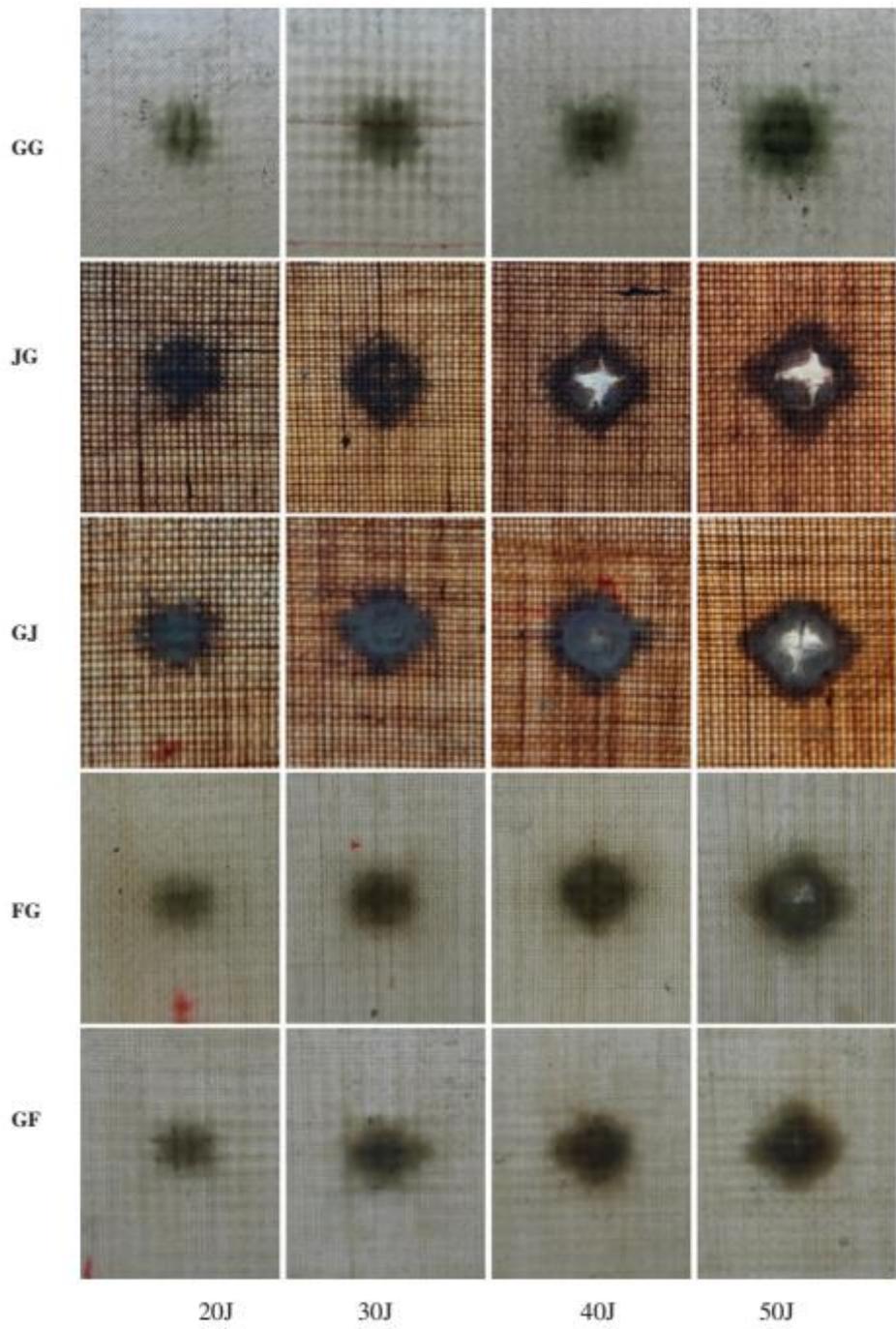


Figure I.10. Photos de verre impacté et de composites hybrides à différents niveaux d'énergie [13].

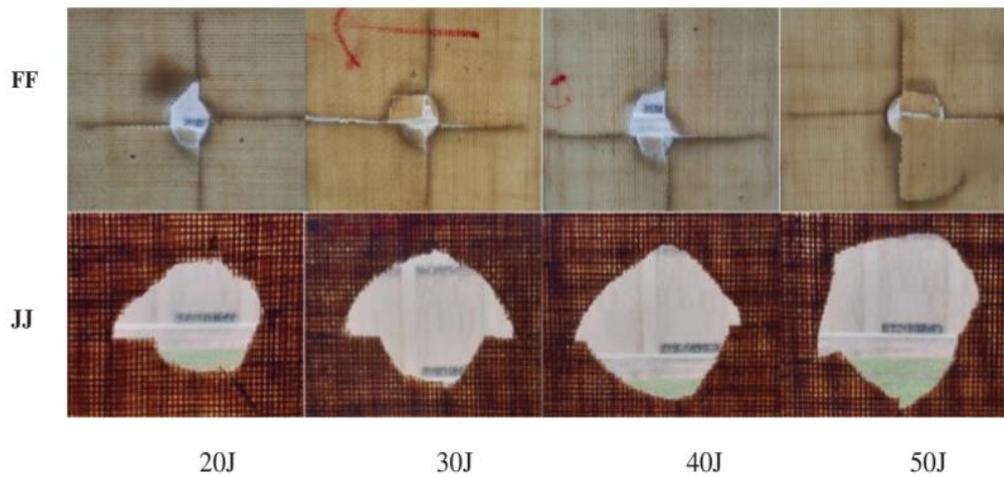


Figure I.11 : Photos de composites de fibres naturelles impactées à différents niveaux d'énergie (20–50 J) [13].

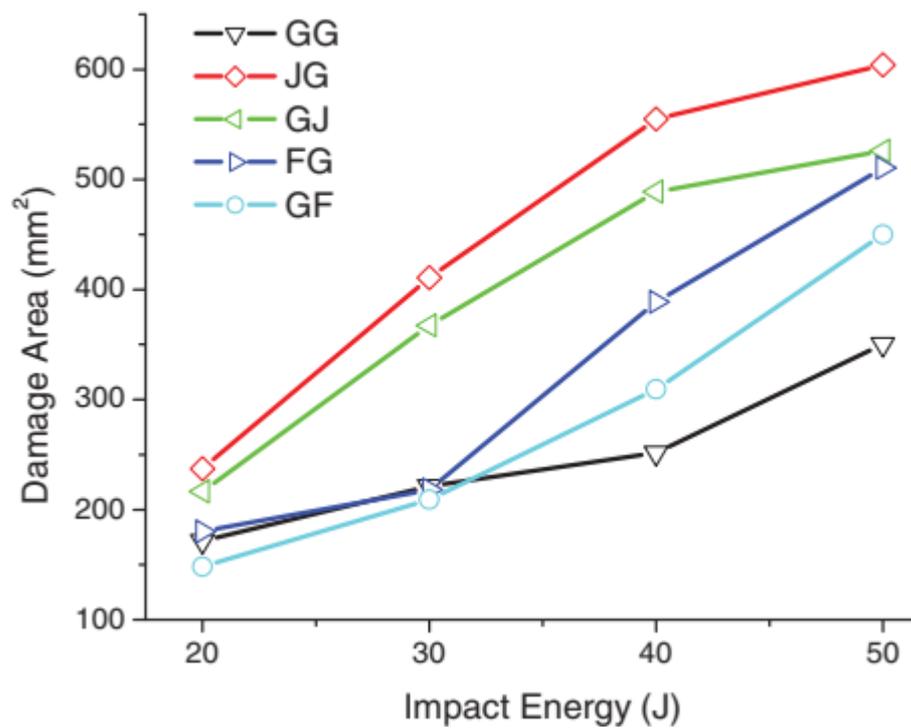


Figure I.12 : Zones de dommages causés par les impacts sur le verre et les composites hybrides à différents niveaux d'énergie [13].

Manjunathan Karthick et al [14], ont fait une étude expérimentale sur les propriétés mécaniques d'un composite polymère hybride à cinq couches, renforcé de fibres de verre et de fibres naturelles. Ils ont examiné et présenté les résultats observés dans le domaine des composites hybrides, en particulier la présente étude se concentre sur l'impact de la composition

des fibres. Cette étude explore l'utilisation de fibres de bambou, de jute et de verre comme renforts dans des matériaux composites utilisant une matrice en résine époxy. L'objectif est d'évaluer leurs propriétés mécaniques selon différentes configurations de couches de fibres, (Tableau1).

Tableau 1.9 : Bambou, Jute, et Fibre de verre [14].

Fibre	Diamètre (mm)	Résistance à la traction TS(MPa)	Cellulose Wt %	Allongement à la rupture (EB) %	Densité g/cm ³	Module de young (E) MPa
Fibres de Bambou	10-30	280	65	2.1-5	0.78	18500
Fibres de Jute	26-255	14-27.6	63-74.5	1.26-1.7	1.4-1.50	395-805
Fibres de Verre	15-25	70-73	-	2.5	2.55	2000-3500

Les propriétés mécaniques ont été évaluées selon les normes ASTM. Les essais de traction (ASTM D638) ont été réalisés avec une machine de 10 kN sur des échantillons de 165 × 19 × 2,5 mm, à 1,1 mm/min. La résistance à l'impact (ASTM D256) a été mesurée sur des échantillons de 65,5 × 12,7 × 3 mm, avec la moyenne de trois essais. Les propriétés en flexion (ASTM D790) ont été évaluées sur des échantillons de 100 × 12,7 × 3 mm à une vitesse de 2,5 mm/min.

La résistance à la traction des composites dépend des propriétés des fibres, de leur teneur et de l'adhérence avec la matrice. Les différents composites hybrides (GJBJG, GJGJG, GBGBG, etc.) ont présenté des comportements contrainte-déformation variés (Figure 12) :

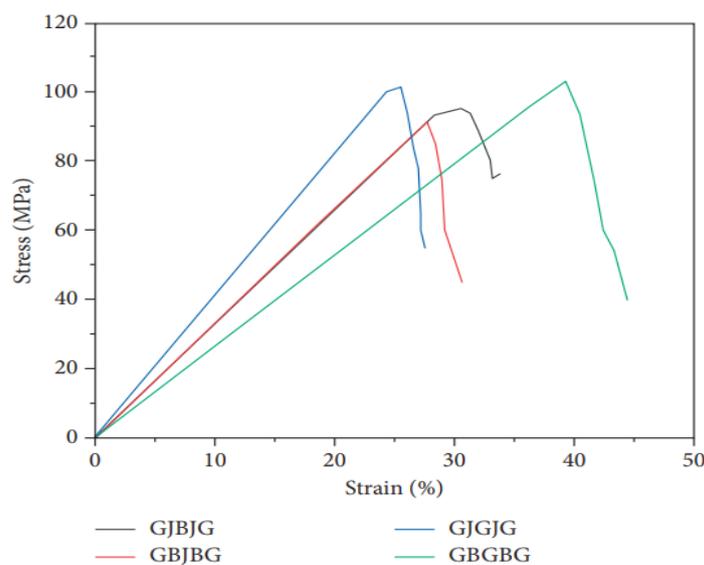


Figure I. 12 : la courbe contrainte-déformation composite [14].

Les composites présentent des comportements mécaniques distincts selon leur configuration. Le composite **GJBJG** montre une rupture forte mais cassante après un pic de contrainte autour de 95 MPa ; la présence de bambou en cœur permet un certain allongement progressif, bien que la rupture finale reste soudaine. Le composite **GJGJG** affiche une courbe contrainte-déformation linéaire et stable, avec une résistance maximale d'environ 101,8 MPa ; les couches de fibres de verre dominant le comportement mécanique, et la rupture survient principalement par cisaillement. Le composite **GBGBG**, quant à lui, présente le plus grand allongement (~44 %) ainsi que la meilleure résistance à la traction (~103 MPa), grâce à la flexibilité et à la capacité d'absorption d'énergie des fibres de bambou avant la rupture. De manière générale, les fibres de verre assurent la résistance structurelle, les fibres de jute améliorent les performances mécaniques globales, et les fibres de bambou apportent souplesse et allongement au matériau.

Les tests de flexion ont mesuré la capacité des composites à résister aux efforts de courbure. Les résultats varient selon les types de fibres et leur agencement (Figure13) :

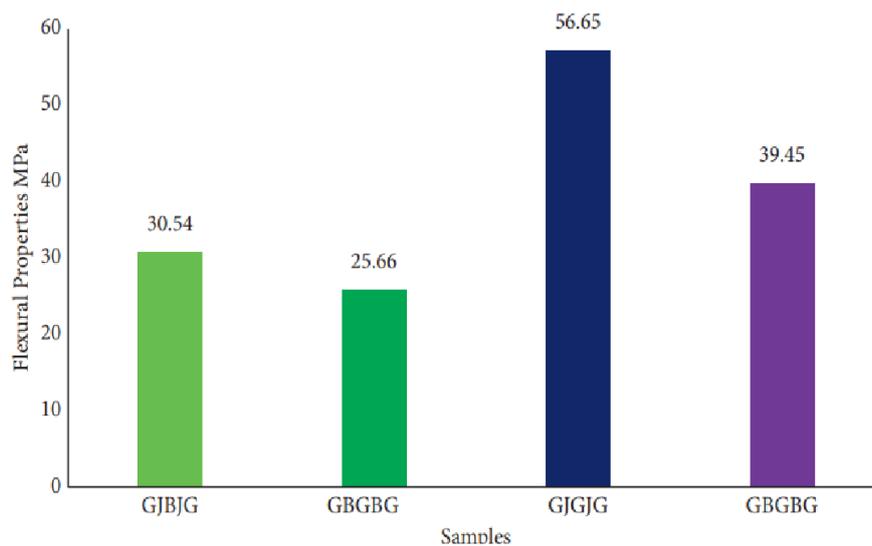


Figure I.13 : La résistance à la flexion des composites [14].

Les composites à base de fibres combinées présentent des performances mécaniques variables selon leur composition. Par exemple, le composite GJGJG (verre-jute-verre) offre la meilleure résistance à la flexion, avec 56,65 MPa, grâce à la présence de fibres de verre en couches principales et externes qui renforcent la rigidité. Le composite GBGBG, avec des fibres de bambou intercalées entre des couches de verre, atteint une résistance de 39,45 MPa : les fibres de bambou, plus élastiques, se plient sous contrainte et transmettent les charges aux fibres de verre. En revanche, les composites GJBJG et GJBJG présentent des résistances plus faibles, respectivement 30,7 MPa et 25,7 MPa, en raison d'une moindre proportion de fibres de verre et de la résistance inférieure du bambou comparée au jute. Ainsi, les fibres de verre apportent principalement la rigidité, tandis que les fibres de bambou, plus souples, offrent une résistance moindre en flexion.

Les tests d'impact à basse vitesse ont évalué la capacité des composites à absorber l'énergie. Principaux résultats (Figure I.14) :

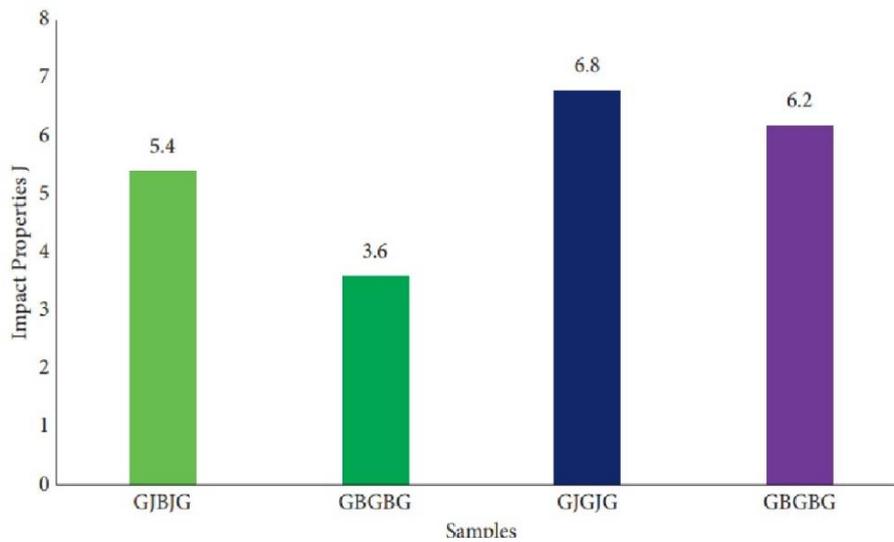


Figure I.14 : résistance aux chocs des composites électroniques [14].

Les performances à l'impact des composites varient selon la nature et la disposition des fibres. Le composite GJGJG montre la meilleure résistance à l'impact avec 6,8 J, suivi de GBGBG (6,2 J), GJBJG (5,4 J) et GJBJG (3,6 J). Ce dernier présente la plus faible résistance, en raison de ses couches externes composées majoritairement de fibres de bambou, qui ont une faible teneur en cellulose et une résistance mécanique réduite. Les composites riches en fibres de verre, comme GJGJG et GBGBG, ont absorbé plus d'énergie, ce qui leur confère une meilleure durabilité. Enfin, la résistance aux chocs dépend fortement de la qualité de l'adhésion entre les fibres et la matrice, ainsi que de l'organisation interne des fibres dans le matériau.

Jean-Sébastien Dupuy [15], a proposé une méthode de caractérisation rapide de l'endommagement des matériaux composites à matrice polymère, en s'appuyant sur des analyses mécaniques vibratoires. Certaines de ces méthodes reposent notamment sur l'analyse des fréquences de résonance de la structure. Les méthodes d'analyse dynamique pour étudier le comportement mécanique des matériaux viscoélastiques sont abondamment utilisées. Ces méthodes largement développées permettent d'identifier les caractéristiques viscoélastiques telles que le module d'Young complexe et le coefficient de Poisson complexe

Les méthodes d'identification des propriétés viscoélastiques, basées sur l'utilisation de l'algorithme de Newton-Raphson. Le matériau étudié est un polyamide, pour lequel sont mesurés le module d'Young E' , le facteur de perte η et le coefficient de Poisson ν . Il est particulièrement intéressant d'observer l'évolution de ces paramètres en fonction de la fréquence, comme le montrent les figures I.15 et I.16.

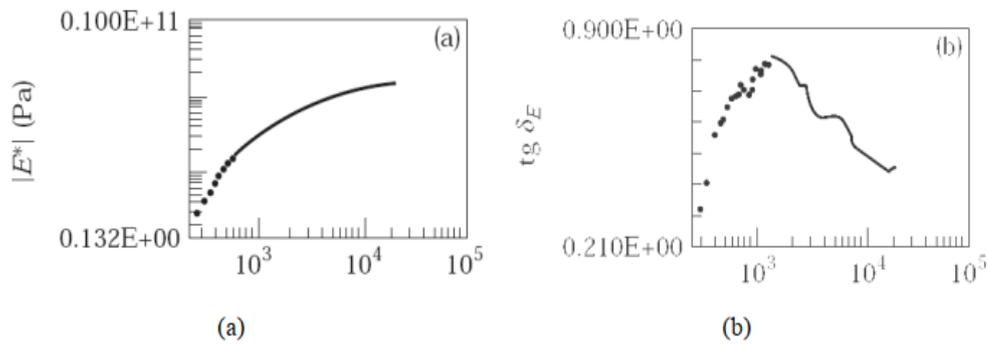


Figure. I.15 : Elastomère très amortissant, Valeur absolue du module d'Young complexe (a) et facteur de perte $\eta (= \tan\delta)$ (b) [15].

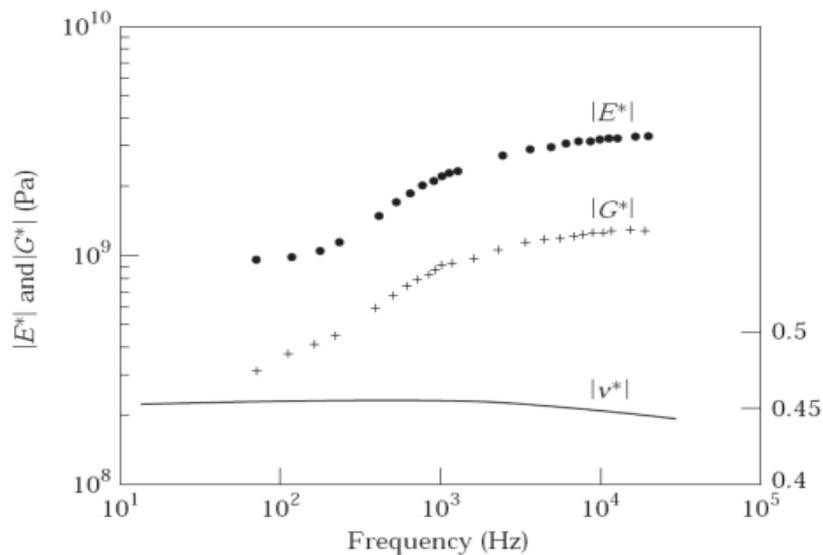


Figure I.16 : Module de cisaillement G^* , module d'Young E^* et coefficient de Poisson évalués sur un polyamide [15].

Les modules de cisaillement et d'Young évoluent en fonction de la fréquence, tendant vers une valeur asymptotique maximale à mesure que la fréquence augmente. En revanche, le coefficient de Poisson reste globalement constant quel que soit le domaine fréquentiel. Pour le calcul du module d'Young, l'analyse des pôles d'une fonction de réponse fréquentielle (ou fonction de transfert) peut être utilisée. À ce sujet. Par ailleurs, des méthodes basées sur des essais dynamiques à hautes fréquences de l'ordre de quelques kilohertz, ont été mises en œuvre pour caractériser efficacement les matériaux composites.

Ronald F. Gibson [16] a étudié l'utilisation des mesures de réponse en vibration modale comme méthode rapide et précise pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux et structures composites renforcés de fibres. Il a démontré que les essais modaux, qu'ils soient réalisés en mode unique ou multimodal, permettent de déterminer les modules élastiques et les facteurs d'amortissement des composites, ainsi que de leurs constituants.

Dans des conditions environnementales variées. Les essais de vibrations modales permettent de mesurer les fréquences propres, les facteurs d'amortissement et les formes modales d'une structure, afin d'en déduire des propriétés mécaniques comme le module d'élasticité. Historiquement, ces méthodes étaient lentes et limitées à des échantillons de laboratoire. L'arrivée des analyseurs à transformée de Fourier rapide (TFR) et des instruments virtuels sur PC a considérablement simplifié et accéléré ces tests. L'excitation impulsionnelle, combinée à une analyse en temps réel, permet aujourd'hui de caractériser efficacement aussi bien des échantillons de laboratoire que des structures à grande échelle. Des illustrations (figures I.16 à I.17) montrent un exemple de dispositif expérimental et les réponses mesurées.

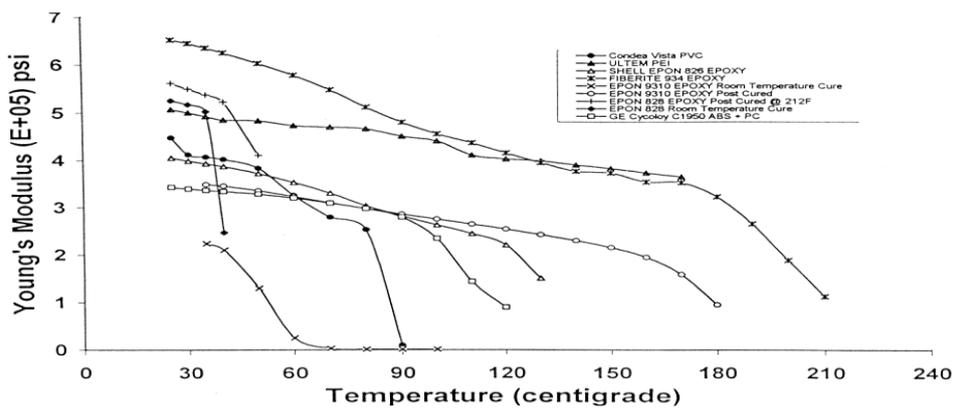


Fig. I.16 Configuration d'essai d'impulsion/réponse pour un échantillon de poutre en porte-à-faux [16]

Après une excitation impulsionnelle de l'échantillon illustré à la figure 1, le signal de réponse est numérisé puis analysé soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel grâce à une transformée de Fourier rapide. Les pics du spectre de fréquence correspondent aux fréquences propres de l'échantillon. En les combinant avec les dimensions et la densité du matériau, il est possible de déterminer le module effectif en utilisant l'équation de fréquence dérivée du mouvement vibratoire. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la longueur d'onde du mode vibratoire est bien plus grande que l'échelle des hétérogénéités du matériau composite.

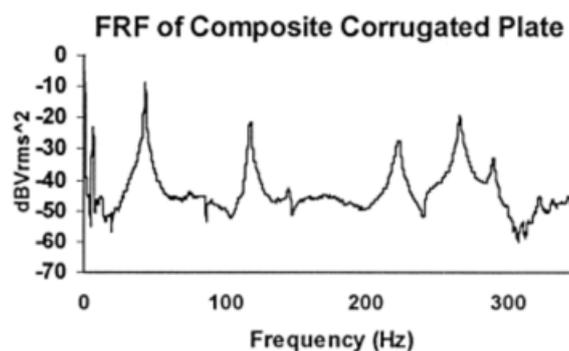


Fig. I.17 : Fonction typique fréquence/réponse pour un essai d'impulsion d'un échantillon composite [16].

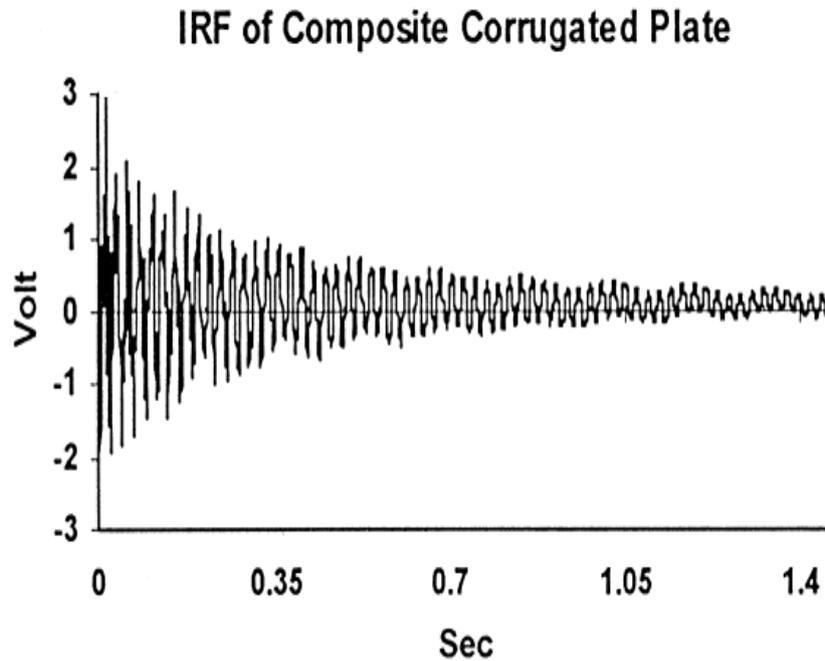


Fig. I.18 : Fonction typique temporelle impulsion/réponse pour un essai d'impulsion sur un échantillon composite [16].

Un défi majeur dans la fabrication des composants composites est la répartition non uniforme des fibres et de la matrice. Il est crucial de déterminer non seulement les propriétés globales moyennes, mais aussi leur distribution spatiale dès la fabrication. Des études ont montré que cette distribution peut être évaluée par des essais vibratoires réalisés sur différentes configurations d'une même structure. Par exemple, des poutres en porte-à-faux avec une variation linéaire de la fraction volumique de fibres ont été testées en modifiant les conditions aux limites ou en ajoutant des masses pour obtenir plusieurs jeux de fréquences. Ces fréquences permettent, via des modèles analytiques, de résoudre un système d'équations pour estimer la distribution des fibres le long de la poutre. Pour une poutre verre/époxy unidirectionnelle, les fractions volumiques mesurées par calcination ont été comparées avec celles prédites par essais vibratoires, montrant une bonne corrélation. Par ailleurs, les essais de vibrations modales constituent une méthode alternative pour caractériser le comportement viscoélastique au fluage des composites. En effet, les propriétés en domaine fréquentiel et temporel sont liées par la transformée de Fourier, permettant de relier les compliances complexes en fréquence aux compliances de fluage dans le temps.

Tableau 1.10 : Constantes élastiques des plaques carrées en graphite/époxy issues d'essais de vibration utilisant les modes (2,2), (3,1), (2,4), (3,2) et (3,3) [16].

Mode	E _x (GPa)		E _y (GPa)		G _{xy} (GPa)		V _{xy}	
	Mode 3	Mode 6	Mode 3	Mode 6	Mode 3	Mode 6	Mode 3	Mode 6
1	124,4	124,8	9,90	10,04	6,64	6,54	0,20	0,23
2	124,4	125,4	10,4	10,67	6,24	6,12	0,21	0,26
3	121,4	123,8	9,61	10,04	6,64	6,54	0,24	0,19
4	124,4	124,8	9,65	10,27	6,24	6,44	0,24	0,20
5	124,4	125,2	10,60	10,47	6,64	6,50	0,18	0,19
Moyenne	123,8	124,8	10,03	10,30	6,48	6,43	0,21	0,21

- **3-mode** : calcul basé sur **3 modes de vibration** (ex. : (2,2), (3,1), (2,4))
- **6-mode** : calcul basé sur **6 modes de vibration** (ex. : (2,2), (3,1), (2,4), (3,2), (3,3), etc.)

Plus on utilise de modes, plus l'identification des **constantes élastiques** (E_x, E_y, G_{xy}, v_{xy}) est **précise**, car on enrichit les données en fréquence de résonance et forme modale.

Des tests de réponse impulsionnelle sur des structures composites collées ont démontré que les mesures de fréquence et d'amortissement sont efficaces pour détecter les défauts dans les joints adhésifs. Initialement réalisés sur de petits échantillons de poutres composites, ces tests ont servi de base pour des applications à grande échelle, notamment dans l'industrie automobile. Des études sur des panneaux de capot composites ont montré que les dommages induits par des crashes modifient principalement les facteurs de perte d'amortissement, tandis que les fréquences modales des modes inférieurs restent plus sensibles statistiquement. Pour les modes supérieurs, l'amortissement est un indicateur plus significatif. Les tests impulsionnels sont également prometteurs pour évaluer l'efficacité des réparations par collage, bien que peu étudiés à ce jour. Leur application à grande échelle nécessite toutefois le développement de modèles analytiques ou numériques (comme les éléments finis) pour résoudre le problème inverse et estimer les propriétés in-situ. Alors que des solutions analytiques suffisent pour des géométries simples, les formes complexes requièrent des méthodes numériques combinées à des routines d'optimisation afin d'ajuster les propriétés matérielles aux mesures expérimentales.

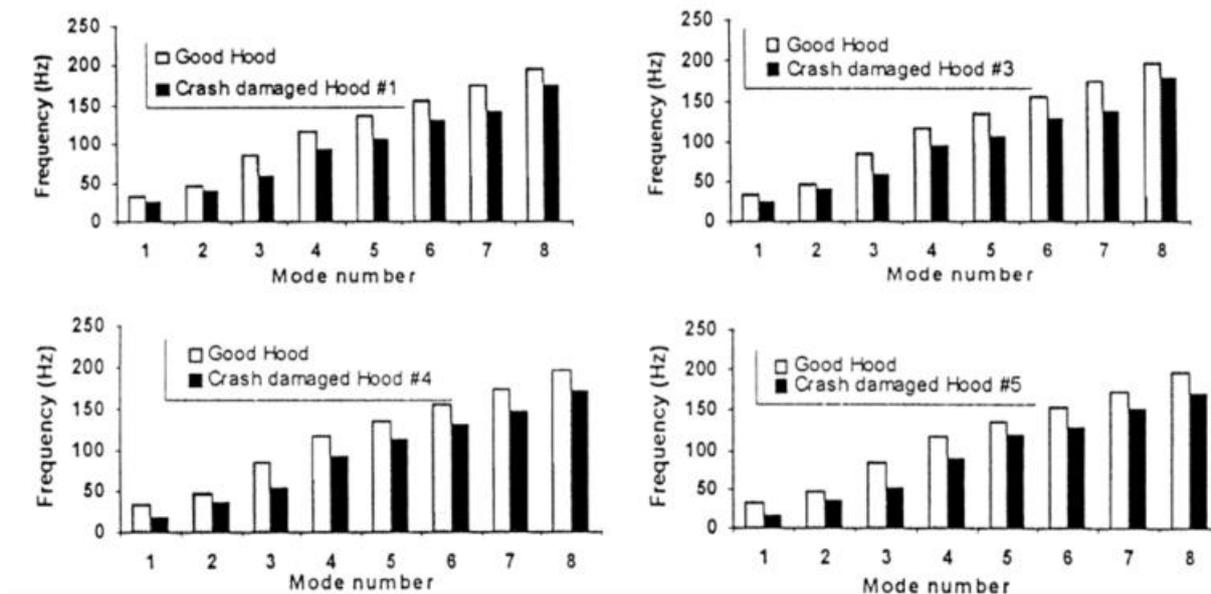


Fig. I.19 : Comparaison des fréquences modales des panneaux composites de fermeture de capot automobile collés avec et sans dommage de décollement induit par un accident [16].

Conclusion :

Face aux enjeux environnementaux actuels et à la recherche constante de matériaux performants et durables, les fibres naturelles s'imposent comme une alternative crédible et prometteuse aux fibres synthétiques dans les matériaux composites. Bien que ces dernières conservent leur suprématie en raison de leurs propriétés mécaniques élevées, leur impact écologique incite à explorer de nouvelles voies plus respectueuses de l'environnement.

L'intégration des fibres végétales telles que le jute, le lin ou le sisal, seules ou en combinaison avec des fibres synthétiques dans des composites hybrides, permet de concilier performances techniques et développement durable. Cette approche ouvre des perspectives intéressantes pour des applications dans des secteurs variés, tout en répondant aux exigences croissantes en matière d'éco-conception.

Ainsi, l'étude des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles, synthétiques et hybrides constitue un domaine de recherche en pleine évolution, porteur d'innovations tant sur le plan scientifique qu'industriel.

Chapitre II
Protocole expérimental

Chapitre II

Protocole expérimental

II.1 Introduction

Ce chapitre détaille les différents composants utilisés pour l'élaboration des composites, à savoir la fibre de verre, la fibre de jute et la résine polyester. En plus de la résine seule, trois composites stratifiés renforcés respectivement par des fibres de verre V300, des fibres de jute, ainsi qu'un renfort hybride verre/jute, ont été élaborés à l'aide de la technique du sac à vide. Après la découpe des plaques composites en éprouvettes, une technique expérimentale non destructive a été adoptée pour évaluer leurs performances, conformément à la norme ASTM E1876-01. L'objectif principal est de caractériser leurs propriétés mécaniques et élastiques à travers une série d'essais normalisés et reproductibles, sans altérer l'intégrité des éprouvettes. Les conditions de test, les dispositifs expérimentaux utilisés, ainsi que les méthodes de mesure et de traitement des données sont soigneusement décrits, afin de garantir la précision et la cohérence des résultats obtenus. Les essais reposent principalement sur l'analyse des vibrations libres et sur la mesure des capacités d'amortissement. L'ensemble de ces protocoles expérimentaux vise à mieux comprendre le comportement global des matériaux composites, et à évaluer l'influence du type de renfort, de l'orientation des fibres et de leur nature sur les propriétés mécaniques des composites.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Tissu en fibres

Le tissu en fibres , utilisé dans cette étude, a été fourni en rouleaux par une entreprise spécialisée dans la fabrication de cordages en fibres naturelles, située dans la wilaya de Béjaïa. Ce tissu présente deux directions principales : la chaîne (Y) et la trame (X), comme illustré à la figure II.1.

Le jute, connu scientifiquement sous le nom de *Corchorus capsularis*, est une fibre naturelle appartenant à la famille des Malvacées. Appréciée pour son aspect soyeux et ses reflets dorés, elle est couramment surnommée « fibre d'or ».

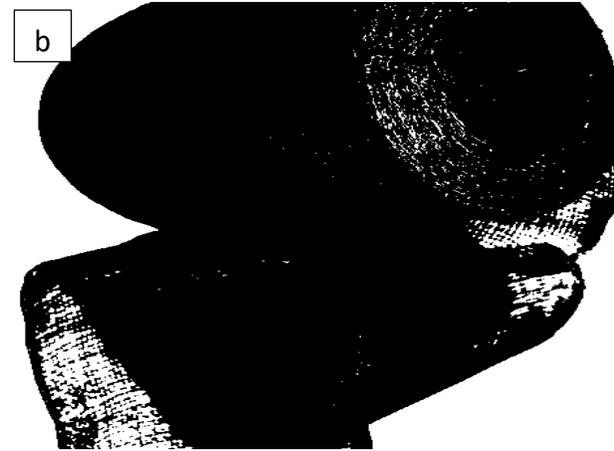


Figure II.1 : (a) Rouleau de tissu de fibre de Verre de densité 300 g/m^2 et (b) Tissue de fibre de Jute.



Figure II.2 : (A) tissu d'arrachage, (B) tissu perforé

Les fibres de jute présentent une longueur variante entre 1 et 4 mètres, avec un diamètre compris entre 17 et 20 microns. Cette plante annuelle parvient à maturité en environ 120 jours, généralement entre les mois d'avril et d'août.

Le jute est principalement cultivé dans des régions tropicales humides de basse altitude, où le taux d'humidité se situe entre 60 % et 90 %. Peu exigeant en intrants, il nécessite une faible quantité d'engrais et de pesticides. Son rendement moyen s'élève à environ deux tonnes de fibres sèches par hectare. Économiquement avantageux, le jute représente la deuxième fibre naturelle la plus produite au monde, après le coton, tant en termes de volume que de diversité d'applications.



Figure II.3 : (a) La plante de jute, (b) Transport de fibres sous forme de bottes.

II.2.2 Tissu en fibres

La fibre de verre est un matériau synthétique composé de filaments très fins de verre. de diamètre moyen 10 micron, largement utilisé comme élément de renfort dans les matériaux composites. Elle se distingue par plusieurs qualités telles que sa légèreté, sa résistance mécanique élevée et sa bonne tenue face à la corrosion. Ces propriétés en font un matériau de choix dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'automobile, la construction navale, le bâtiment et les équipements sportifs. Offrant une alternative économique et performante aux matériaux métalliques classiques, la fibre de verre s'inscrit dans une démarche d'optimisation des performances, de durabilité et de réduction des coûts dans la conception des structures composites.

II.2.3 La matrice (résine polyester)

La matrice utilisée dans cette étude est une résine polyester, sélectionnée pour son faible coût et sa large utilisation dans les composites à usage courant (Figure II.4). Il s'agit d'une résine thermodurcissable de nature synthétique, qui convient particulièrement aux

applications nécessitant des performances mécaniques modérées. Elle peut être associée à des renforts aussi bien synthétiques (comme les fibres de verre courtes ou longues) que naturels (fibres d'origine végétale ou animale).

Les résines polyesters insaturées requièrent l'ajout d'un durcisseur et d'un accélérateur, généralement dosés entre 1 et 1,5 %, afin de déclencher une réaction de polymérisation irréversible conduisant au durcissement du matériau.

Dans le cadre de ce travail, la résine utilisée est de type polyester, conservée dans des contenants plastiques, à l'abri de la lumière et dans un environnement frais afin de préserver ses propriétés.



Figure II.4 : Résine polyester utilisé.

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

Cette section décrit les différentes étapes de fabrication des plaques composites, qui serviront à la réalisation des éprouvettes pour les essais mécaniques.

II.3.1 Élaboration des biocomposites

Le matériau composite élaborés sont des stratifiés constitué de huit plis de tissu bidirectionnel de verre, verre ayant des masses surfaciques de 300 g/m², associé à une résine polyester. Les stratifiés sont confectionnés sous forme de plaques de dimensions mm selon la méthode de moulage sous vide (Figure II.7).

En parallèle, des plaques constituées uniquement de résine sont réalisées par coulée dans un moule en verre de mm² (Figure II.10). L'imprégnation des fibres se fait à

température ambiante. La résine est catalysée avec un durcisseur à une concentration comprise entre 1 % et 1,5 % en masse. La **résine polyester** seule est stable.



Figure II.5 : Préparation de fibres , Mat, Verre 300, Verre 500, et Tissu d'arrachage après découpe.

II.3.4 Étapes de préparation d'une plaque biocomposite

La fabrication d'une plaque biocomposite (Figure II.7) se déroule selon les étapes suivantes :

1. Pèse des fibres dans balance électronique (Figure II.6) pour garantir de la régularité des masses utilisées dans les stratifiés.
2. Installation du tissu d'arrachage :
3. Positionnement du premier pli :
4. Application de la résine :
5. Répétition des étapes ;Les étapes de dépôt du tissu et d'application de la résine sont répétées :
6. Dépôt du second tissu d'arrachage
7. Dépôt du film perforait et tissu absorbant :
8. Fermeture du moule :



Figure II.6 : Préparation d'une plaque de matériau composite de la

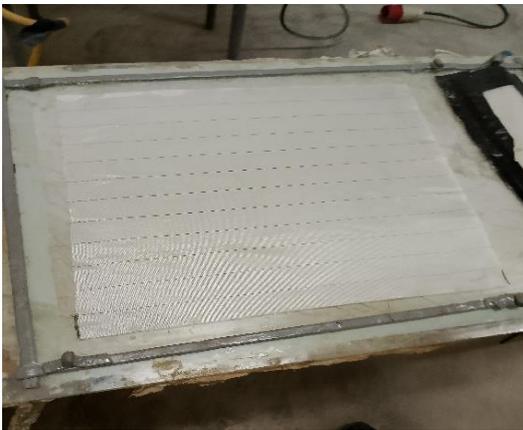




Figure II.7 : Préparation d'une plaque de matériau composite de la fibre de Jute. + fibre de verre 300.

II.3.5 Moulage sous vide

Avant la mise en dépression, le moule est soigneusement scellé fixé sur tout son pourtour à l'aide d'une bande, assurant ainsi une parfaite étanchéité. Une fois le système hermétiquement fermé, une pression négative maintenue, favorisant la polymérisation initiale du composite. Cette dépression exerce une force de compression homogène sur le stratifié, permettant à la fois une bonne compaction du matériau et l'élimination des bulles d'air résiduelles. Après certain temps en démoule les plaques avec précaution (voir Figure II.8)



Figure II.8 : Démoulée des plaques.



Figure II.9 : Préparation de matériau composite de Résine seule.

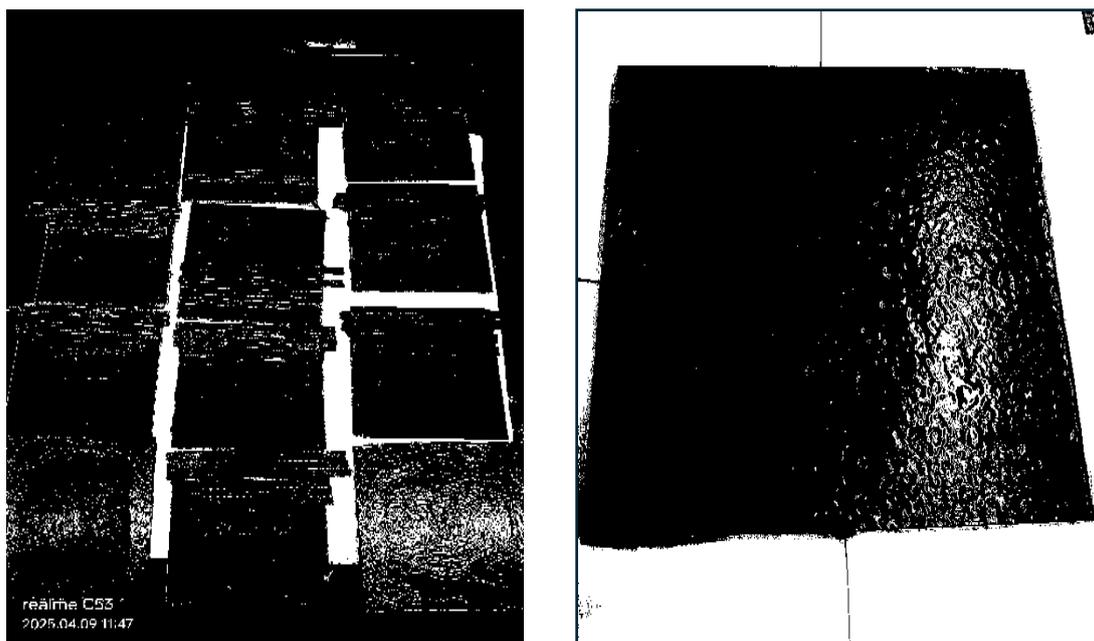


Figure II.10 : Les plaques composites et de résine

II.3.6 Découpe des plaques composites en éprouvettes

Les plaques composites fabriquées ont été découpées en éprouvettes à l'aide d'une tronçonneuse équipée d'un disque diamanté (Figures II.11 et II.12). Les découpes ont été

réalisées principalement dans la direction de la chaîne du tissu bidirectionnel, conformément à la norme ASTM E 1876-01, ainsi que suivant trois autres orientations : 25°, 45° et 65° par rapport à cette même direction.

Avant leur découpe, les plaques ont été préalablement séchées dans une étuve à 70 °C pendant 5 heures afin d'assurer une polymérisation complète de la résine.



Figure II.11 : Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques composites en éprouvettes.

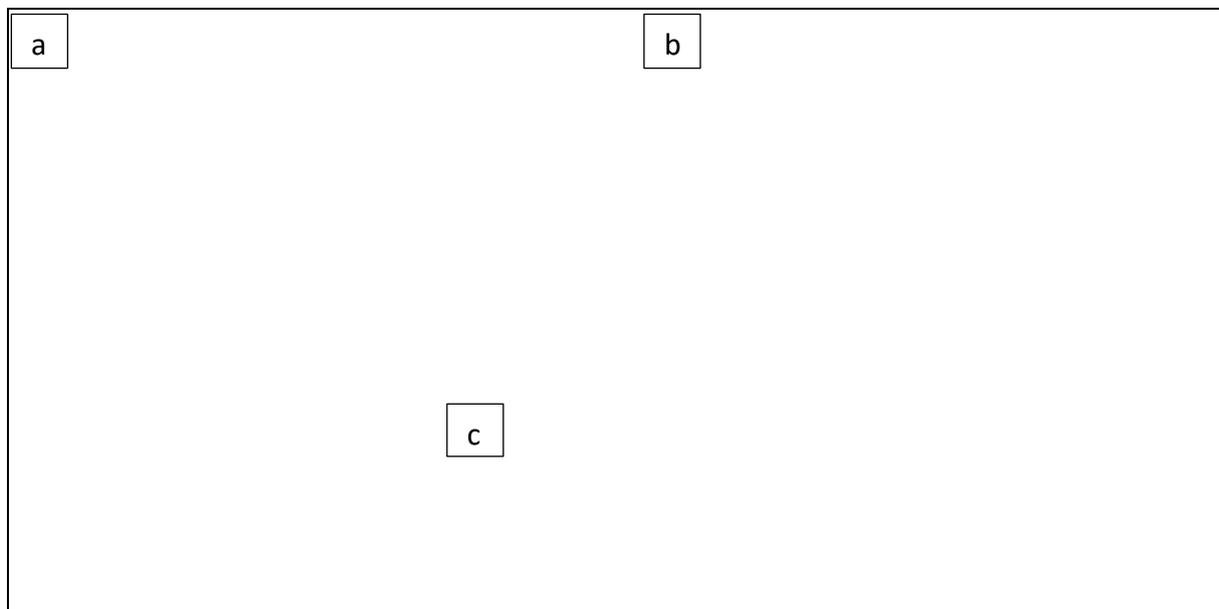


Figure II.12 : Eprouvettes utilisées en flexion : (a) Jute /V300, (b) jute avec capteurs, (c) Résine.

II.1.1 Objet de la méthode ASTM

Cette méthode d'essai permet de déterminer les propriétés élastiques dynamiques des matériaux élastiques à température ambiante. Les échantillons de ces matériaux présentent des fréquences de résonance mécaniques caractéristiques, qui dépendent de leur module élastique, masse, et géométrie. Si la géométrie, la masse et les fréquences résonantes d'un échantillon d'essai approprié (à section rectangulaire ou cylindrique) sont connues, il est possible de calculer ses propriétés élastiques dynamiques.

Le module d'Young dynamique est calculé à partir des fréquences résonantes obtenues lors de vibrations flexionnelles ou longitudinales. Le module de cisaillement dynamique, également appelé module de rigidité, est dérivé des vibrations torsionnelles. À partir de ces deux modules, on peut déterminer le coefficient de Poisson.

II.1.2 Application à d'autres températures

Bien que la méthode décrite ici soit conçue pour une application à température ambiante, elle peut également être adaptée pour des essais à températures cryogéniques ou élevées, moyennant des ajustements au niveau de l'équipement et des corrections des calculs pour tenir compte de l'expansion thermique.

II.1.3 Normes associées

Il existe d'autres normes ASTM spécifiques à certains matériaux (par ex. : C215, C623, C747, C848, C1198, C1259) qui couvrent la détermination des fréquences de résonance et des modules élastiques via des méthodes similaires. Bien que des différences existent (taille d'échantillon, tolérances, préparation), cette méthode a été conçue pour rester cohérente, autant que possible, avec ces normes. Cette norme ne couvre pas tous les aspects liés à la sécurité. Il incombe à l'utilisateur de s'assurer du respect des règles de sécurité appropriées et de vérifier la conformité aux réglementations applicables.

Toutes les valeurs doivent être exprimées en unités SI, qui constituent la référence normative.

II.2 Principe de la Méthode

La méthode repose sur la mesure de la fréquence de résonance fondamentale d'un échantillon soumis à une excitation mécanique impulsionnelle (choc élastique). L'échantillon (éprouvette), est suspendue reçoit une excitation à l'aide d'un outil à impulsion (marteau de choc). Un transducteur (accéléromètre ou microphone) capte les vibrations mécaniques et les convertit en signaux électriques. Ces signaux sont ensuite analysés par un analyseur de signaux, qui isole et mesure la fréquence ou la période de vibration.

À partir de la fréquence, ainsi que les dimensions et de la masse de l'échantillon, on calcule:

- Le module d'Young dynamique,
- Le module de cisaillement dynamique,
- Et le coefficient de Poisson.

Cette méthode peut être utilisée à des fins variées :

- Développement de matériaux,
- Caractérisation des propriétés mécaniques,
- Calculs de conception,
- Contrôle qualité.

II.3 Portée et Avantages de la Méthode

II.3.1 Types de géométries

Cette méthode s'applique aux barres minces (section rectangulaire), tiges cylindriques, ainsi qu'à des plaques planes et disques (voir chapitre 2. les équations de 1 à 7).

II.3.2 Avantages comparatifs

Par rapport aux techniques de mesure statiques ou de résonance continue, cette méthode présente plusieurs avantages :

- Elle est non destructive, avec un risque minimal de fracture.
- Elle peut être appliquée sur des échantillons déjà préparés pour d'autres essais.
- Elle ne nécessite pas de systèmes de support complexes (support simple suffisant).
- Elle permet une déformation minimale, mesurant ainsi le module proche de l'origine de la courbe contrainte-déformation.

II.3.3 Utilisation en contrôle qualité

La méthode est également adaptée pour la vérification de la conformité de géométries complexes, qui ne peuvent être testées par d'autres techniques. On établit une plage de fréquences acceptables pour un échantillon donné ; si l'échantillon vibre en dehors de cette plage, il est rejeté. Dans ce cadre, il n'est pas nécessaire de calculer précisément le module, tant que la fréquence mesurée reste dans les tolérances définies.

II.4. Adaptation et limites de la méthode

II.4.1 Influence de l'environnement

Si un échantillon a subi à une exposition environnementale susceptible d'altérer ses propriétés mécaniques, la méthode peut être utilisée pour évaluer ces effets. Il est important de documenter tout traitement thermique ou exposition subis.

II.4.2 Application aux matériaux composites ou hétérogènes

L'application de cette méthode à des matériaux composites ou non homogènes nécessite une interprétation prudente. Les caractéristiques telles que la fraction volumique, la taille, la distribution, la morphologie, l'orientation ou encore la liaison interfaciale des renforts ou inclusions influencent directement le comportement mécanique global. L'anisotropie et les inhomogénéités doivent donc être prises en compte lors de l'analyse des résultats.

II.5 Analyse et Interprétation des Résultats

La méthode d'essai que nous avons appliquée repose sur la norme ASTM E1876-01, laquelle permet de déterminer les propriétés élastiques dynamiques d'un matériau – notamment le mo-

dule d'Young et le coefficient de Poisson – à partir de ses fréquences de résonance, en lien direct avec sa géométrie et sa masse. Les résultats sont exprimés en unités SI, conformément à la norme internationale.

II.5.1 Principe de la méthode

La méthode utilisée consiste en une mesure mécanique dynamique, permettant d'analyser soit le module élastique, soit l'amortissement, soit les deux, en fonction de variables telles que la température, la fréquence, le temps, ou une combinaison de ces facteurs.

II.5.2 Comportement élastique

Un matériau est dit élastique s'il reprend instantanément sa forme initiale après suppression d'une contrainte appliquée à l'intérieur de sa limite élastique. Cette contrainte maximale, définie par la norme, ne provoque pas de déformation permanente tant qu'elle est respectée. La plupart des matériaux élastiques satisfont suffisamment à cette définition pour rendre la méthode de résonance valide.

II.5.3 Vibrations et modes

Lors de l'excitation, les échantillons développent des vibrations transitoires caractéristiques :

- Vibrations en flexion : oscillations perpendiculaires à la longueur de la tige.
- Vibrations longitudinales : oscillations parallèles à la longueur.

Les antipodes sont les points de déplacement maximal pendant la résonance, tandis que les nœuds correspondent à des points fixes (déplacement nul), notamment situés à $0,224 L$ de chaque extrémité dans le mode fondamental de flexion.

II.5.4 Mise en œuvre expérimentale

L'essai consiste à exciter mécaniquement un échantillon par un choc élastique (généralisé par un outil d'impulsion), et à enregistrer les vibrations résultantes à l'aide d'un transducteur (accéléromètre ou microphone, selon qu'il est en contact ou non). L'analyse du signal permet d'isoler la fréquence de résonance fondamentale, utilisée ensuite pour calculer les constantes élastiques.

Figure II.1 : schéma fonctionnel d'un appareil de teste typique.

Figure II.2 : Diagramme d'un impulsionneur typique pour petits échantillons.

II.5.5 Points clés

Les points clés à respecter sont :

- La localisation du transducteur et du point d'impact doit rester constante pour éviter l'introduction de modes alternatifs.
- L'intensité du choc doit être suffisante pour engendrer une vibration mesurable sans altérer physiquement l'échantillon.
- L'échantillon doit être libre de toute contrainte : les supports doivent être positionnés au niveau des nœuds et permettre une vibration non perturbée.

II.5.6 Appareillage

L'équipement se compose de :

- Un impulseur (ex. : tige flexible avec sphère métallique),
- Un transducteur adapté à la plage de fréquence (100 Hz à 50 kHz selon les matériaux),
- Un analyseur de signaux connecté à un système de lecture,
- Un système de support assurant une isolation vibratoire suffisante (mousse souple, céramique, suspension par fil, etc.).

II.5.7 Spécifications géométriques des échantillons

- Les dimensions doivent respecter une précision de 0,1 %.
- Les surfaces doivent être planes et les faces opposées parallèles.
- Le rapport longueur / épaisseur doit être au minimum de 5, idéalement entre 20 et 25 pour optimiser la précision.
- L'épaisseur est la dimension la plus sensible : une attention particulière doit y être portée, surtout pour les échantillons de moins de 3 mm d'épaisseur.

II.5.8 Procédure expérimentale

1. Activer et stabiliser tous les appareils selon les recommandations du fabricant.
2. Placer l'échantillon sur les supports aux nœuds fondamentaux.
3. Positionner le transducteur dans la zone de sensibilité maximale, en évitant les nœuds.
4. Appliquer une impulsion mécanique légère à l'extrémité ou au centre.
5. Répéter la mesure jusqu'à obtention de cinq lectures cohérentes ($< 1\%$ d'écart).
6. Calculer la moyenne pour déterminer la fréquence fondamentale.
7. Répéter la procédure après rotation de 90° pour explorer d'autres modes de vibration.

II.5.9 Précautions et limitations

Les matériaux à fort pouvoir d'amortissement peuvent poser des difficultés si l'énergie vibratoire est dissipée trop rapidement. Il est alors possible que le signal devienne non mesurable avant que le système n'ait pu détecter la résonance.

II.3.7 Capteur et son collage

L'installation commence par la préparation du matériel (capteurs avec fils, ruban adhésif, outils de nettoyage, multimètre). La surface de collage est nettoyée minutieusement pour garantir une bonne adhérence. Le capteur est ensuite positionné correctement, face sensible vers l'extérieur, puis fixé temporairement à l'aide d'un ruban adhésif, en évitant les bulles d'air. Les connexions électriques sont vérifiées à l'aide d'un multimètre pour s'assurer de la continuité. Enfin, les fils sont reliés à un système de mesure (oscilloscope ou carte d'acquisition) afin de contrôler la réponse du capteur aux sollicitations mécaniques. Cette procédure assure une installation fiable et reproductible pour la mesure de vibrations, d'ondes ou d'impacts (voir Figure II.13).

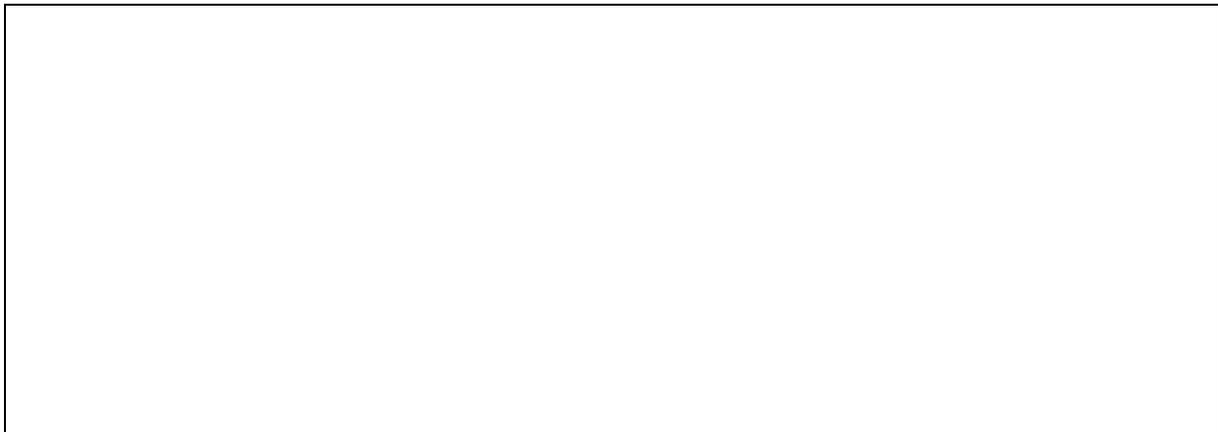


Figure II.13 : le capteur et matériel utilisé pour le collage.

II.4 Protocole expérimental

II.4.1 Norme utilisée

Pour la détermination des propriétés mécaniques des matériaux composites polymères renforcés de fibres naturelles et hybrides, notamment les modules d'élasticité et de rigidité, à partir des caractéristiques vibratoires, la norme **ASTM** est appliquée. Ces références décrivent la méthode de calcul des modules d'élasticité (**E**), de rigidité (**G**) et du coefficient de Poisson (**μ**) à partir des fréquences propres en flexion et en torsion, ainsi que des dimensions et de la masse d'un solide [4,7,8]. Le module d'élasticité **E** d'une plaque composite peut être exprimé comme suit :

$$E = T \dots\dots\dots (1)$$

Où E est le module d'élasticité (Pa), m est la masse (g), f_f 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, qui tient compte de l'épaisseur des plaques. Ce facteur T peut être calculé par l'expression suivante :

$$T = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 \dots \dots \dots (2)$$

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

$$+ 6 \quad 5 \left(\frac{t}{L}\right)^2 \dots \dots \dots (3)$$

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

$$[B/(1 + A)] \dots \dots (4)$$

Avec :

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

$$\left[\frac{0,5062 - 0,8776(b/t) + 0,35}{2(b/t)^2} \frac{0,78(b/t)^3}{1} \right] \dots \dots \dots (6)$$

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 (μ) peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

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

II.4.2 Méthodologie et expérience

Pour réaliser les essais vibratoires, un dispositif expérimental spécifique a été mis en place. Les plaques composites sont montées sur un support (1), de manière à reproduire des conditions aux bords libres, conformément aux exigences de la norme ASTM

Un capteur piézoélectrique est fixé sur la surface de la plaque à l'aide d'un ruban adhésif haute température ou d'une colle adaptée, assurant une bonne adhérence et une transmission fiable des signaux. Les fils du capteur (2), sont ensuite raccordés à un système d'acquisition de données (3), en l'occurrence un PicoScope (4), configuré via son logiciel dédié après étalonnage. L'excitation de la plaque est réalisée à l'aide d'un **impacteur sphérique**, qui permet de générer une vibration libre par un choc bref et contrôlé. Cette vibration est captée par le capteur piézoélectrique, puis transmise au PicoScope, où le signal est enregistré et analysé pour identifier les fréquences naturelles de résonance en flexion et en torsion.



Figure II.14 : (A) Impacteur utilisé pour l'excitation vibratoire des plaques composites
(B) Appareil du *PicoScope*.

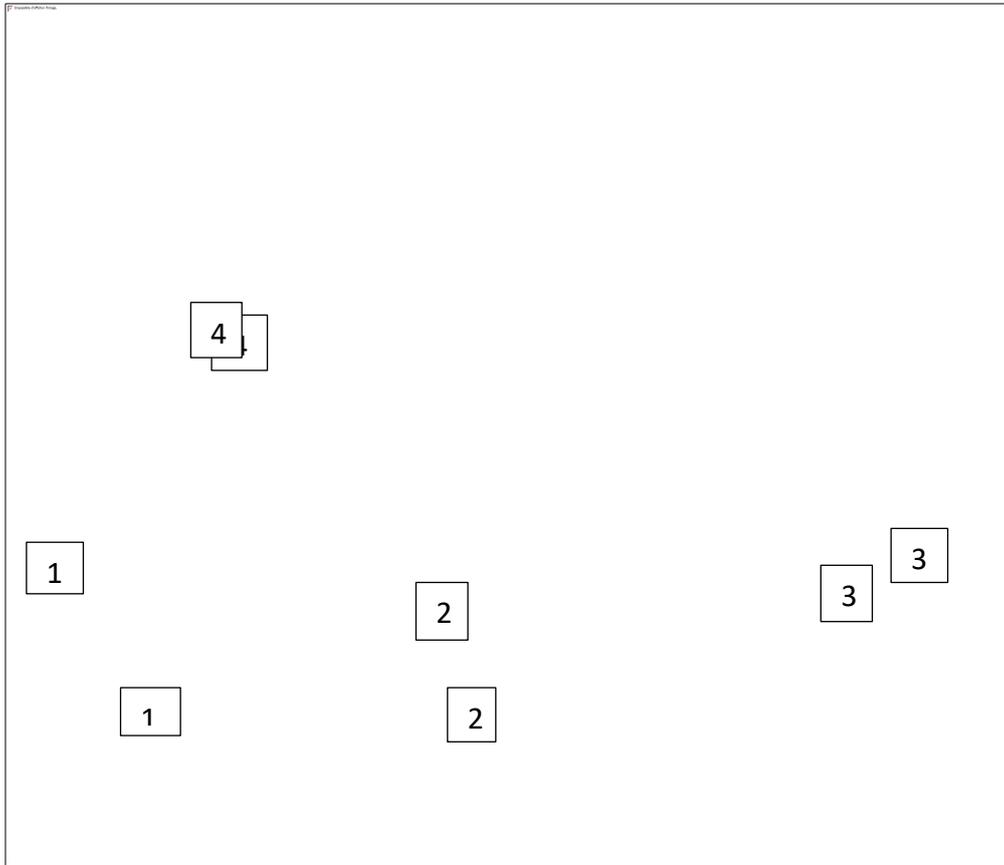


Figure II.15 : Mesures expérimentales effectuées.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre est présenté en détail les constituants des matériaux utilisés, le protocole d'élaboration de plaques en résine et de trois composites stratifiés. La découpe des plaques en éprouvettes ayant quatre orientations à savoir : 0/90, orientée à degrés. La caractérisation des éprouvettes est effectuée par une méthode modale (vibratoire) non destructive qui permet d'obtention des propriétés mécaniques dans le domaine élastique. Grâce à l'utilisation conjointe du capteur piézoélectrique, collé sur l'éprouvette, de l'impacteur sphérique et du système PicoScope, il a été possible de déterminer avec précision les fréquences propres des plaques composites à partir du signal. Ces données vibratoires, exploitées selon la norme ASTM , ont permis de déterminer des paramètres mécaniques fondamentaux tels que le module d'élasticité (E), le module de rigidité (G) et le coefficient de Poisson (μ). L'approche expérimentale adoptée constitue ainsi un outil performant pour l'analyse des comportements mécaniques des composites, en particulier dans les domaines de l'ingénierie

des matériaux, du dimensionnement de structures légères, et de l'optimisation des performances mécaniques.

Chapitre III
Résultats et discussion

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de la méthode ASTM , appliquée à divers matériaux composites renforcé par des tissu de fibre de verre, de jute et hybrides. L'objectif principal est d'évaluer et de comparer leurs propriétés mécaniques à savoir : le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ) des trois composites élaborés pour les quatre orientations degrés par rapport à la résine non renforcé.

À travers des mesures de fréquence de résonance obtenues par excitation vibratoire, cette méthode non destructive permet de caractériser de manière fiable les performances mécaniques des matériaux étudiés. Les essais ont été menés sur quatre types de matériaux : la résine pure, le composite V300, le jute naturel et le composite hybride

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de signal, de tableaux et d'histogrammes, suivis d'une analyse comparative. Les résultats obtenus permettent de montrer l'influence du type de renfort ainsi que l'orientation des fibres sur les propriétés élastique des matériaux composites.

III.2 Discussion des Résultats

L'application de la méthode ASTM à différents matériaux (résine, V300, JUTE, JUTE/V300) a permis de caractériser leurs propriétés élastiques dynamiques via les fréquences de résonance mesurées. Ces résultats fournissent une vision comparative des performances mécaniques dynamiques selon la composition et l'orientation des échantillons. Les dimensions et la masse des éprouvettes testés sont récapitulé dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Les dimensions et la masse des éprouvettes testés.

Composites	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Poids (g)
JUTE				
JUTE/V300				
V300				
Résine				

III.2.1 Résine seule

Les signaux de réponse vibratoire mesurée pour l'éprouvette en résine des trois tests sont présentés dans la figure III.3. Ces signaux permettent de déterminer les fréquences propres à partir des sept premiers cycles. Ce qui conduit à la détermination des propriétés élastiques E , G et μ d'après les équations de 1 à 7 (voir chapitre 2) et les valeurs obtenues sont regroupés dans le tableau III.2 et peuvent être aussi représentés sous forme d'histogramme (Figure III.4).

La résine présente un module d'Young moyen de GPa, avec un module de cisaillement GPa. Son coefficient de Poisson moyen est de 161, ce qui est représentatif d'un matériau rigide mais faiblement ductile. La bonne répétabilité des résultats montre une homogénéité satisfaisante du matériau. La fréquence de résonance relativement élevée (≈ 1538 Hz) confirme une bonne rigidité vibratoire. Voir tableau 1.

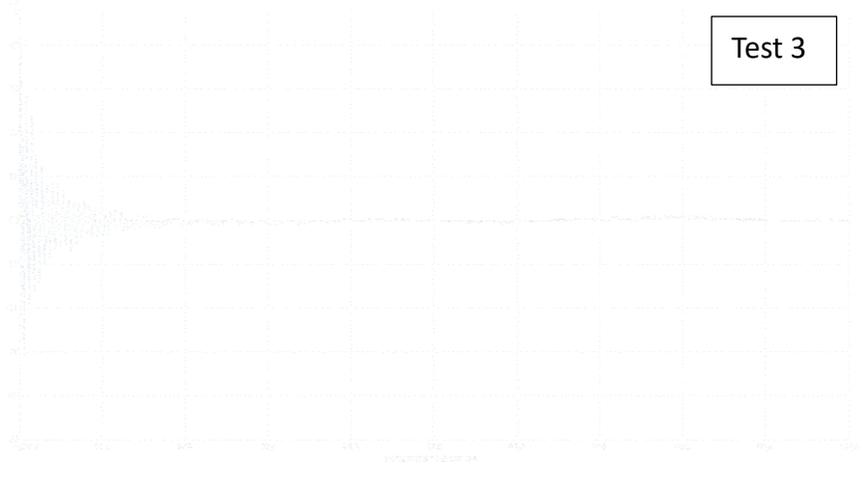
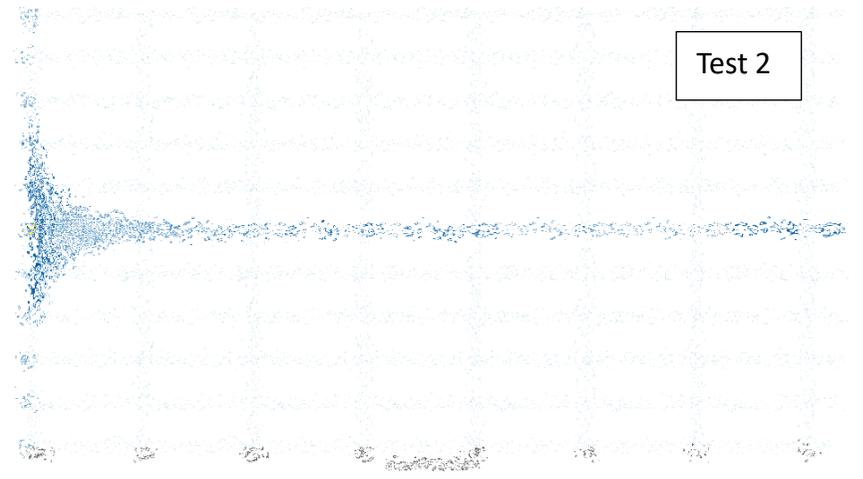
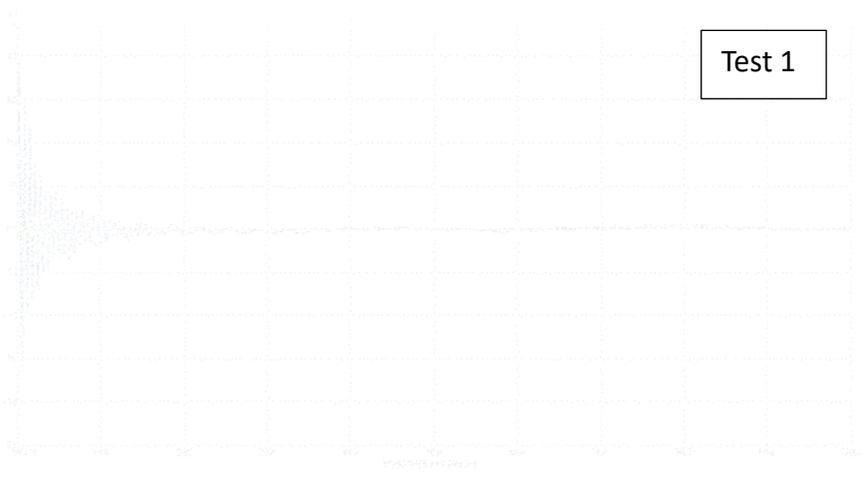


Figure III.3 : Les signaux de réponse vibratoire mesurée pour l'éprouvette en résine.

Tableau III.2 : Fréquences de résonance en flexion d'éprouvettes en résine.

Résine	Fréquences (Hz)	Test 1	Test 2	Test 3	Valeur Moyenne	Standard Déviation
		E				
G						
μ						

Figure III.4 : Représentation graphique des caractéristiques mécaniques de la Résine.

III.6.2 Matériau

Les signaux représentatifs de réponse vibratoire mesurés pour les éprouvettes composite, renforcé par la fibre de verre 0, des quatre degrés sont présentés respectivement dans les figures III.5, III.6, III.7 et III.8. L'analyse des sept premiers cycles de ces signaux permet d'identifier leurs fréquences propres, servant ensuite à la détermination de leurs propriétés élastiques E, G et μ , conformément aux équations 1 à 7 (voir chapitre 2). Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau III.3 et peuvent également être visualisées sous forme d'histogramme (Figure III.9).

Le composite renforcé par montre un module d'Young variant de 9 à GPa selon l'orientation, avec un module de cisaillement compris 675 et 8 GPa. Le coefficient de Poisson est relativement constant est varie entre et 31. Ce matériau est donc sensiblement moins rigide que la résine seule. Les différences en fonction de l'orientation

illustrent une anisotropie mécanique, probablement liée à la microstructure ou à un renforcement directionnel.

L'analyse des fréquences de résonance obtenues pour les échantillons révèle une réponse vibratoire relativement faible comparée à celle des autres matériaux testés, notamment la résine pure ou le composite Jute/V300. Les fréquences mesurées se situent dans une plage modérée, généralement entre 566 Hz et 691 Hz, selon les orientations testées (25°, 45°, 65° et bordure 0/90). Cette gamme de fréquences traduit une rigidité modeste du matériau, en lien avec son module d'Young plus faible.



Figure III.5 : Le signal de réponse vibratoire mesurée de V300 pour L'orientation 0/90.

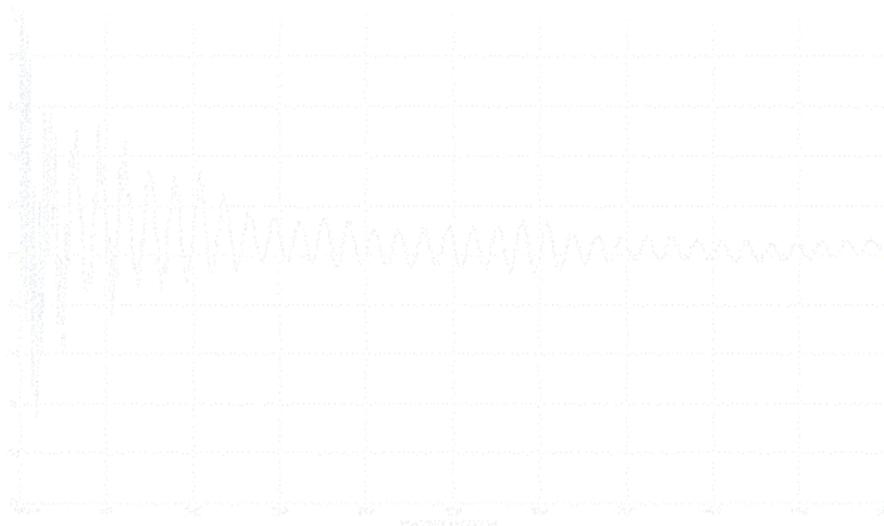


Figure III.6 : Le signal de réponse vibratoire mesurée de V300 pour L'orientation 25°.

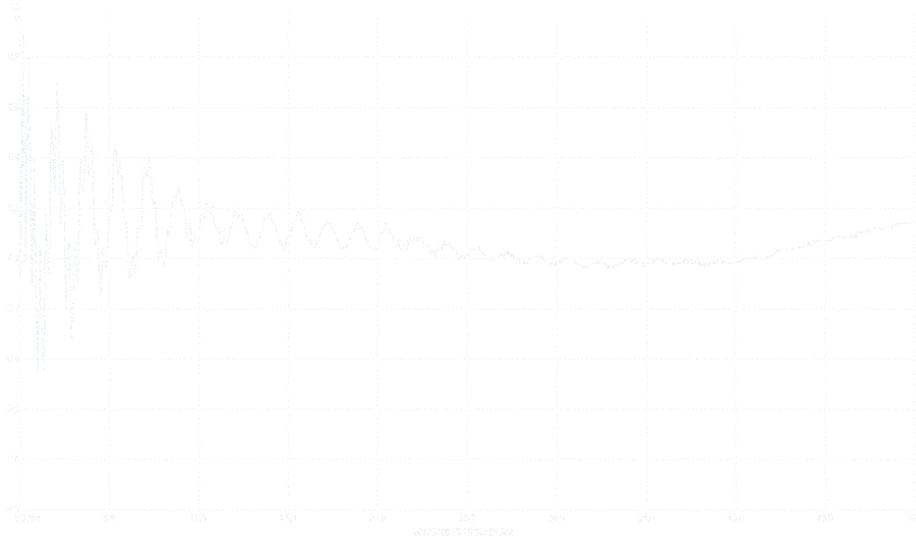


Figure III.7 : Le signal de réponse vibratoire mesurée de V300 pour L'orientation 45°.



Figure III.8 : Le signal de réponse vibratoire mesurée d'échantillon V300 pour L'orientation 65°.

Le spectre vibratoire des échantillons montre des pics bien définis, indiquant une certaine régularité dans la réponse mécanique, mais aussi des amplitudes moins marquées, ce qui pourrait suggérer un taux d'amortissement plus élevé ou une perte d'énergie vibratoire plus

rapide. Ce comportement peut être attribué à la nature plus souple du matériau et à une microstructure interne qui disperse l'énergie vibratoire.

Par ailleurs, les écarts de fréquence selon l'orientation (ex. : différence notable entre) illustrent une anisotropie mécanique significative. Cette variation est probablement liée à l'orientation préférentielle des fibres ou charges, ce qui modifie localement la rigidité dynamique. Une telle anisotropie est typique des matériaux renforcés ou composites, même peu rigides, et doit être prise en compte lors de leur utilisation structurelle. (Voir Fig. III.9).

Tableau III.3 : Fréquences de résonance en flexion du composite renforcé par la fibre de pour quatre orientations degrés.

		Test 1	Test 2	Test 3	Valeurs Moyenne	Standard Déviation
V300	0/90	Fréquence				
		E				
		G				
	μ					
	O25	Fréquence				
		E				
		G				
	μ					
	O65	Fréquence				
		E				
		G				
	μ					
O45	Fréquence					
	E					
	G					
μ						

Figure III.9 : Histogramme des caractéristiques mécaniques du composite V300/polyester pour les quatre orientations

III.6.3 Composite

Les signaux représentatifs de réponse vibratoire mesurés pour les éprouvettes composite, renforcé par les fibres naturelles de jute, des quatre degrés sont présentés respectivement dans les figures III.10, III.11, III.12 et III.13. D'une manière analogue les fréquences propres sont déterminé par les sept premiers cycles des signaux servant ensuite à la détermination de leurs propriétés élastiques E , G et μ , conformément aux équations 1 à 7 (voir chapitre 2). Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau III.4 et peuvent également être visualisées sous forme d'histogramme (Figure III.14).

Les résultats montrent des valeurs très élevées pour le module d'Young (jusqu'à 100 GPa à 45°) et le module de cisaillement (24 GPa), avec un coefficient de Poisson élevé (≈ 0.66 à 45°). Ces valeurs indiquent une rigidité exceptionnelle, mais elles peuvent être influencées par des effets spécifiques aux fibres naturelles de jute (forte densité, organisation structurée). L'orientation a un effet notable sur les propriétés mécaniques : une orientation de 45° maximise le module d'Young. Cela confirme une forte sensibilité directionnelle, typique des matériaux composites à fibres longues.



Figure III.10 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour la bordure.0/90.

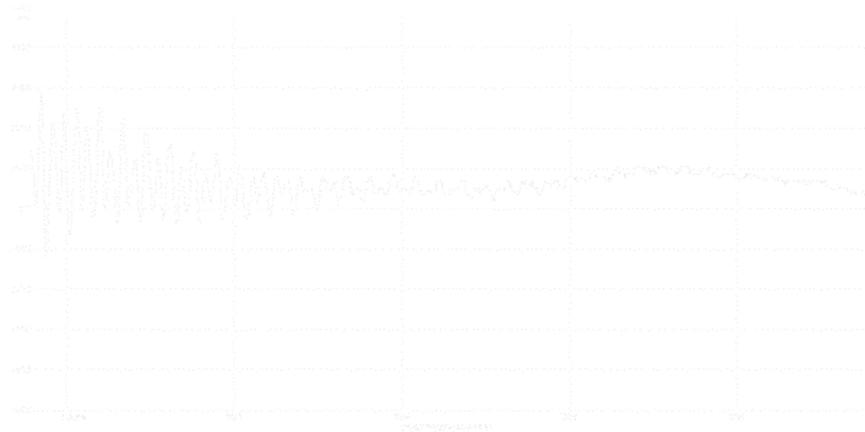


Figure III.11 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation jute 25° .

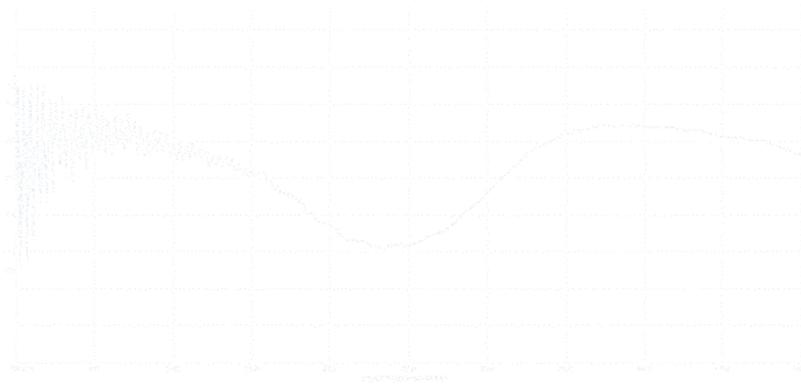


Figure III.12 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation jute 45°.

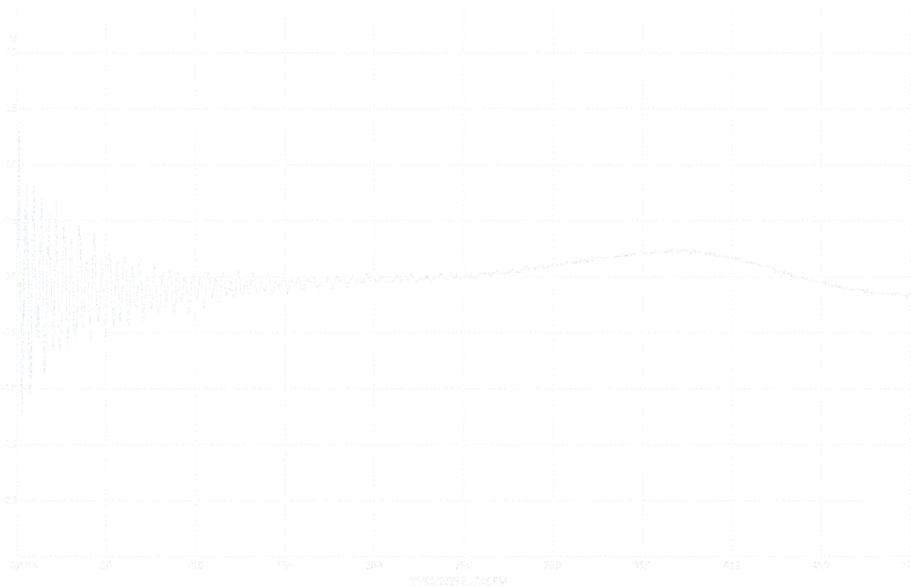


Figure III.13 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE pour L'orientation jute 65°.

Tableau III.4 : La fréquence de résonance en flexion d'un matériau

		Test 1	Test 2	Test 3	Fréquence Moyenne	Standard Déviation
JUTE	0/90	Fréquence				
		E				
		G				
	25	Fréquence				
		E				
		G				
	65	Fréquence				
		E				
		G				
	45	Fréquence				
		E				
		G				



Figure III.14 : Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne

III.6.4 Composite

Les signaux représentatifs de réponse vibratoire mesurés pour les éprouvettes composite, renforcé par les fibres naturelles de JUTE , des quatre orientations

degrés sont présentés respectivement dans les figures III.15, III.16, III.17 et III.18. D'une manière analogue les fréquences propres sont déterminé par les sept premiers cycles des signaux servant ensuite à la détermination de leurs propriétés élastiques E , G et μ , conformément aux équations 1 à 7 (voir chapitre 2). Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau III.4 et peuvent également être visualisées sous forme d'histogramme (Figure III.19).

Le composite JUTE/V300 combine les avantages des deux matériaux précédents. Le module d'Young moyen varie de $18,5$ GPa, et le module de cisaillement de $7,5$ GPa, ce qui représente un gain significatif par rapport au V300 seul. Le coefficient de Poisson est quasi constant autour de $0,48$. Ces résultats confirment une bonne synergie entre les composants, traduisant un comportement composite équilibré entre rigidité, résistance et ductilité.

L'orientation a également un impact mesuré : à 65° , les modules sont légèrement plus élevés, suggérant une orientation fibre-matrice plus favorable à la transmission des efforts mécaniques.

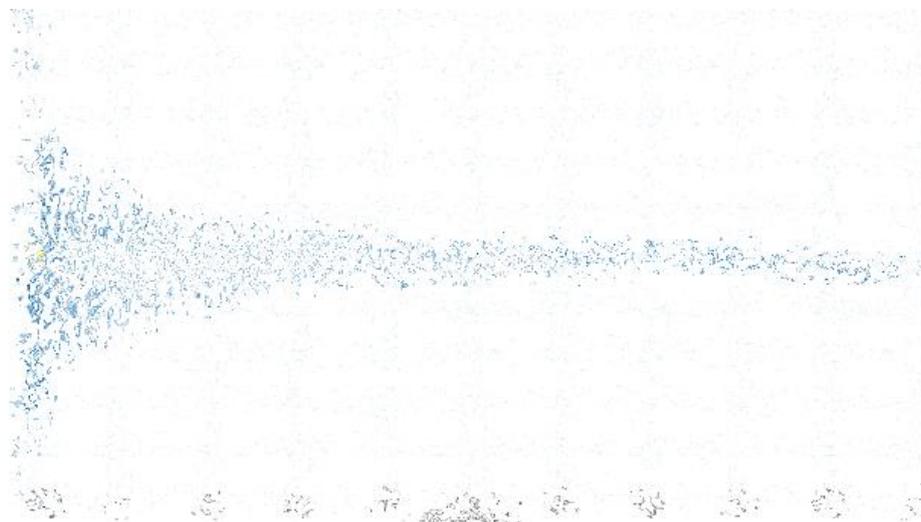


Figure III.15 : Le signal de réponse vibratoire mesurée d'échantillon de JUTE/V300 pour la bordure 0/90.

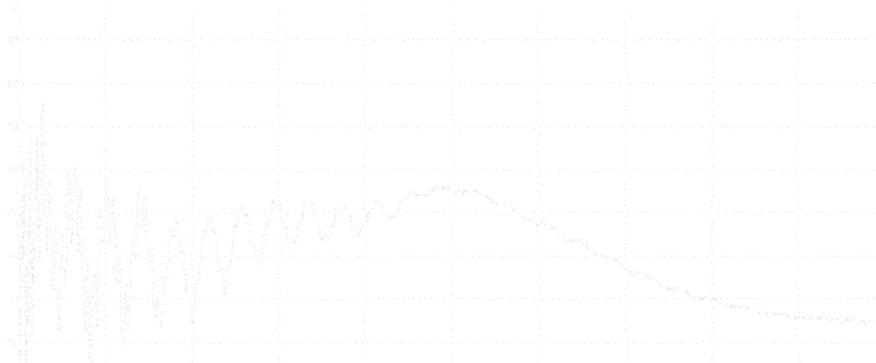


Figure III.16 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 25°.

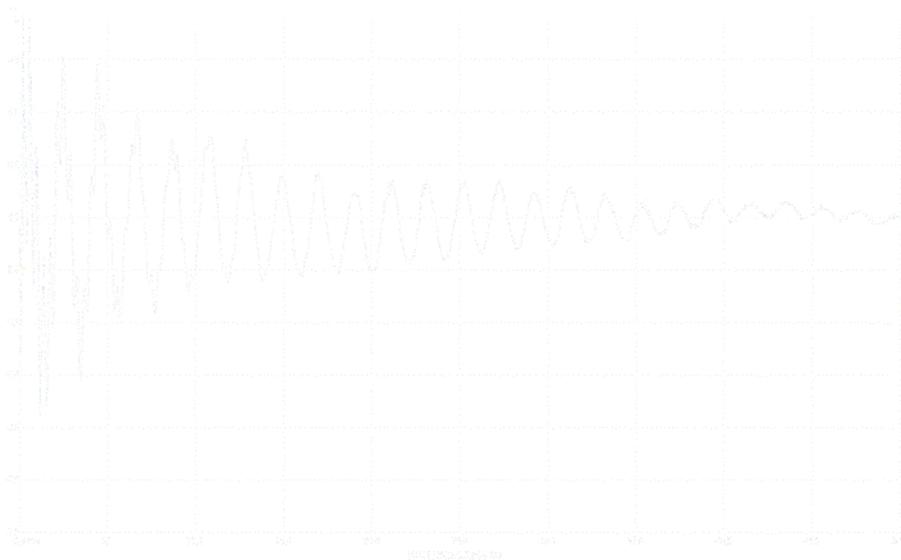


Figure III.17 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 45°.



Figure III.18 : Le signale de réponse vibratoire mesurée d'échantillon JUTE/V300 pour L'orientation jute 65°.

Tableau III.5 : La fréquence de résonance en flexion d'un matériau

		Test 1	Test 2	Test 3	Valeur Moyenne (Hz)	Déviati on Standard
JUTE/V300	0/90	Fréquences				
		E				
		G				
		μ				
	25	Fréquences				
		E				
		G				
		U				
	65	Fréquence				
		E				
		G				
		μ				
	45	Fréquence				
		E				
		G				
	μ					

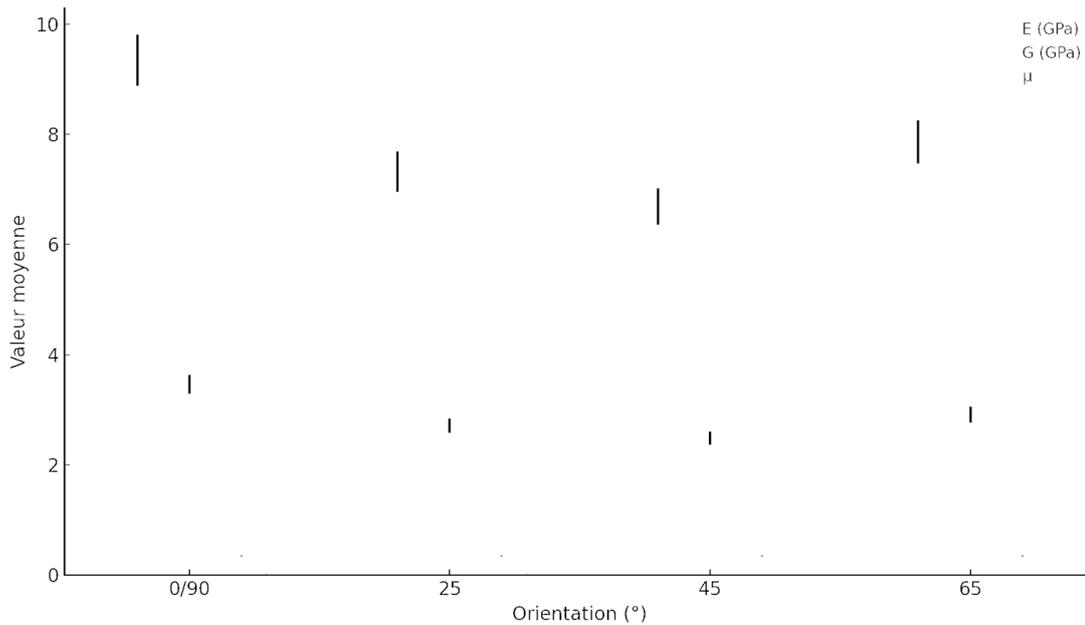


Figure III.19 : Représentation graphique pour comparaison les caractéristiques mécaniques moyenne de l'échantillon Jute/V300.

Module d'élasticité (E)

Le matériau le plus rigide est la résine seule (9.5 GPa), suivi de près par le composite /V300 (8.2 GPa).

Les matériaux V300 seuls ont des rigidités nettement plus faibles (3.5 GPa et 3.0 GPa respectivement).

Module de rigidité (G)

La tendance est similaire à celle du module E : Résine et /V300 affichent des valeurs élevées (7.5 et 6.8 GPa), tandis que V300 et Jute sont plus faibles.

Coefficient de Poisson (μ)

- Jute a le coefficient de Poisson le plus élevé (0.94), indiquant une plus grande déformation transversale.
- La résine a une valeur très faible (0.12), ce qui montre une faible dilatation latérale sous contrainte.
- Les composites hybrides (Jute/V300) se situent entre les deux (0.85 et 0.88), montrant un bon compromis.

Conclusion synthétique

- La résine pure est la plus rigide mais aussi la moins déformable.
- V300 est le matériau le plus souple.
- Le composite V300 combine la rigidité de la résine et l'adaptabilité des fibres naturelles, offrant un excellent équilibre mécanique.
- Jute seul a une rigidité modérée mais un comportement très ductile (fort μ), ce qui peut être utile selon l'application.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la méthode ASTM pour évaluer les propriétés élastiques dynamiques de plusieurs matériaux et composites, via l'analyse de leurs fréquences de résonance. Cette méthode s'est révélée précise, non destructive et parfaitement adaptée pour discriminer les performances mécaniques de matériaux homogènes ou composites.

Les résultats obtenus montrent :

- Une nette différence de rigidité entre la résine, le V300, le jute et le composite
- Une influence significative de l'orientation des fibres sur les propriétés mesurées.
- La supériorité mécanique du composite /V300 sur le V300 seul, confirmant l'apport bénéfique de la fibre de jute.
- La constance du coefficient de Poisson dans chaque matériau, témoignant d'une bonne homogénéité des échantillons.

Enfin, cette méthode s'avère pertinente pour la caractérisation des matériaux, et la validation de conception, particulièrement dans le domaine des matériaux composites, où les propriétés directionnelles jouent un rôle majeur. Elle constitue ainsi un outil fiable pour le développement de nouveaux matériaux et l'analyse fine de leur comportement mécanique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'intégration de fibres naturelles avec des fibres synthétiques, autrement dit, la conception de composites hybrides représente une solution prometteuse pour de nombreuses applications, allant de l'automobile à l'aéronautique. Ces matériaux offrent en effet un compromis performant entre propriétés mécaniques et réduction de l'empreinte écologique.

Ce travail a permis d'explorer, à travers une étude expérimentale rigoureuse, le potentiel de ces matériaux composites renforcés par des fibres naturelles, synthétiques et hybrides. En appliquant la méthode normalisée ASTM , les propriétés mécaniques ont été évaluées de manière non destructive, précise et reproductible. L'analyse vibratoire (modale) a ainsi permis de déterminer des grandeurs essentielles telles que le module d'élasticité (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ).

Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs éléments clés :

- ✓ Une différence marquée de rigidité entre les matériaux étudiés (résine pure, V300, jute,) ;
- ✓ Une influence significative de l'orientation des fibres sur les performances mécaniques ;
- ✓ Un comportement globalement supérieur du composite hybride , soulignant l'intérêt d'une synergie entre fibres naturelles et fibres synthétiques.

L'approche développée constitue ainsi un outil efficace pour la caractérisation mécanique des matériaux composites, tant dans le domaine de la recherche que dans celui du contrôle qualité industriel. Elle ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de nouveaux matériaux éco-conçus, répondant aux exigences de performance et de durabilité des secteurs technologiques modernes.

Références Bibliographiques

- [1] Berthelot, J.-M. (2010). *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures* (2e éd.). Paris : Tec & Doc / Lavoisier.
- [2] GAY, D., HOA, S.V., et TSAI, S.W., *Composite Materials : Design and Applications*, CRC Presse, 1991.
- [3] Saaidia, A. (2018). *Étude de l'influence de la résine polyester sur le comportement des matériaux composites renforcés par fibres végétales* [Thèse de doctorat, Université de Guelma]. DSpace, Université de Guelma. Figure I.3 : « Quelques plantes, origine des fibres utilisées comme renfort dans les matériaux composites ».
- [4] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_\(plante\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_(plante)).
- [5] J.H. Yim, S.Y Cho, Y.J Seo B.Z Jang, A study on material damping of 0° laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer, *Composites structures*, 60 (2003) 367-374.
- [6] Filières de production des fibres végétales pour matériaux composites : extraction, caractérisation et procédés. Note technique interne, France, 2007.
- [7] R.M. Rowell, J.S. Han, J.S. Rowell, Characterization and factors effecting fiber properties in natural polymers and agro fibers-based composites, *Natural polymers and biobased composites* (2000), 115–135.
- [8] Saaidia, A. (2018). *Étude de l'influence de la résine polyester sur le comportement des matériaux composites renforcés par fibres végétales* [Thèse de doctorat, Université de Guelma]. DSpace, Université de Guelma.
- [9] [SAD 78] F. Sadov, M. Korchagin, A. Matetsky *Chemical technology of fibrous materials* 1978.
- [10] S. Saxena, J. Chen, R. Dibble, Maximizing Power Output in an Automotive Scale Multi-Cylinder Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine, *SAE Technical Paper* 2011-01-0907, 2011, doi:10.4271/2011-01-0907.
- [11] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, Textiles traditionnels et textiles techniques, Bois, verre, céramique et textile, *Matériaux, Technique de l'ingénieure*, le 10/04/2013, compte 7200092269 - cerist // 193.194.76.5.

- [12] J. Gassan, I. Mildner, A.K. Bledzki, Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites, *Mechanics of composite materials*, 35 (1999) 435-440.
- [13] Erdem Selver, Hussein Dalfi and Zeshan Yousaf. Investigation of the impact and post-impact behaviour of glass and glass/natural Fiber hybrid composites made with various stacking sequences: Experimental and theoretical analysis. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, Vol. 51(8) 1264–1294, DOI: 10.1177/1528083719900670.
- [14] Manjunathan Karthick, M. Meikandan, S. Kaliappan, M. Karthick, S. Sekar, Pravin P. Patil, S. Raja, L. Natrayan, and Prabhu Paramasivam. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Glass Fiber Hybridized Natural Fiber Reinforced Penta-Layered Hybrid Polymer Composite. Volume 2022, Article ID 1864446, Doi.org/10.1155/2022/1864446.
- [15] Jean-Sébastien Dupuy Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire.
- [16] Ronald F. Gibson. Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures. *Composites Science and Technology* 60 (2000) 2769±278.