

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par : **BENAZI Mohamed Abdelwahab**

Thème

*Optimisation du pourcentage des particules d'Alumine pour améliorer
les propriétés mécaniques d'un matériau composite*

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BENARIOUA Younes	Pr	Président
ELHADI Abdelmalek	MCA	Encadreur
BENHAMADOUCHE Lamia	MCA	Examinatrice

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé dans la réalisation de ce mémoire

Tout d'abord, un immense merci à mon encadrant pour ses conseils précieux son accompagnement et sa disponibilité.

Je remercie également ma famille, qui m'a toujours soutenu moralement et encouragé à persévérer dans les moments difficiles.

Un grand merci à mes amis et camarades de promotion pour leur aide, leur motivation et tout moment de partage qui ont rendu cette expérience plus agréable.

Enfin, je me remercie moi-même pour avoir tenu bon jusqu'au bout, malgré le stress et les nuits blanches.

- A tous, Grand Merci -

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour leurs soutiens indéfectibles tout au long de ce parcours académique.

À mes amis pour leurs présences et leurs encouragements.

À mes professeurs pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés.

Ce mémoire est le fruit de vos efforts combinés et je vous en suis profondément reconnaissant.

Résumé

L'intégration de particules d'alumine (Al_2O_3) dans un matériau composite à matrice époxy et renforts de jute (fibres naturelles) sous forme de tissu bidirectionnel est une méthode courante pour renforcer les propriétés mécaniques du matériau, telles que la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la traction et la rigidité. L'optimisation du pourcentage d'alumine est essentielle pour atteindre la performance mécanique du matériau composite. Pour ce faire, le matériau composite hybride étudié a été fabriqué par stratification manuelle, et les éprouvettes préparées ont été soumises à des essais de traction. Les résultats expérimentaux ont montré que l'inclusion d'une quantité de particules d' Al_2O_3 améliorait les caractéristiques mécaniques de ce composite hybride.

Mots-clés : Matériau composite, Tissus de jute, Alumine, Essai de traction, Propriétés mécaniques.

ملخص

إن دمج جسيمات الألومين (Al_2O_3) في مادة مركبة ذات مصفوفة من الإيبوكسي مدعّمة بألياف الجوت (ألياف طبيعية) على شكل نسيج ثنائي الاتجاه يُعد من الطرق الشائعة لتحسين الخصائص الميكانيكية للمادة، مثل الصلابة، ومقاومة التآكل، ومقاومة الشد، والصلادة. وتُعدّ عملية تحسين النسبة المثلى من الألومين أمراً أساسياً لتحقيق الأداء الميكانيكي المطلوب للمادة المركبة. ولتحقيق هذا الهدف، تم تصنيع المادة المركبة الهجينة المدروسة بتقنية التصفيح اليدوي، وتم إعداد العينات لإجراء اختبارات الشد. وقد أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة كمية مناسبة من جسيمات الألومين (Al_2O_3) يُحسن بشكل واضح الخصائص الميكانيكية لهذا المركب الهجين.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، أنسجة الجوت، الألومينا، اختبار الشد، الخواص الميكانيكية.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAU

CHAPITRE I:

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1. INTRODUCTION :	3
I.2. DÉFINITION.....	3
I.3. CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES :.....	4
I.3.1. CLASSIFICATION EN FONCTION DES NATURES DES MATRICES.....	4
I.3.2. CLASSIFICATION EN FONCTION DES NATURES DES RENFORTS.....	5
I.3.3. FIBRES NATURELLES	5
I.3.4. FIBRES SYNTHÉTIQUES	6
I.4. DOMAINE D'APPLICATION DES COMPOSITES.....	7
I.5. CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES MATÉRIAUX COMPOSITES	8
I.5.1. LES MATRICES	8
I.5.1.1. LES RÉSINES THERMOPLASTIQUES	9
I.5.1.2. LES RÉSINES THERMODURCISSABLES :	10
I.5.1.3. LES RÉSINES EN CÉRAMIQUE	10
I.5.1.4. LES RÉSINES MÉTALLIQUES.....	11
I.5.2. LES RENFORTS	11
I.5.2.1. LES FIBRES DE VERRE.....	12
I.5.2.2. FIBRES DE CARBONE.....	14
I.5.2.3. FIBRES D'ARAMIDE.....	15
I.5.2.4. FIBRES CÉRAMIQUES	15
I.5.2.5. AUTRES TYPES DE FIBRES :	16
I.6. PLANTE DE JUTE:	16

I.7. LA FIBRE DE JUTE	17
I.8. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES FIBRES DE JUTE	18
I.9. DOMAINE D'APPLICATION DE JUTE	18
I.10. FABRICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES :	20
I.11. PROCESSUS GÉNÉRAL DE FABRICATION DES COMPOSITES	21
I.12. POUDRE D'ALUMINE	22
I.12.1. STRUCTURE	23
I.11.2. PROPRIÉTÉS PRINCIPALES	23
I.13. EFFET DE LA POUDRE D'ALUMINE SUR LES PROPRIÉTÉS DES COMPOSITES :	23

CHAPITRE II:

MATERIAUX ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISE

II. INTRODUCTION	26
II. 1. MATÉRIAUX UTILISÉ	26
II.1. 1. RÉSINE EPOXY	26
II.2. TISSU DE JUTE :	27
II.3. ELABORATION DES COMPOSITES HYBRIDE JUTE-ALUMINE/ÉPOXY :	27
II.4. USINAGE DES ÉPROUVETTES :	30
II.6. DIMENSIONS DE L'ÉPROUVETTE DE TRACTION	31
II.7. MACHINE DE TRACTION	32
II.8. PRINCIPE D'ESSAI DE TRACTION :	33
II.8.1. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES	33
II.8.1.1. ALLONGEMENT	34
II.8.1.2. COEFFICIENT DE STRICTION (Z%)	34
II.8.1.3. MODULE D'ÉLASTICITÉ LONGITUDINALE (MODULE D'YOUNG) (E)	34

CHAPITRE III:

RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS ET DISCUSSION

III.1. INTRODUCTION :	36
III.2. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU MATÉRIAU À UNE VITESSE DE TRACTION DONNÉE	36
III.3. ANALYSE DES COURBES :	39

III.4. MESURE RÉELLE DES SECTIONS DE LA PARTIE DE RÉFÉRENCE DES ÉPROUVETTES.....	40
III.5. RÉSULTATS OBTENUS.....	41
III.5.1. VARIATION DE LA RÉSISTANCE DE TRACTION À LA RUPTURE RM EN FONCTION DU POURCENTAGE DE LA POUDRE D'ALUMINE	42
III.5.2. EVOLUTION DE L'ALLONGEMENT À LA RUPTURE (A%) DU MATÉRIAU EN FONCTION DU POURCENTAGE DE LA POUDRE D'ALUMINE	43
III.5.3. VARIATION DU COEFFICIENT DE STRICTION Z% DU MATÉRIAU EN FONCTION DU POURCENTAGE DE LA POUDRE D'ALUMINE.	44
III.5.4. VARIATION DU MODULE DE YOUNG DU MATÉRIAU EN FONCTION DU POURCENTAGE DE LA POUDRE D'ALUMINE	46
CONCLUSION GENERALE.....	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

LISTE DES FIGURES

Figure .I.1 : Constituants d'un matériau composite.	4
Figure .I.2 : Différents constituants d'un matériau composite [6].	8
Figure .I.3 : Organigramme des différentes familles de matrice [7].	9
Figure .I.4 : Les différents types de renfort de base [13]	12
Figure .I.5 : Les différents types de renfort de base [14]	12
Figure .I.6 : Fibres de Graphite (a) ; (b) fibre de Carbone [15].	14
Figure .I.7 : Fibres d'aramide [16].	15
Figure .I.8 : Plante de jute.	16
Figure .I.9 : Fibres et tissus de jute.	17
Figure .II.1 : (a) Tissu de jute bidirectionnel ; (b) Poudre d'alumine.	27
Figure .II.2 : Mécanisme utilisé pour mélanger la résine avec la poudre d'alumine.	28
Figure .II.3 : Différentes étapes de la fabrication du composite hybride.	29
Figure .II.4 : a) Machine à découper d'une scie circulaire ; b) Machine à commande numérique.	30
Figure .II.5. Eprouvette après usinage.....	30
Figure .II.5. Machine de polissage.	31
Figure .II.6. Eprouvette de traction (Haltère) [26].	32
Figure .III.1 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur Poudre d'alumine (0%).....	36
Figure .III.2: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (05%)	37
Figure .III.3: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (10%)	37
Figure .III.4: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (15%)	38
Figure .III.5: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (20%)	38
Figure .III.6. Variation de la résistance R_m en fonction du pourcentage	43
Figure .III.7. Evolution de l'allongement à la rupture ($A\%$) du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.	44

Figure .III.8. Variation du coefficient de striction $Z\%$ en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine..... 45

Figure . III.9. Variation du module de Young du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine..... 46

LISTE DES TABLEAU

Tableau I- 3: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [14] [15]......	10
Tableau I- 3: Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.	10
Tableau.III.1 : Sections des éprouvettes avant et après les essais de traction.	13
Tableau.III.3 : Coefficient de striction (Z%)......	41
Tableau. III.4 : Valeurs des caractéristiques mécaniques résultantes des essais de traction en fonction de la teneur d'alumine.	42

NOMENCLATURE

A% : coefficient d'allongement

F : La force

ΔL : L'allongement

S_0 : Section initiale

L: La longueur initiale

R_e : résistance limite élastique

R_r : résistance à la rupture

E : Le module de Young (module d'élasticité longitudinal).

σ : La contrainte

F_0 : la force initiale

ε : La déformation

R_m : La résistance à la traction

L_u : longueur ultime

S_u : Section ultime

Z% : Valeurs de Coefficient de striction

d_0 : diamètre initial

L_0 : longueur de référence

L_C : longueur calibrée

V : La vitesse

H : dureté Vickers,

d: diagonale moyen de l'empreinte.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux composites occupent une place prépondérante dans de nombreux domaines industriels grâce à leur capacité à allier légèreté, résistance et durabilité. Parmi les différents types de composites, ceux renforcés par des particules céramiques, telles que l'alumine (Al_2O_3) qui présentent un intérêt particulier en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. L'alumine, en tant que renfort, contribue à améliorer la dureté, la résistance à l'usure et la rigidité du matériau composite.

Cependant, l'efficacité de ce renforcement dépend fortement de la proportion des particules d'alumine incorporées dans la matrice. Un taux trop faible pourrait ne pas produire l'effet désiré, tandis qu'un taux trop élevé pourrait entraîner des défauts de fabrication, des problèmes d'homogénéité ou une fragilisation du matériau. Ainsi, l'optimisation du pourcentage de particules d'alumine est cruciale pour atteindre un compromis optimal entre performance mécanique, coût et faisabilité technique.

Ce travail vise donc à étudier l'effet du pourcentage de particules d'alumine sur les propriétés mécaniques d'un matériau composite, et à identifier la teneur optimale permettant d'obtenir les meilleures performances à travers une démarche expérimentale et analytique. Le contenu du mémoire est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre est une recherche bibliographique, traite des généralités sur les matériaux composites.

Le deuxième chapitre concerne à étudier les différents dispositifs techniques utilisés durant la fabrication et l'élaboration du matériau sous forme des éprouvettes de traction, la machine utilisée pour la réalisation des essais de traction et les mesures effectuées avant et après essais.

Le troisième chapitre étudie le regroupement des résultats, l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1. Introduction :

Un matériau composite est un assemblage constitué au minimum de deux matériaux qui ne fusionnent pas mais qui ont une forte capacité d'adhésion. Ils sont assemblés en une structure particulière qui lui donne ses caractéristiques. Plusieurs structures de matériaux composites sont de plus en plus adaptées, dans des domaines très variés, tels que l'aéronautique pour améliorer la tenue en service et par conséquent la durée de vie.

Matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [1]. Une interphase se crée entre les deux constituants et aura pour rôle de transmettre les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement d'où l'établissement d'une bonne adhérence.

Dans certain cas, l'identification des composants du matériau composite peut être identifiée à l'œil nu, comme les poutres de béton armé renforcé par les barres métalliques. Mais il existe différents matériaux qui sont combinés à l'échelle microscopique, telle que les alliages des métaux [2]. Le matériau qui résulte est en pratique homogène macroscopiquement, et ces composants ne peuvent être considérés qu'un seul élément.

I.2. Définition

En général, le terme "composite" désigne un matériau composé de deux ou plusieurs éléments distincts. Les composites sont parfois désignés par certains auteurs sous le nom de multi-matériaux. En réalité, l'expression "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, comme nous le verrons tout au long de ce mémoire.

Plus précisément, un matériau composite est par définition toute matière première qui contient un renfort associé à au moins deux autres composants, se combinant et créant un matériau hétérogène dont les performances globales sont supérieures à celles des composants pris individuellement. La notion d'un agent de liaison est introduite par le renfort et la matrice (**Figure I.1**), qui doivent être compatibles et se renforcer mutuellement [3].



Figure I.1 : Constituants d'un matériau composite.

Il existe d'autres définitions plus restrictives. Ainsi, dans l'industrie, le terme « composites » n'est utilisé que pour quelques familles de matériaux modernes à base de résines plastiques, de céramiques, de carbone ou de métaux, renforcés par des fibres. Cependant, la définition ci-dessus peut s'appliquer à des « multi-matériaux » plus anciens comme le torchis un des premiers matériaux de construction utilisé par l'homme ou le béton armé, et même à des matériaux naturels comme le tissu osseux ou le bois qui, bien que n'étant pas fabriqués par l'homme. En revanche, les alliages métalliques ne peuvent généralement pas être qualifiés de composites, même lorsqu'ils sont hétérogènes, leur structure ne participe habituellement pas à la sélection ou à l'émergence de propriétés particulières. Il existe toutefois quelques exceptions, comme l'acier de Damas utilisé depuis l'antiquité pour la fabrication des armes blanches ; les lames forgées dans cet acier sont constituées d'une alternance de couches fragiles (dures) et ductiles (résistantes aux chocs), ce qui leur permet de conserver leur tranchant. Une telle structure « par couches », dite stratifiée, se retrouve dans de nombreux composites [4].

I.3. Classification des matériaux composites :

Les composites sont classés selon la nature des composants, ou aussi selon leurs performances et leurs couts.

I.3.1. Classification en fonction des natures des matrices

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en :

Composite à matrice organique

Utilisé pour des $T^{\circ} < 300^{\circ}\text{C}$, constituent de loin les volumes les plus importants en industries. Ils possèdent des coûts de revient généralement assez bas pour permettre une production de masse, il s'agit des composites les plus courants, et qui vont être décrits par la suite.

Composite à matrice métallique

Utilisé pour des $T^{\circ} < 600^{\circ}\text{C}$. La matrice de ces matériaux est un métal léger tel que l'aluminium,

le magnésium ou le titane.

Composite à matrice céramique

Utilisé pour des $T^{\circ} < 1000^{\circ}\text{C}$, réservé aux applications de pointes et travaillant à haute températures (spatial, nucléaire et militaire, etc.). Beaucoup plus coûteux, il s'agit d'une matrice de céramique renforcée de fibres courtes ou de filaments.

I.3.2. Classification en fonction des natures des renforts

La classification des matériaux composites selon la nature des **renforts** se fait principalement en trois grandes catégories :

Composites à renforts particuliers :

- Les renforts sont des particules (métalliques, céramiques ou polymères).
- Exemple : composites à matrice métallique renforcés par des particules de céramique.
- Utilisés pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure.

Composites à renforts fibreux :

- Les renforts sont des fibres (courtes, longues ou continues).
- Exemples : fibres de verre, de carbone, d'aramide.
- Ce sont les plus courants dans l'aéronautique, l'automobile, etc.
- Offrent une excellente résistance mécanique.

Composites à renforts structuraux :

- Formés par l'assemblage de structures renforçantes [5] complexes (nids d'abeilles, stratifiés).
- Fournissent des propriétés mécaniques élevées tout en étant légers.
- Utilisés dans des applications avancées (ex. : aérospatiale).

I.3.3. Fibres naturelles

Se divisent en :

❖ Fibres d'origine végétale (cellulosiques)

Les fibres végétales sont des composés de cellulose plus ou moins pure provenant de différentes parties de la plante telles que les fibres de l'écorce des graines de cotonniers, le kapok, les fibres des feuilles, les fibres de coco, les fibres d'ananas, les fibres de l'écorce de bois. Les fibres végétales sont des celluloses pures les plus utilisées couvrant 50 % de toutes les fibres.

❖ Les fibres d'origine animale (protéiques)

Ce sont des fibres protéiques animales telles que les laines de chèvre, les laines du mouton, les fibres de soie. Ces fibres ont des propriétés similaires aux protéines. En présence d'eau, la ténacité et la rigidité sont réduits, en cas d'exposition longtemps au soleil provoque la carie ou le cadre.

❖ Les fibres d'origine minérale (silicatées)

L'une des fibres d'origine minérale est l'amiante qui résiste aux produits chimiques, à la chaleur et ne conduit pas d'électricité. L'amiante est utilisé dans la fabrication du vêtement anti-feu (vêtement ignifugé) pour les pompiers, des tuiles et du caoutchouc [5].

I.3.4. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont des composés synthétiques, fabriquées à partir des composés inorganiques ou organiques à l'aide de fibres naturelles renouvelables.

Les fibres synthétiques à partir des produits chimiques

❖ Les fibres synthétiques organiques :

Les fibres synthétiques organiques sont : le polyamide, le polyuréthane et la fibre acrylique.

Exemple : les fibres synthétiques de polyamides telles que le nylon 6-6, 6-10, 11, 6. Les chiffres suivis du nom de nylon indiquent le nombre d'atomes de carbone présent dans leur monomère.

Le nylon 11 formé à partir d'un seul type de monomère qui possède 11 atomes de carbone. Ce monomère fait d'unités répétitives liées entre elles par les liaisons amides.

Le nylon 6-10 formé à partir de deux types de monomères qui possèdent 6 et 10 atomes de carbone respectivement liées entre elles par les liaisons amides.

Les fibres synthétiques minérales

La fibre synthétique minérale telle que la fibre de verre possède des propriétés similaires à l'amiante. La fibre de verre est utilisée pour renforcer la structure des matériaux résistants. En outre, la fibre de verre possède également des fibres métalliques en fil aussi petit que le fil de soie, le fil de l'acier, le fil du cuivre.

❖ Les fibres synthétiques à partir des substances naturelles

L'acétate de cellulose est obtenu par la réaction entre la cellulose et l'acide acétique concentré en présence du catalyseur d'acide sulfurique. L'acétate de cellulose peut être filé et donne des fibres artificielles aux noms divers : rayonne, soie artificielle, viscose. De grandes quantités sont actuellement filées sous forme de câbles d'acétate de cellulose pour les filtres à cigarettes .

I.4. Domaine d'application des composites

Les principaux domaines d'application des matériaux composites :

- Aéronautique et aérospatiale

- Structures d'avion, ailes, fuselages, satellites.
- Avantages : légèreté, résistance mécanique élevée, résistance à la corrosion.

- Automobile

Carrosseries, tableaux de bord, pièces de structure et composants de performance (freins, suspensions). Utilisé dans les voitures de sport et de compétition pour alléger les véhicules
Objectif : réduire le poids et améliorer l'efficacité énergétique.

- Bâtiment et génie civil

Renforcement de structures, poutres, ponts, façades, matériaux de revêtement, panneaux sandwichs et armatures de béton.

Avantages : durabilité, résistance aux agents chimiques et à l'humidité.

- Equipements sportifs et loisirs

- Vélos, raquettes, skis, planches de surf, bateaux.
- Pour : légèreté, performance, design sur mesure.

- Energie

- Pales d'éoliennes, tuyauterie dans le pétrole et le gaz, isolants thermiques.
- Atouts : résistance à la fatigue et aux environnements extrêmes.

- Électronique et télécommunications :

- Boîtiers, circuits imprimés, composants isolants.
- Utilisation pour leurs propriétés électriques et thermiques spécifiques.

2.

- **Marine**

- **Coques de bateaux, mâts, équipements sous-marins**
- **Résistance à l'eau salée et aux chocs**
- **Médical**

- **Prothèses, implants dentaires, équipements de radiologie**
- **Biocompatibilité, légèreté et précision**

I.5. Constituants principaux des matériaux composites

Un matériau composite résulte de l'association d'une matrice, d'un élément de renforcement, ainsi que de divers additifs et adjuvants (tels que les agents de démoulage ou stabilisants). Lorsque le composite est intact, la matrice et les renforts sont intimement liés, sans mouvement relatif ni séparation entre les phases. Cette cohésion structurelle est essentielle pour garantir des performances mécaniques optimales.

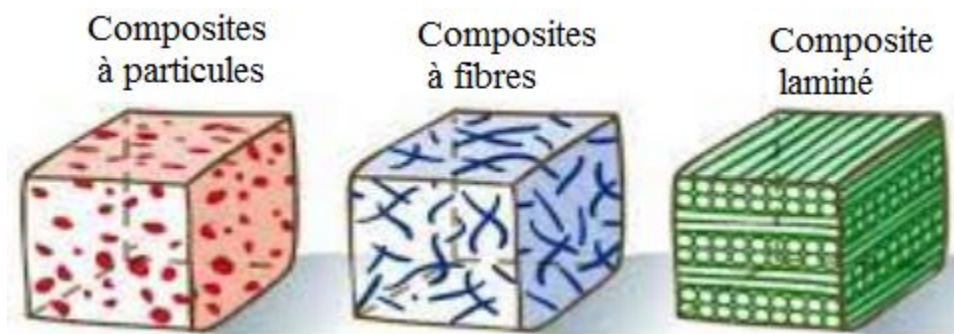


Figure.I.2: Différents constituants d'un matériau composite [6].

I.5.1. Les matrices

En raison de leurs très faibles diamètres (généralement compris entre 10 et 20 μm), les fibres ne peuvent être utilisées seules dans des applications mécaniques. D'où la nécessité de les intégrer dans une matrice polymère afin de former un composite à fibres. La matrice, qui joue le rôle de liant polymérique, assure le maintien du renfort en lui conférant sa forme et en garantissant la cohésion de l'ensemble. Elle est responsable du transfert des efforts mécaniques entre les fibres et contribue aux propriétés physico-chimiques du matériau final. Sa fonction principale est de structurer les renforts dans un ensemble compact, tout en donnant au composite sa géométrie finale. Par ailleurs, la matrice protège les fibres contre l'abrasion, les agressions chimiques ou climatiques, et favorise une répartition efficace des charges.

Selon la nature chimique de la matrice, on distingue différents types de composites : organiques, métalliques ou minéraux [7].

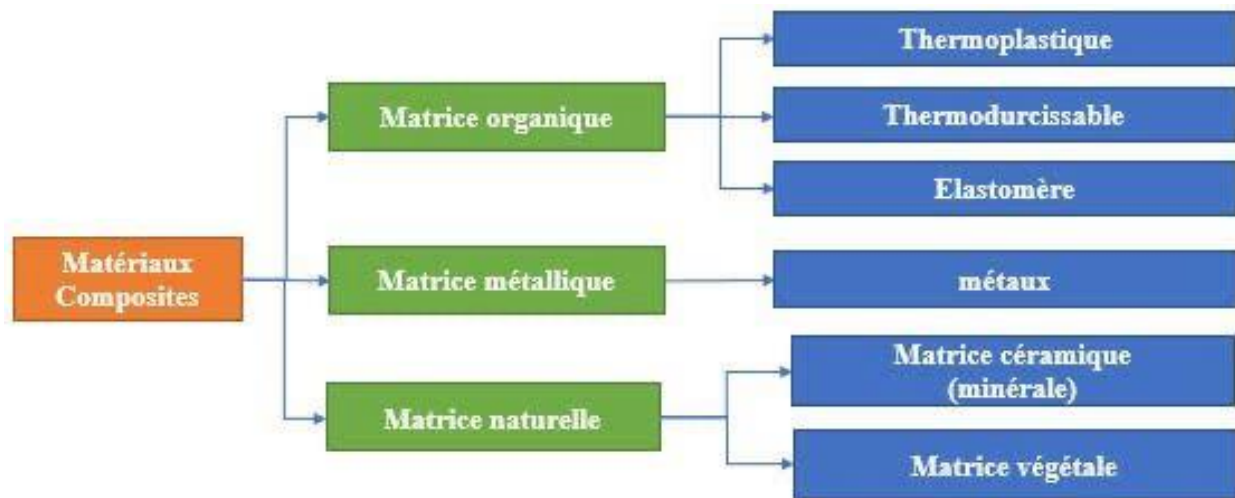


Figure .I. 3: Organigramme des différentes familles de matrice [7].

La matrice composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production.

Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée [8].

I.5.1.1. Les résines thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons, elles se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) qu'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement, les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boites alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, etc. Leur recyclabilité et leur thermo-réversibilité constituent l'un des grands avantages qui prend de plus en plus d'importance dans la protection de l'environnement [9].

Tableau I- 1: Caractéristiques des résines thermoplastiques [9].

Résines	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance (MPa)	Module d'Young (GPa)
Polypropylène	0.9	30	1.2
Polyamide	1.1	70	2

I.5.1.2. Les résines thermodurcissables :

Les polymères thermodurcissables ne peuvent être modelés qu'une seule fois (non recyclables), mais ont des caractéristiques mécaniques et thermomécaniques supérieures aux thermoplastiques.

Ils sont liquides visqueux et sont formés par une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification. Les polyesters insaturés (vinyle ester, les dérivés) sont les plus connus.

Les polyesters condensés, les résines allyliques, les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes, etc.) sont tous des types de résines [9]. Les thermodurcissables présentent de nombreux avantages fondamentaux significatifs par rapport à eux, tels que la résistance à la fatigue et à l'impact, la durabilité et la résistance à la corrosion.

Tableau I- 2 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [10].

Résines	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance à la rupture (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Polyester	1.2	80	4	2.5
Epoxy	1.1-1.5	130	4.5	2

I.5.1.3. Les résines en céramique

Les matrices en céramiques se constituent d'un ou plusieurs métaux associés à un élément, généralement l'oxygène, tels que l'AL₂O₃ (Alumine), la SiO₂ (Silice) et la Mg O (Magnésie). De manière beaucoup moins courante que leurs concurrents à matrice organique en raison de leur coût élevé, ils sont destinés aux applications à des températures extrêmement élevées. Dans

l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ils sont principalement employés pour la fabrication des disques ou des plaquettes de freins [11]. Les céramiques ont de nombreux avantages, elles peuvent être utilisées à des températures extrêmement élevées, elles sont plus légères que de nombreux métaux et elles ont une stabilité chimique assez bonne.

I.5.1.4. Les résines métalliques

Ce genre de résines est employé en tant que liant dans des domaines qui exigent un matériau avec des caractéristiques spécifiques appropriées et une excellente résistance à la température. Actuellement, ces applications sont rares et se concentrent sur les secteurs de pointe en raison des frais de mise en place et de la complexité d'intégration. Les alliages d'aluminium sont les matrices les plus couramment employées jusqu'à présent. Le carbone et les fibres céramiques sont les fibres employées [12].

I.5.2. Les renforts

Les renforts, généralement sous forme de fibres, ont pour objectif principal d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux composites (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer les caractéristiques physiques, comme les résistances au feu et à l'abrasion, la résistance à la température ou les propriétés électriques. Les renforts sont souvent recherchés pour leur faible masse volumique, leur compatibilité avec les matrices et leur facilité d'utilisation. Il existe différentes formes de renforts composés de fibres : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus) [13]. La figure I-4 présente la classification des types de renforts fréquemment rencontrés.

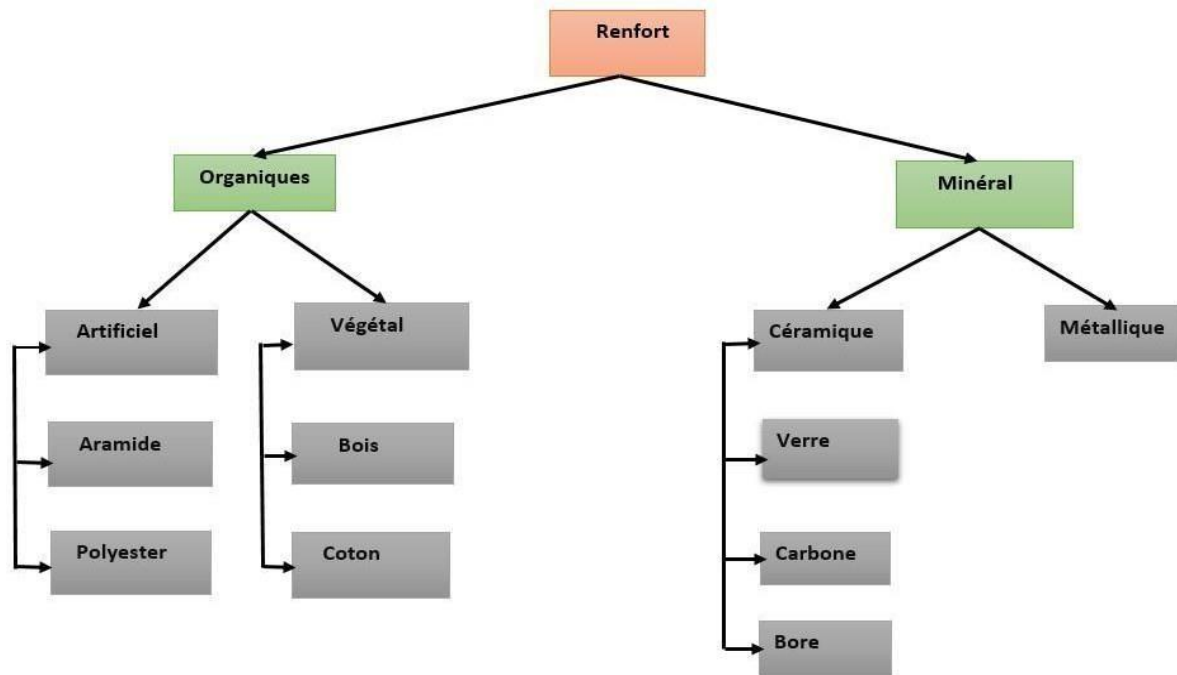


Figure.I.3 Les différents types de renfort de base [13]

I.5.2.1. Les fibres de verre

Le rapport qualité-prix des fibres de verre est placé en tête des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Ces derniers ont un faible module de traction, mais une résistance intéressante en traction [14]. Les silicates sont leur composante. Ils se divisent en :

Verre E : A usage général avec de bonnes propriétés électriques.

Verre D : Il a de bonnes propriétés diélectriques pour l'utilisation en électronique (circuit imprimé).

Verre C : Il a une bonne résistance chimique, pour les couches superficielles des structures sur le plan chimique.

Verre R et S : Ont une haute résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales.



Tissu Chaotique de verre



Tissu de verre bidirectionnel

FigureI.4: Les différents types de renfort de base [14]

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

Tableau I- 3: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [14] [15].

I.5.2.2. Fibres de carbone

Les fibres de carbone se présentent sous la forme de filaments minces constituées de carbone élémentaire, avec des structures distinctes, allant du carbone amorphe au graphite cristallin. Ces fibres sont fabriquées en utilisant un polymère de base connu sous le nom de précurseur. Les caractéristiques chimiques et physiques des fibres de carbone finales sont fortement influencées par les caractéristiques du précurseur.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone sont extrêmement puissantes, avec une résistance pouvant aller jusqu'à 200 à 300 GPa. Elles sont fréquemment utilisées comme renfort dans les composites polymères rigides [15].

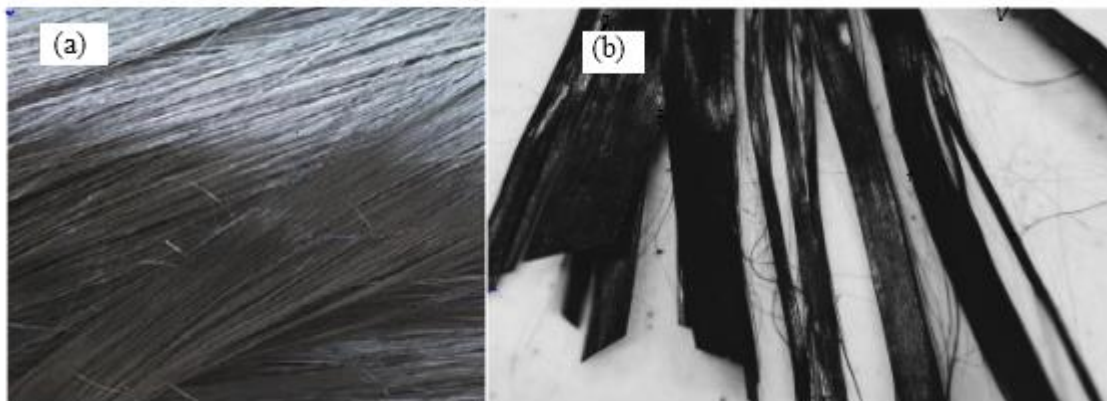


Figure.I.5 : Fibres de Graphite (a) ; (b) fibre de Carbone [15].

Le tableau I.3 indique quelques caractéristiques mécaniques des fibres HR (Haute Résistance) et fibres HM (Haut Module).

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM
Résistance en traction (MPa)	3400/4500	2000/2500
Module en traction (GPa)	230/250	390/450
Allongement à la rupture (%)	1.4/1.8	0.5/0.6
Résistance en compression (MPa)	2200/2800	1300/1700

Tableau I- 3: Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.

I.5.2.3. Fibres d'aramide

Les polyamides aromatiques qui contiennent les groupes aromatiques plus fortement que 85% s'appellent l'aramides (Fig.I.7) et sont connues par le Kevlar. Ils sont une famille de fibres synthétiques très résistantes, connues pour leur excellente résistance mécanique et leur stabilité thermique. Elles sont souvent utilisées dans des applications exigeantes, comme les gilets pare-balles, les composites aéronautiques, et les équipements de protection.). Elles ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leur résistance à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymes des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides [16]. Des renforts hybrides de type verre kevlar ou carbone. Kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis.....,etc).



Figure.I.6: Fibres d'aramide [16].

I.5.2.4. Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres ont des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C.

Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions [17]. Les fibres céramiques les plus utilisées sont :

I.5.2.5. Autres types de fibres :

Cette partie rassemble tous les autres types de fibres non citées auparavant. Ces fibres sont généralement utilisées pour des applications spécifiques (papiers spéciaux, pour une bonne conductivité électrique). Elles possèdent des modules d'élasticités relativement faibles par rapport aux autres fibres déjà citées [17].

I.6. Plante de jute:

Le jute blanc (*Corchorus capsularis*) est une plante de la famille des Malvacée, originaire d'Asie, cultivée dans les régions tropicales pour les fibres libériennes de ses tiges.

Ces fibres sont employées dans la confection de sacs d'emballage, nattes, vêtements grossiers etc. La partie restante après l'extraction des fibres est utilisée dans l'industrie papetière. Le papier est gris chamois.

Les feuilles et les graines sont comestibles et contiennent un fort taux de protéines (Fig.I.8), des feuilles, racines, graines et fruits verts sont utilisés en médecine [18].



Figure.I.7: Plante de jute.

Parmi les nombreuses espèces du genre *Corchorus* (sous-famille des Grewioideae, famille des Malvacées, ou des Tiliacées selon la classification classique), deux plantes

herbacées sont appelées jute :

Le jute blanc, *Corchorus capsularis* L.

Le jute rouge ou jute tossa, *Corchorus olitorius* L. (corète potagère), un peu moins utilisé

Au sens légal, « le jute est la fibre textile provenant du liber du *Corchorus clitoris* et du *Corchorus capsularis* » [18]

I.7. La fibre de jute

La fibre de jute exploitable correspond aux vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale, elle est longue, douce et brillante. Sa longueur va de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose et de lignine. Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. On gratte ensuite la matière non fibreuse, ce qui permet enfin d'arracher les fibres [19].

Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or, en raison de ses reflets. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité [19]. Le jute est caractérisé par une forte résistance à la traction, une faible extensibilité, une faible conductivité thermique et une bonne isolation. Il est de nos jours utilisé comme nouveau matériau de construction et d'emballages.



Figure.I.8: Fibres et tissus de jute.

I.8. Propriétés mécaniques des fibres de jute

La fibre de jute, classée parmi les fibres naturelles qui présente des propriétés mécaniques intéressantes qui en font un renfort potentiel dans les matériaux composites. Elle est issue de la tige de la plante du genre *Corchorus*, se compose principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces constituants lui confèrent une bonne rigidité spécifique et une légèreté notable.

Sur le plan mécanique, les fibres de jute offrent une résistance à la traction moyenne de 200 à 800 MPa, avec un module d'élasticité pouvant atteindre 10 à 30 GPa, selon les conditions de culture, de traitement et d'extraction. Leur allongement à la rupture reste relativement faible, variant entre 1,5 % et 2 %, ce qui indique un comportement plutôt fragile comparé aux fibres synthétiques comme le verre ou le carbone. Toutefois, leur densité relativement basse (environ 1,3–1,5 g/cm³) confère aux composites à base de jute un excellent rapport résistance/poids.

L'une des limitations majeures de la fibre de jute réside dans sa sensibilité à l'humidité, en raison de sa nature hydrophile. Cette caractéristique peut altérer les propriétés mécaniques du composite en conditions humides ou lors de cycles thermiques. Pour pallier cet inconvénient, plusieurs traitements chimiques (alcalins, silanes, acétylation) ou thermiques sont appliqués afin de réduire l'absorption d'eau et d'améliorer l'adhésion avec la matrice.

La fibre de jute demeure une alternative durable et renouvelable aux fibres synthétiques, notamment dans les applications à faible ou moyenne contrainte, comme les panneaux automobiles, les matériaux d'isolation ou les éléments de mobilier. Elle constitue ainsi un choix privilégié dans la conception de composites écologiques, intégrant à la fois des performances mécaniques acceptables et une empreinte environnementale réduite [20].

I.9. Domaine d'application de jute

La fibre de jute, matériau naturel d'origine végétale, se distingue par sa biodégradabilité, sa disponibilité abondante, son faible coût et sa compatibilité environnementale. Bien que ses propriétés mécaniques soient modestes comparées à

celles des fibres synthétiques, elle connaît une large gamme d'applications dans divers secteurs, notamment :

▪ **Industrie textile et emballage**

Traditionnellement, la jute est utilisée dans la fabrication de sacs, toiles, cordages, filets, tapis, et doublures textiles. Elle est également valorisée dans l'artisanat pour la production d'articles décoratifs et utilitaires.

▪ **Matériaux composites**

Grâce à sa bonne adhérence avec certaines matrices polymères, la fibre de jute est employée comme renfort naturel dans les composites biosourcés. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans les secteurs de l'automobile, du bâtiment et de l'ameublement, pour la fabrication de pièces semi-structurelles ou non porteuses (panneaux, habillages intérieurs, éléments décoratifs, etc.).

▪ **Applications agricoles et environnementales**

Le jute est largement utilisé dans les géotextiles biodégradables pour la protection contre l'érosion, la stabilisation des sols et la réhabilitation des terrains. Elle sert également au paillage naturel, favorisant la rétention d'humidité et la croissance des cultures.

▪ **Construction et isolation**

Dans le secteur du bâtiment, la fibre de jute est intégrée dans des matériaux d'isolation thermique et acoustique. Elle entre également dans la composition de mortiers ou bétons légers, dans une démarche de construction durable.

▪ **Autres usages**

On retrouve le jute dans la fabrication de papier, de sacs réutilisables, de chaussures écologiques, ainsi que dans divers produits d'emballage respectueux de l'environnement.

I.10. Fabrication des matériaux composites :

La mise en œuvre des matériaux composites représente une étape clé dans la détermination de leurs performances finales, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou physico-chimiques. Un matériau composite se compose d'une matrice qu'elle soit polymère, métallique ou céramique qui entoure et soutient un renfort, le plus souvent sous forme de fibres, selon une architecture définie. Le processus de fabrication vise à assurer une répartition uniforme du renfort, une imprégnation efficace de la matrice, ainsi qu'une interface cohésive entre les deux constituants, conditions essentielles pour garantir les propriétés optimales du composite [21].

Les procédés de fabrication varient en fonction des matériaux utilisés, de la forme géométrique souhaitée et des exigences fonctionnelles. Parmi les techniques les plus utilisées, on distingue :

Le moulage au contact (hand lay-up) : Il s'agit d'un procédé manuel où les fibres sont déposées dans un moule ouvert, puis imprégnées de résine à l'aide de rouleaux ou de pinceaux. Ce procédé est simple, économique et adapté à la production de pièces de grande taille mais de faible complexité.

L'infusion sous vide (vacuum infusion) : cette méthode consiste à placer les renforts dans un moule fermé sous vide, puis à injecter la résine par aspiration. Elle permet une meilleure compacité du matériau, une réduction de la porosité et une amélioration de la qualité finale.

Le moulage par transfert de résine (RTM) : dans ce procédé semi-automatisé, la résine est injectée sous pression dans un moule fermé contenant les renforts. Il permet de produire des pièces complexes avec une bonne répétabilité, et est souvent utilisé dans les industries automobile et aéronautique.

La pultrusion : c'est un procédé continu permettant de fabriquer des profilés à section constante. Les fibres, imprégnées de résine, sont tirées à travers une filière chauffée où a lieu la polymérisation.

Lorsque les composites sont renforcés par des fibres naturelles telles que le jute, certaines adaptations sont nécessaires. En raison de leur hydrophilie, les fibres naturelles doivent être séchées et parfois modifiées chimiquement (par exemple, par traitement alcalin) pour améliorer leur compatibilité avec la matrice polymère. De plus, la densité de compactage, la température de fabrication et le taux d'humidité sont des paramètres cruciaux à contrôler afin d'éviter la dégradation thermique des fibres végétales.

Ainsi, le choix du procédé de fabrication a une influence directe sur la microstructure du composite, l'adhésion interfaciale entre les constituants et sur les propriétés mécaniques du matériau. Cela est d'autant plus important lorsque le composite est destiné à subir des traitements thermiques postérieurs, ce qui nécessite une excellente stabilité dimensionnelle et thermique dès la phase de fabrication [21].

I.11. Processus général de fabrication des composites

La fabrication des matériaux composites repose sur la combinaison maîtrisée de deux éléments fondamentaux : une matrice (polymère, métallique ou céramique) et un renfort (généralement sous forme de fibres continues ou discontinues). L'objectif est d'obtenir un matériau homogène, performant et adapté à des contraintes spécifiques, tout en minimisant les défauts internes tels que les vides, les fissures ou les délaminations.

De manière synthétique, le processus de fabrication suit généralement les étapes suivantes :

1. Préparation des constituants : Cette phase inclut la sélection du type de renfort (fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou naturelles) et de la matrice, ainsi que leur préparation préalable (découpe, orientation, conditionnement, etc.).

2. Mise en place du renfort : Le renfort est disposé selon une configuration géométrique prédéfinie (stratification manuelle, tissage, enroulement filamentaire, etc.), permettant d'orienter les propriétés mécaniques du matériau dans des directions ciblées.

3. Imprégnation par la matrice : La matrice est introduite dans le renfort à l'état liquide ou fondu, selon le procédé choisi (injection, infusion, moulage, etc.), afin d'assurer un enrobage complet et une bonne adhésion aux fibres [22].

4. Compactage et consolidation : L'ensemble est soumis à une pression ou à une dépression contrôlée pour évacuer les bulles d'air et optimiser la compacité du matériau.

5. Cure ou polymérisation : Dans le cas des matrices thermodurcissables, une montée en température déclenche la réaction de réticulation. Pour les matrices thermoplastiques, un chauffage suivi d'un refroidissement contrôlé permet de consolider la structure.

6. Finitions et contrôles : Une fois le composite solidifié, des opérations de finition (découpe, perçage, usinage) peuvent être nécessaires. Des contrôles qualité, destructifs ou non destructifs (ultrasons, rayons X, etc.), sont réalisés pour garantir la conformité de la pièce aux spécifications.

Ce processus peut varier en fonction du type de composite, de la complexité de la pièce à fabriquer, et du procédé de mise en œuvre retenu. Le choix du procédé dépend notamment des exigences mécaniques, thermiques, économiques et de la cadence de production.

I.12. Poudre d'alumine

La poudre d'alumine est une céramique de composition chimique Al_2O_3 . La structure, la pureté, la dureté et la surface spécifique sont les caractéristiques principales de ces poudres.

Les différences entre les références peuvent paraître minimes, mais entre deux séries, les propriétés physico-chimiques sont complètement différentes. Le temps de calcination varie d'une série à l'autre, certaines alumines sont plus dures, d'autres plus tendres. Les granulométries et répartitions sont également différentes.

Notre large gamme de poudre à base d'alumine vous permettra de sélectionner le produit le mieux adapté à votre application. Des poudres de frittage, de charge et de polissage sont disponibles. Une poudre spécifique destinée à empêcher le collage de pièces lors de traitement thermique est également disponible.

Pour des tailles de grains spécifiques, nous pouvons réaliser un tamisage sur mesure. [23].

I.12.1. Structure

L'alumine, ou oxyde d'aluminium (Al_2O_3), est un composé céramique largement utilisé pour ses excellentes propriétés physico-chimiques. Elle existe sous plusieurs phases cristallines, dont la plus stable est la forme α -alumine (corindon), de structure trigonale.

I.11.2. Propriétés principales

Densité : $\sim 3,95$ à $4,0$ g/cm³

Dureté (Très élevée): juste après le diamant

°C 2 072 Température de fusion

Module d'élasticité : ~ 370 GPa

: Très élevée (mais fragile) Résistance mécanique

Conductivité électrique : Très faible (isolant électrique)

I.13. Effet de la poudre d'alumine sur les propriétés des composites :

La poudre d'alumine (Al_2O_3) est largement utilisée comme renfort dans les matériaux composites en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Son incorporation dans une matrice (polymère, métal ou céramique) modifie significativement les propriétés du composite [24]. Voici un résumé des effets principaux de la poudre d'alumine sur les propriétés des composites :

- Renforcement mécanique

Augmentation de la dureté et de la résistance à l'usure : L'alumine est un matériau très dur. Son ajout dans une matrice polymère ou métallique améliore la résistance à l'abrasion.

Amélioration du module d'élasticité : Le composite devient plus rigide.

- Renforcement de la résistance à la traction et à la flexion : Cela dépend fortement de la qualité de la dispersion et de l'adhésion interfaciale entre la matrice et la poudre.

- Propriétés thermiques

Augmentation de la conductivité thermique : L'alumine est un bon conducteur thermique (comparé aux polymères), ce qui permet de dissiper la chaleur plus efficacement.

Amélioration de la stabilité thermique : Les composites peuvent résister à des températures plus élevées sans dégradation.

- Propriétés tribologiques

Réduction du coefficient de frottement : En particulier dans les composites polymères.

Amélioration de la résistance à l'usure : Utile dans les applications mécaniques avec frottement répété.

- Comportement à la rupture

Fragilisation possible : Dans les matrices polymères ou métalliques ductiles, un excès de particules d'alumine peut introduire des sites de concentration de contraintes, réduisant la ténacité à la rupture [24].

CHAPITRE II

MATERIAUX ET DISPOSITIFS

EXPERIMENTAUX UTILISE

II. Introduction

Pour la résolution de problèmes de calcul des structures mécaniques, on constate la nécessité d'avoir quelques données expérimentales concernant les propriétés des matériaux utilisés, notamment, les propriétés mécaniques telles que la dureté la rigidité, la ductilité, la limite élastique et les grandeurs par exemple, le module d'élasticité longitudinale (module de Young) E. Ces paramètres varient en fonction des propriétés des matériaux, en premier lieu de la composition chimique du matériau et les conditions de traitement thermique et d'usinage s'il ya lieu. L'essai de traction à lui seul permet de définir les caractéristiques mécaniques courantes utilisées en RDM. La seule connaissance des paramètres de l'essai de traction permet de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en cisaillement, traction, compression et flexion [25].

Cette partie a pour objet, de présenter le principe de l'essai de traction pour déterminer certaines caractéristiques mécaniques essentielles des matériaux et les dispositifs expérimentaux utilisés lors des caractérisations de matériaux étudiés.

II. 1. Matériaux utilisé

II.1. 1. Résine Epoxy

La résine époxy est un matériau de revêtement durable et polyvalent qui se compose de deux composants, un époxy liquide et un durcisseur. Lorsqu'ils sont mélangés ensemble, ils créent un produit solide et résistant. Ainsi, vous pouvez comprendre que les résines époxy sont des matériaux synthétiques, c'est à dire qu'ils n'existent pas dans la nature, mais sont fabriqués industriellement.

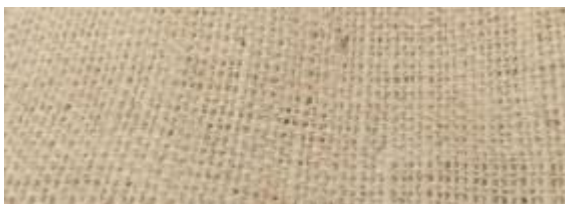
Ces résines sont largement utilisées, notamment dans le domaine de la construction, les travaux de réparation, la production de composants électroniques, les arts et l'artisanat...etc. Elles sont connues pour leur grande résistance à la chaleur, à l'abrasion, aux produits chimiques et à la moisissure, ce qui les rend idéales pour un large éventail d'applications [25].

Le type d'époxy et de durcisseur utilisés dans la fabrication du matériau utilisé est Epoxy: GENC PROFESSIONAL VX 100.00 et durcisseur : GENC PROFESSIONAL HX 100.00.

II.2. Tissu de jute :

La toile de jute est un textile tissé fait de fibres de jute ou de sisal. Il peut servir à fabriquer de la corde, des filets, des sacs et des produits similaires. Il sert également comme revêtement de sol (linoléum). La toile maillée de filasse de jute est utilisée pour armer le staff [26].

Le jute utilisé est un tissu bidirectionnel comme indique la figure II.1a et la poudre d'alumine figure II.1b.



(a)



(b)

Figure 9.II.1 :(a)Tissu de jute bidirectionnel ; (b) Poudre d'alumine.

II.3. Elaboration des composites hybride jute-alumine/époxy :

Dans un premier temps, la résine est préparée en respectant rigoureusement les proportions fournies par le fabricant, soit 75 % de résine époxy et 25 % de durcisseur. Une quantité de poudre d'aluminium, comprise entre 5 % et 20 % en masse par rapport à la résine, est ensuite incorporée. La teneur en fibres de jute est maintenue constante à 30 % du total du composite.

La résine et la poudre d'aluminium sont mélangées soigneusement pendant 3 à 5 minutes, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et sans agglomérats (figure II.2).



Figure 10.II.2 :Mécanisme utilisé pour mélanger la résine avec la poudre d'alumine.

Pour fabriquer le composite hybride, la technique de stratification manuelle a été utilisée. Le tissu bidirectionnel du tapis de jute a été coupées à 180 mm de longueur et 100 mm de largeur aux ciseaux. Chaque plaque obtenue est constituée de cinq couches de ce tissu. Elle est réalisée dans un moule en bois avec une base de film de papier en plastique est appliquée sur le fond et une couverture de vaseline sur les parois du moule afin de faciliter le démoulage (Fig. II.3a). Le mélange résine-poudre a ensuite été appliqué sur le film de papier (Fig. II.3b). La première couche du jute a été placée sur la couche de résine (Fig. II. 3c). Une seconde application de résine sur la couche du jute, suivie d'une pression au rouleau, a permis de répartir la résine, d'étaler le jute et d'éliminer les bulles d'air (Fig. II. 3d). De même, les couches de jute ont été empilées les unes sur les autres jusque-là dernière. Après l'empilement, et afin d'assurer une bonne pénétration de la résine et la poudre d'alumine dans les pores des fibres de jute et pour améliorer la résistance de la matrice et du renfort, une charge de 50 kg a été appliquée pour comprimer la plaque (Fig. II. 3e) pendant 48 heures avant le démoulage (Fig. II.3f).



Figure 11.II.3: Différentes étapes de la fabrication du composite hybride.

II.4. Usinage des éprouvettes :

Une scie circulaire est disponible au sein du laboratoire des sciences des matériaux de la faculté de technologie de l'université de M'Sila et est utilisée pour découper les plaques composites, contenant différents pourcentages de poudre d'alumine, en trois échantillons par plaque (Fig. II.4a). Ensuite, l'usinage final des éprouvettes sur la machine CNC, réalisées conformément à la norme ASTM D638-03 (Fig. II.4b).



Figure 12.II.4 : a) Machine à découper d'une scie circulaire ; b) Machine à commande numérique.

Après usinage, les éprouvettes sont devenues finies comme indique la figure II.5.

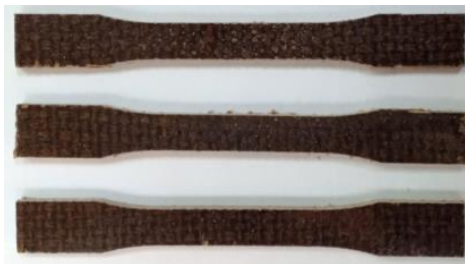


Figure 13.II.5. Eprouvette après usinage.

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement, vise à rendre les surfaces uniformes et d'avoir la même épaisseur. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) à indice de granulation progressif jusqu'à 600. Un touret de polissage a été dont la vitesse est de 300tr/min (figure.II.5).



Figure 14.II.5. Machine de polissage.

II.6. Dimensions de l'éprouvette de traction

Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes en forme d'haltère, préparées conformément à la norme ASTM D638-03, qui spécifie les dimensions normalisées pour les matériaux plastiques et composites. Le type d'éprouvette utilisé correspond généralement au Type I, dont les dimensions standards sont les suivantes :

- Longueur totale L : 165 mm
- Longueur de la jauge L_0 (section réduite) : 50 mm
- Largeur de la section réduite : 13 mm
- Largeur des extrémités (grip section) : 19 mm
- Épaisseur : 3,2 mm (ou selon l'épaisseur du matériau composite utilisé)
- Rayon de transition : 76 mm
- Distance entre les mors de serrage : 115 mm (environ)

Ces dimensions assurent une distribution homogène des contraintes dans la zone centrale et permettent une rupture nette dans la section utile pendant l'essai.

On a usiné l'éprouvette selon la figure II.6.

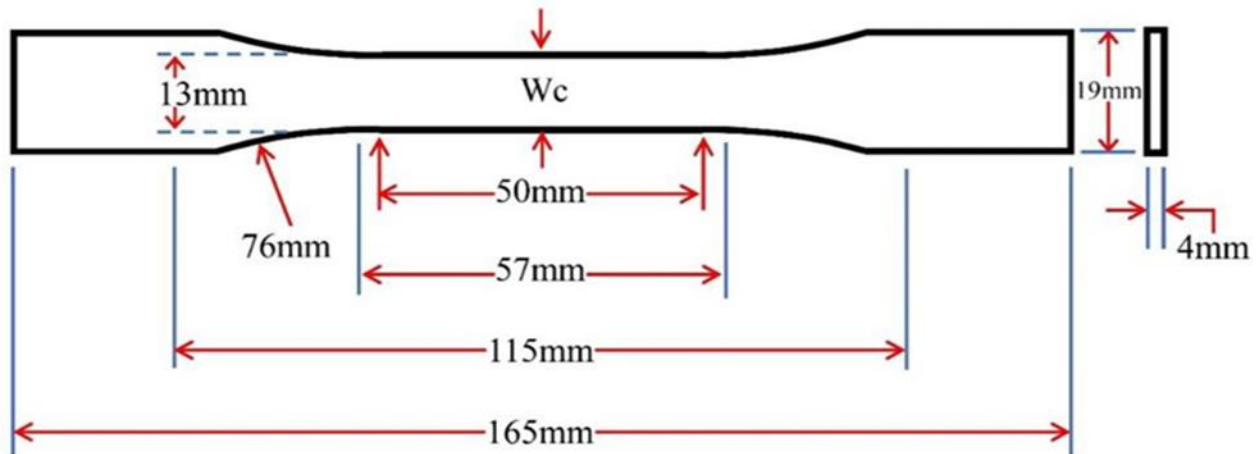


Figure 15 .II.6. Epreuve de traction (Haltere) [26].

II.7. Machine de traction

La machine est mise à disposition par le laboratoire des sciences des matériaux de la faculté de technologie de l'université de M'sila. Les essais de traction ont été effectués à la température ambiante. Cette machine universelle est de type TEST, présentant une capacité maximale de 10 Kn, équipé d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile, pilotée par un système informatique. Les tests ont été effectués à une vitesse constante de 2 mm/min.



Figure II.7. Machine de traction de type TEST.

II.8. Principe d'essai de traction :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort consécutif de traction suivant son axe (traction uni axiale), généralement jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

II.8.1. Caractéristiques mécaniques

En général, l'essai de traction nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques suivantes :

- Limite d'élasticité (la résistance limite élastique) (R_e) :

On définit une résistance limite élastique comme étant le rapport de F_e par l'aire la section utile S_0 de l'éprouvette

$$R_e = F_e / S_0$$

- Résistance à la rupture

La résistance à la rupture est la charge maximale appliquée à la section initiale de l'éprouvette sollicitée en traction, elle est définie par :

$$R_r = R_m = F / S_0$$

II.8.1.1. Allongement

L'allongement (A%) indique l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre, donc l'allongement est un indicateur de la ductilité du matériau.

$A\% > 5\%$ le matériau est considéré comme ductile.

$A\% < 5\%$ le matériau est considéré comme fragile.

$$A\% = (L_U - L_0) 100 / L_0$$

L_U : Longueur de jauge après rupture ou longueur ultime (mesurée en raboutant les deux morceaux de l'éprouvette cassée).

L_0 : Longueur initiale de jauge ou longueur initiale ou référence (la distance entre deux repères tracés sur l'éprouvette avant l'essai).

II.8.1.2. Coefficient de striction (Z%)

Le coefficient de striction (Z%) est aussi considéré comme un autre indicateur de ductilité du matériau.

$$Z\% = (S_0 - S_U) 100 / S_0$$

S_0 : Section initiale (calculée en mm² sur l'éprouvette avant l'essai).

S_U : Section ultime (calculée en mm² à partir du diamètre mesuré à l'endroit de la cassure de l'éprouvette cassée).

II.8.1.3. Module d'élasticité longitudinale (Module d'Young) (E)

Le module d'élasticité longitudinale (E) est la pente de la courbe contrainte - déformation dans le domaine élastique en traction pure, son unité est le pascal, il est défini par la loi de Hooke (l'effort F de traction est proportionnel à l'allongement ΔL)

$$E = (F_0 L_0) / (S_0 \Delta L) = \sigma / e$$

Avec:

$$\text{L'allongement : } \Delta L = L - L_0$$

$$\text{La contrainte de traction : } \sigma = F_0 / S_0$$

$$\text{La déformation : } e = \Delta L / L_0 \text{ [27].}$$

CHAPITRE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS ET DISCUSSION

III.1. Introduction :

La recherche d'une meilleure optimisation des propriétés mécaniques, conduit à une analyse de l'ensemble de ces propriétés à partir des essais mécaniques tels que les essais de traction.

Cette partie consiste à représenter les résultats obtenus des essais de traction avec une interprétation et analyse.

Le pourcentage des renforts dans un matériau composite hybride, comme celui utilisant le jute et poudre d'alumine, joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés mécaniques finales du composite [28].

III.2. Comportement mécanique du matériau à une vitesse de traction donnée

Les courbes résultantes de ces essais sont présentées sur les figures III.1 jusqu'à la figure III.5.

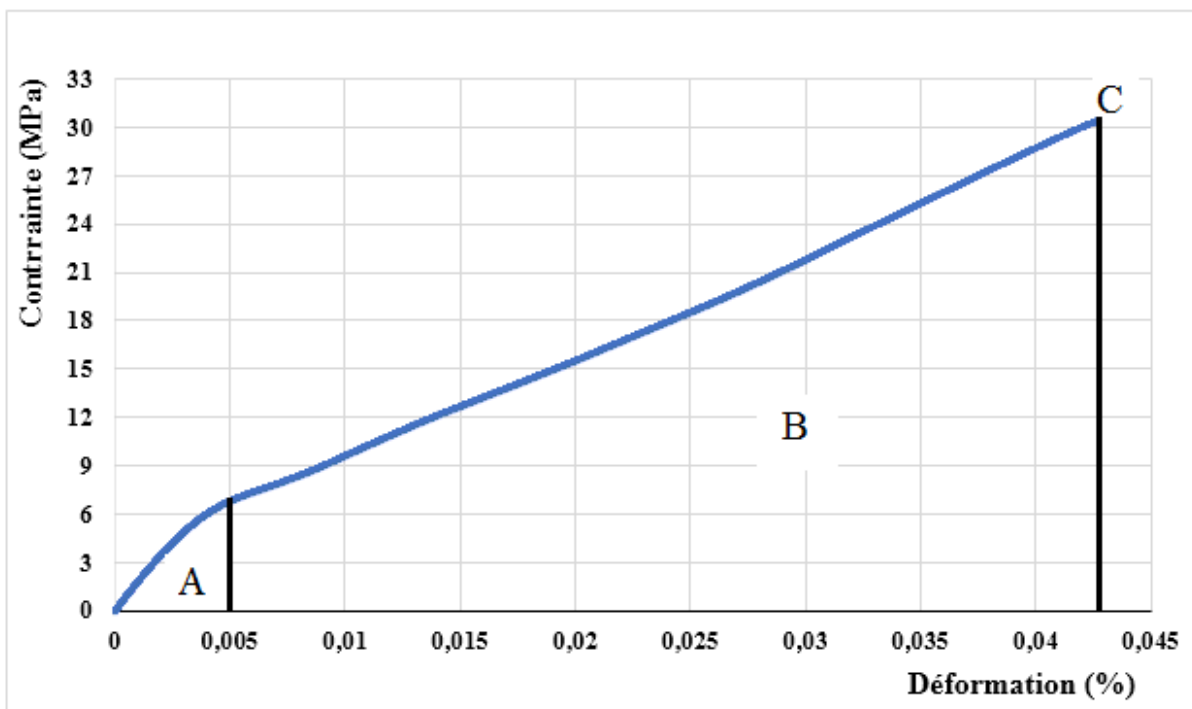


Figure 16.III.1 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur Poudre d'alumine (0%)

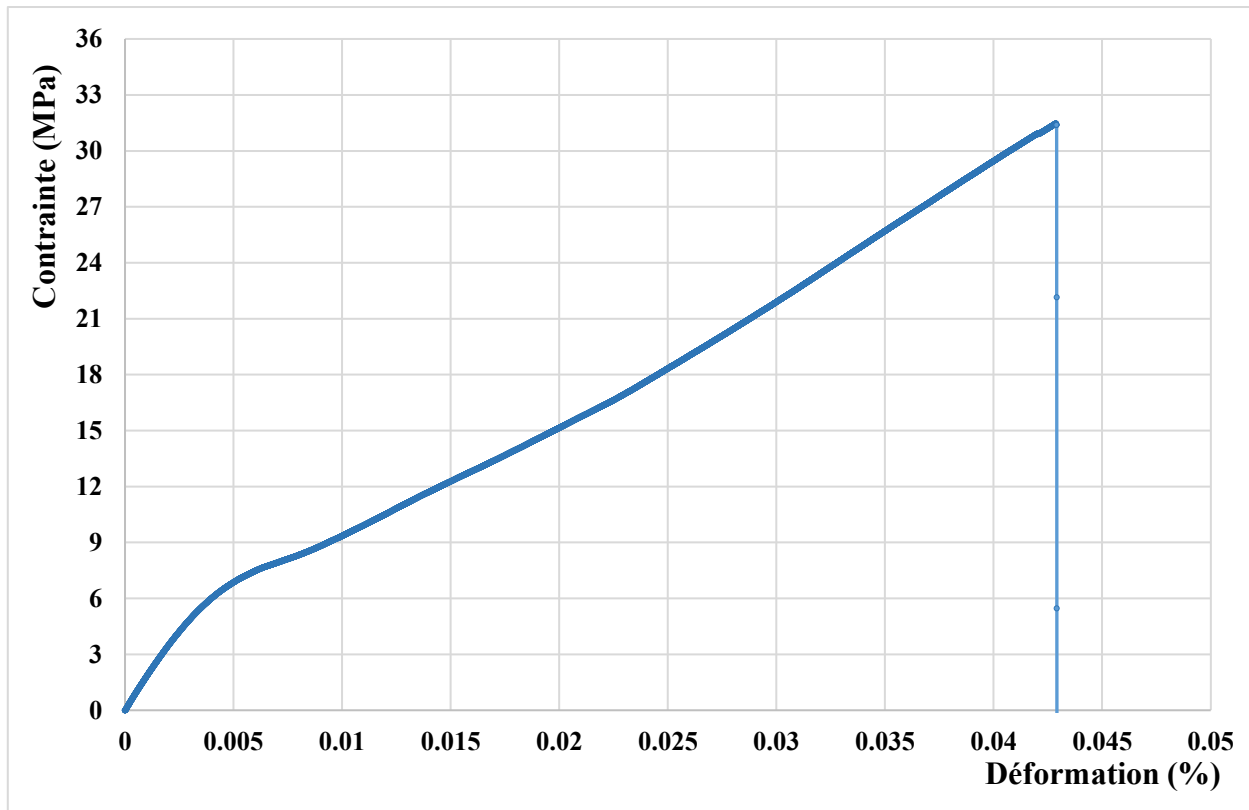


Figure 17.III.2: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (05%)

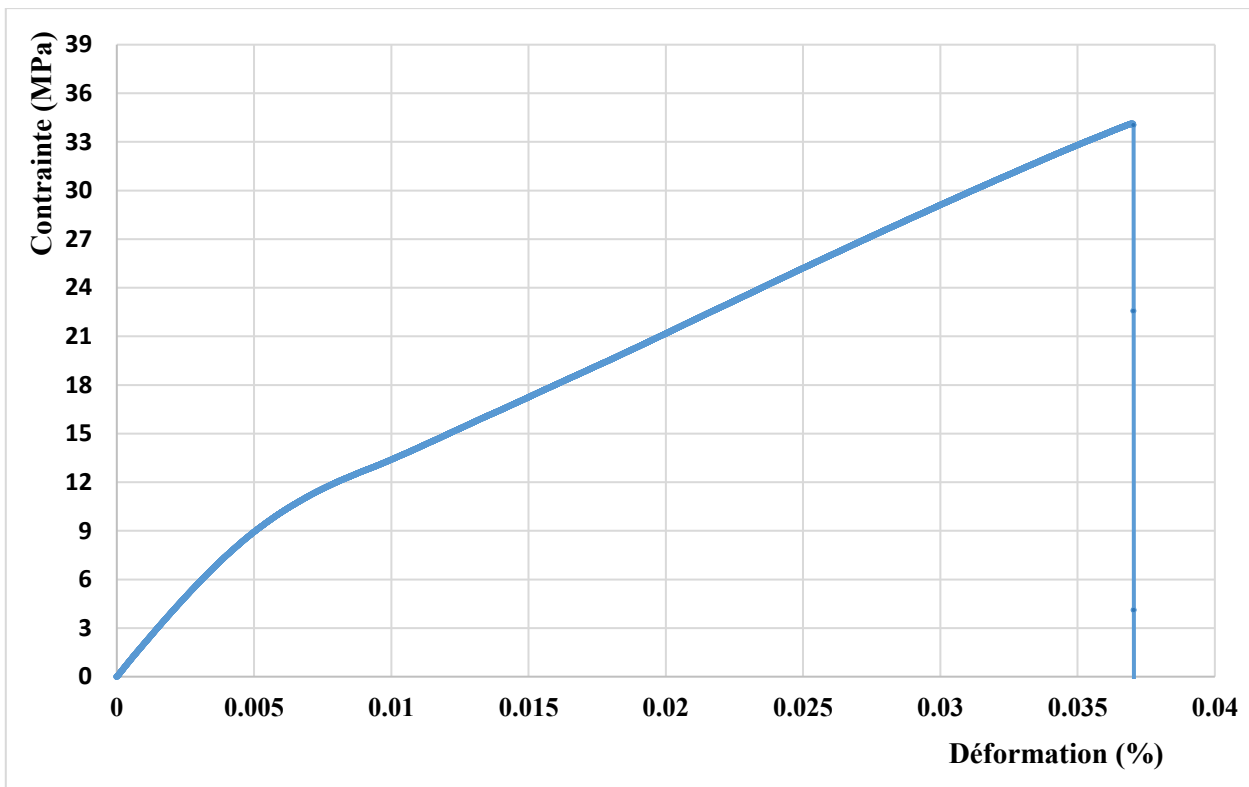


Figure 18.III.3: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (10%)

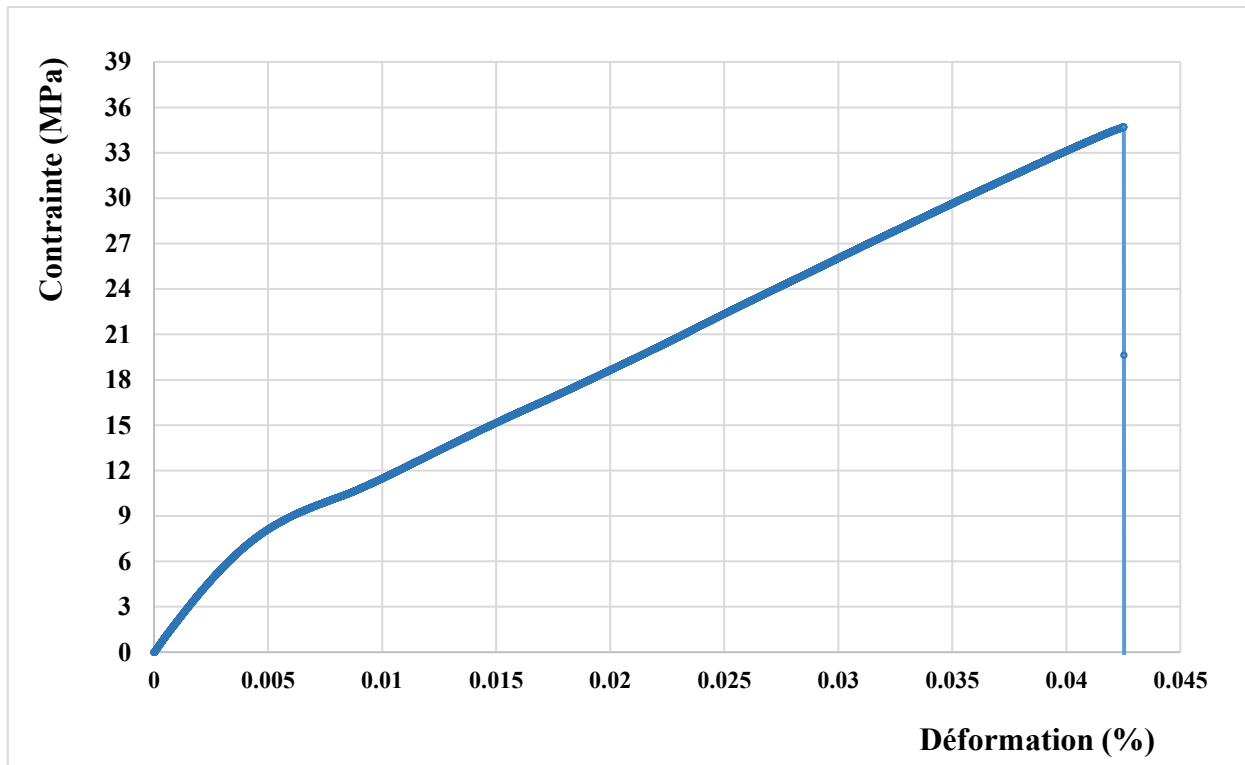


Figure 19. III.4: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (15%)

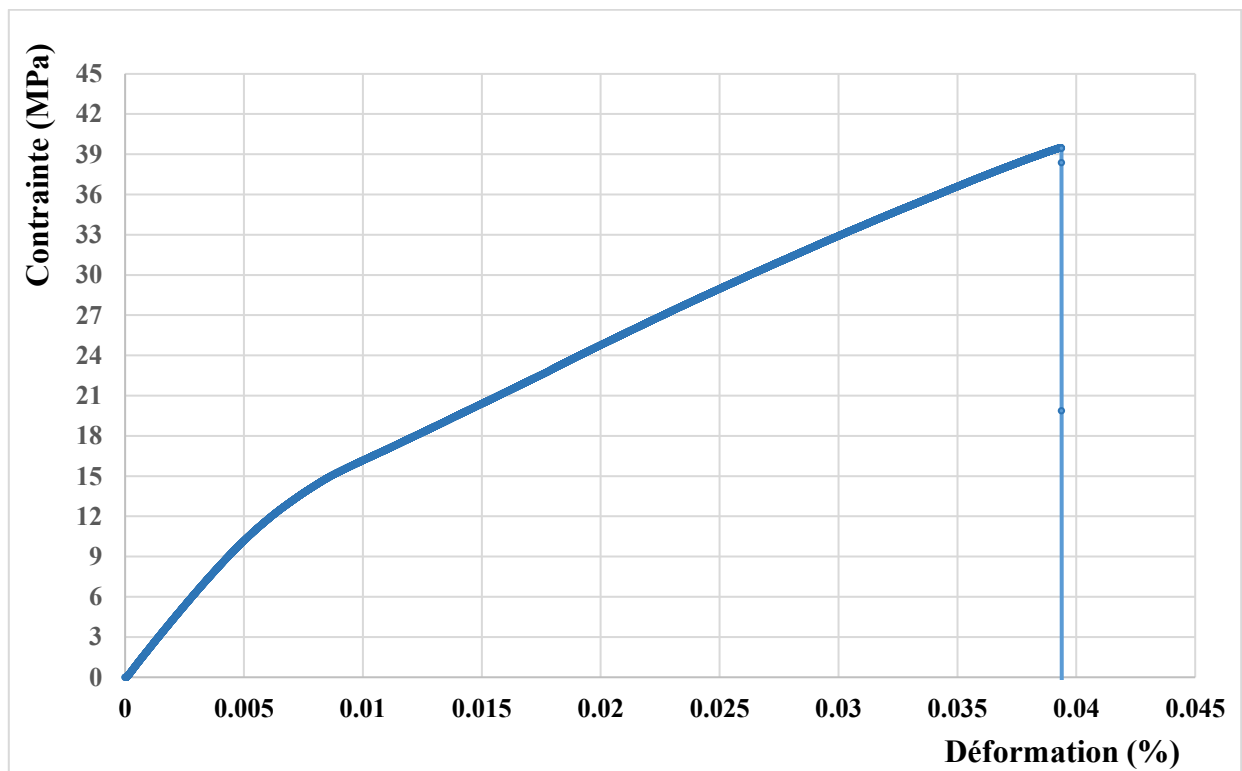


Figure 20. III.5: Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau en teneur des renforts Poudre d'alumine (20%)

III.3. Analyse des courbes :

Généralement toutes les courbes ont une allure identique, autrement dit, que le matériau a le même comportement durant les essais de traction même en tenant en compte le pourcentage de la poudre de l'alumine dans le composite. Ces courbes se divisent en :

– Zone initiale A (comportement non linéaire élastique)

- Cet intervalle est entre 0 % \rightarrow \sim 0,005 % de la déformation. Cette légère courbure au début correspond à la mise en tension progressive des fibres de jute.
- Le matériau présente un comportement non linéaire initial, souvent dû à l'alignement progressif des fibres.

– Zone linéaire B (comportement élastique)

- Intervalle : \sim 0,005 % \rightarrow \sim 0,042 % de déformation dans le cas de la figure.III.1.
- La courbe devient linéaire, ce qui indique un comportement élastique selon la loi de Hooke.
- La pente de cette zone correspond au module d'élasticité (ou module de Young) du composite.
- Cette phase traduit un bon transfert de charge entre la matrice polymère et les fibres de jute, sans endommagement.

– Point de rupture C (pic de contrainte)

- La contrainte atteint un maximum d'environ 30.66 MPa pour une déformation d'environ 0,042 %.
- Ce point correspond à la rupture brutale du composite : probablement due à la décohésion entre les fibres et la matrice, la rupture des fibres elles-mêmes, ou une fissuration dans la matrice.

Le matériau composite montre un comportement globalement fragile : une rupture soudaine après une phase élastique prolongée, sans phase plastique importante.

La déformation à la rupture (\sim 0,042 %) est relativement faible, confirmant un comportement cassant, typique des composites à fibres naturelles, notamment la matrice est thermodurcissable (résine époxy).

III.4. Mesure réelle des sections de la partie de référence des éprouvettes

Nous avons mesuré la surface de la partie de référence des échantillons (éprouvettes) avant et après les essais de traction en utilisant la formule suivante :
Surface (mm²) = épaisseur * largeur

Nous assurons de mesurer avec précision l'épaisseur et la largeur de chaque échantillon pour obtenir une mesure précise de la section. Toutes les mesures que nous obtenons sont illustrées dans le tableau III.1.

Taux de la poudre %	Section avant essai S_0 (mm ²)	Section après essai S_U (mm ²)
0%	49.58	48.51
5%	54.67	53.25
10%	53.23	52.52
15%	59.46	57.78
20%	66.66	65.36

Tableau.III.1 : Sections des éprouvettes avant et après les essais de traction.

Le coefficient de striction, noté Z (%), est une grandeur mécanique qui caractérise la réduction de la section transversale d'une éprouvette au moment de la rupture lors d'un essai de traction.

On utilise les résultats du tableau précédent pour calculer le coefficient de striction de chaque éprouvette à partir de la relation Z% : $Z\% = (S_0 - S_U) 100 / S_0$

Teneur de la poudre %	S_0	S_u	Z%
0%	49.58	48.51	2.15
5%	54.67	53.25	2.59
10%	53.23	52.52	1.33
15%	59.46	57.78	2.82
20%	66.66	65.36	1.95

Tableau.III.3 : Coefficient de striction (Z%).

III.5. Résultats obtenus

Le tableau III4 regroupe les caractéristiques mécaniques du matériau étudié après avoir été soumis à des essais de traction.

- Résistance maximale à la rupture (R_m): Correspond à la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de rompre.
- Allongement à la rupture (A%) : Représente la déformation plastique maximale que le matériau peut subir avant sa rupture.
- Coefficient de striction (Z%) : Mesure la réduction de la section du matériau à la rupture.
- Module de Young E (MPa): qui caractérise la rigidité d'un matériau dans sa zone élastique. Il représente le rapport entre la contrainte (σ) et la déformation (ϵ) dans la phase linéaire de la courbe de traction.

Pour déterminer le **module de Young E** à partir de la courbe **contrainte-déformation** que vous avez fournie précédemment (traction du composite jute/époxy), il faut exploiter la **partie linéaire de la courbe comme suit** :

- Identifier la zone linéaire de la courbe (où la relation entre contrainte et déformation est proportionnelle).
- Choisir deux points situés dans cette portion droite.

- Calculer la pente de cette droite, qui représente le module de Young

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

Le tableau III.4 les différentes valeurs des caractéristiques mécaniques obtenues à partir des essais effectués.

Teneur de la poudre %	Rm (MPa)	A%	Z%	Module de Young (MPa)
0%	30.66	4.82	2.15	633
5%	34.33	4.06	2.59	766
10%	33.72	4.12	1.33	800
15%	34.94	4.4	2.82	733
20%	37.74	4.36	1.95	900

Tableau. III.4 : Valeurs des caractéristiques mécaniques résultantes des essais de traction en fonction de la teneur d'alumine.

III.5.1. Variation de la résistance de traction à la rupture Rm en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine

La figure III.5 montre variation de la résistance à la rupture (Rm) d'un composite jute/époxy en fonction de la teneur en poudre d'alumine (%).

Le composite jute/époxy sans particules d'alumine présente une résistance à la rupture la plus faible, car il ne bénéficie pas du renforcement.

L'augmentation progressive de l'ajout de la poudre d'alumine conduit à une élévation de la résistance à la rupture. Cette addition de la poudre d'alumine renforce progressivement la matrice, améliore le transfert des particules entre fibres et matrice ce qui rend le matériau plus résistant.

Donc, plus la teneur en poudre d'alumine augmente, plus la résistance mécanique à la rupture s'améliore, jusqu'à 20 %, où elle atteint son maximum.

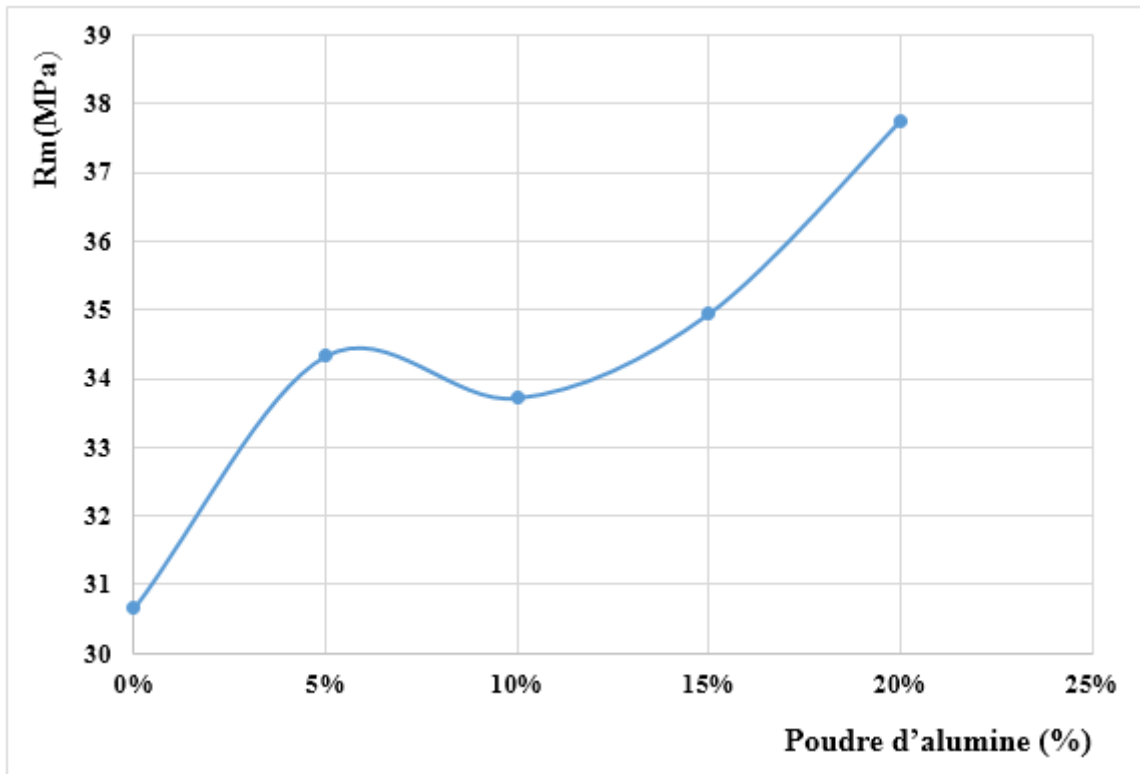


Figure 21.III.6. Variation de la résistance Rm en fonction du pourcentage De la poudre d'alumine (% massique).

III.5.2. Evolution de l'allongement à la rupture (A%) du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine

La figure III. 7 représente l'évolution de l'allongement à la rupture (A%) du matériau étudié en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.

-Au pourcentage 0%, ou le matériau ne contient que le jute et l'époxy, l'allongement est maximal, ce qui reflète un comportement plus ductile.

A 5 % de la poudre d'alumine, l'allongement chute diminue, ce qui montre une baisse significative de la ductilité. Cela s'explique par l'ajout de particules d'alumine qui sont rigides et fragiles et réduisent la capacité de déformation du matériau.

Entre 10 et 15 % d'alumine, On observe une légère augmentation de l'allongement, suggérant une meilleure dispersion des particules ou une adaptation progressive (Une interaction) de la matrice aux particules de l'alumine.

L'allongement diminue à nouveau légèrement à 20%, indiquant un début de saturation des particules dans la matrice, ce qui modifie les propriétés mécaniques globales.

Les taux de la poudre à éviter sont :

5 % : Allongement minimal donne un matériau fragile

20 % : L'allongement diminue à nouveau, indiquant une saturation ou défauts d'agglomération (Quand on ajoute trop de poudre, les particules peuvent se regrouper entre elles au lieu de se disperser uniformément, cela provoque des zones faibles dans le matériau.

Le compromis idéal entre résistance (R_m) et allongement ($A\%$) semble se situer entre 15 et 20 % d'alumine.

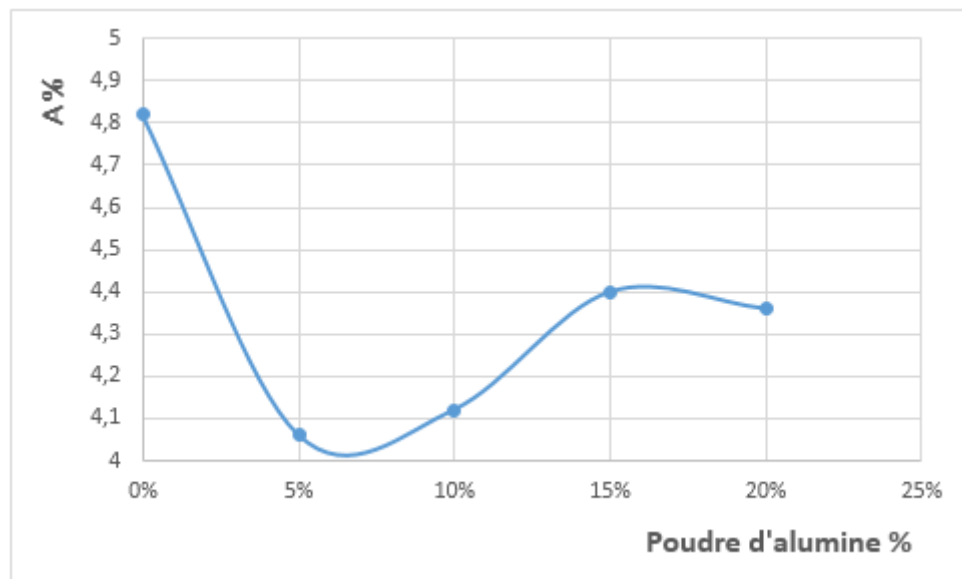


Figure 22.III.7. Evolution de l'allongement à la rupture ($A\%$) du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.

III.5.3. Variation du Coefficient de striction $Z\%$ du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.

La figure III.8 présente l'évolution du coefficient de striction $Z\%$, représentant la réduction de section à la rupture, en fonction du pourcentage de poudre d'alumine incorporée dans le composite jute/époxy.

À 0 % d'alumine, le composite de base présente une striction modérée, traduisant un comportement relativement ductile.

- L'introduction de 5 % de poudre d'alumine améliore la cohésion de la structure, augmentant la capacité du matériau à se déformer localement avant la rupture.
- À 10 %, une chute significative de Z est observée, indiquant une fragilisation du matériau. Cette baisse peut être attribuée à une dispersion non homogène ou à une agglomération des particules, créant des zones de faiblesse.
- À 15 %, Z atteint un maximum de 2,82 %, traduisant une striction optimale. Cette amélioration est probablement due à une dispersion plus uniforme des particules dans la matrice.
- En revanche, à 20 %, le coefficient de striction diminue de nouveau, probablement en raison d'une saturation de la matrice en charges, ce qui réduit la cohésion du matériau et accroît sa fragilité.

En conclusion, le coefficient de striction varie de façon non linéaire avec la teneur en alumine. Le pourcentage optimal pour conserver un bon comportement ductile (striction élevée) se situe autour de 15 %. En dessous ou au-delà de cette valeur, la striction diminue, indiquant une tendance du matériau à devenir plus cassant ou moins homogène.

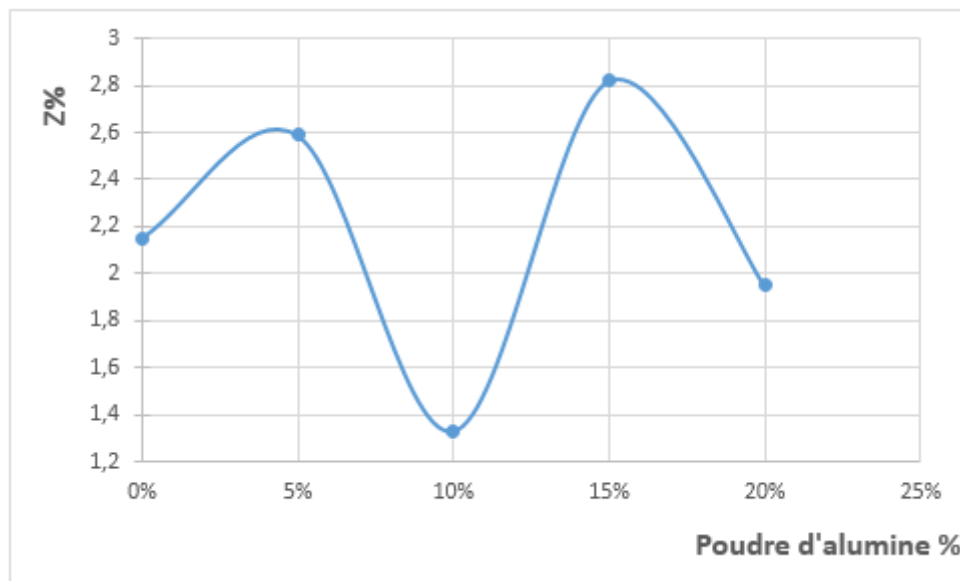


Figure 23. III.8. Variation du coefficient de striction Z% en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.

III.5.4. Variation du module de Young du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine

La figure III.9 présente l'évolution du module de Young E en fonction du taux de poudre d'alumine incorporée dans le composite.

En l'absence de charge (0 % d'alumine), le module reste faible, traduisant une rigidité relativement modérée du matériau de base.

Avec l'augmentation progressive de la teneur en alumine jusqu'à 10 %, le module atteint environ 800 MPa, ce qui reflète une amélioration significative de la rigidité, due à l'effet renforçant des particules d'alumine qui limitent la déformation élastique de la matrice.

Entre 10 % et 15 %, une légère baisse du module est observée, probablement liée à une mauvaise dispersion ou à une agglomération des particules, pouvant entraîner une saturation partielle du réseau matriciel.

Enfin, à 20 %, le module croît fortement pour atteindre 900 MPa, indiquant une rigidité maximale, conséquence d'une meilleure homogénéité et répartition des particules au sein du composite.

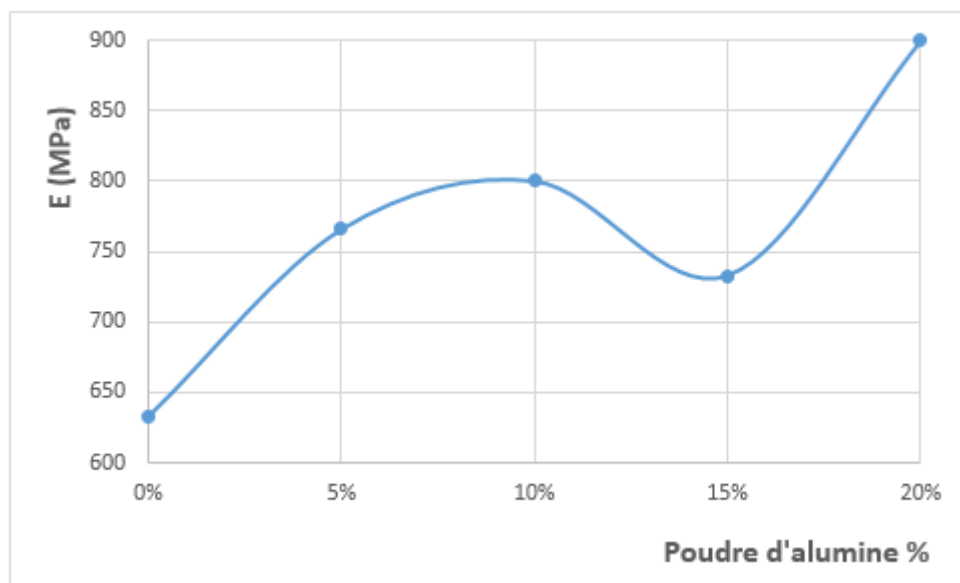


Figure 24. III.9. Variation du module de Young du matériau en fonction du pourcentage de la poudre d'alumine.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'intégration des particules minérales de la poudre d'alumine (Al_2O_3) dans un composite à base de fibres naturelles telles que les fibres de jute et de la matrice époxy vise à améliorer les propriétés mécaniques du matériau final.

L'étude expérimentale portant sur l'effet de l'ajout de la poudre d'alumine sur les propriétés mécaniques en traction matériau composite à base de jute et de résine époxy a permis de tirer plusieurs conclusions.

- La résistance maximale à la traction (R_m) augmente globalement avec la teneur en alumine, atteignant un maximum à 20 %, ce qui confirme l'effet renforçant des particules d'alumine sur la matrice polymère.

- L'allongement à la rupture ($A\%$) diminue de manière marquée à faible teneur en alumine, traduisant une perte de ductilité. Toutefois, une amélioration est observée aux alentours de 15 %, suggérant une meilleure compatibilité entre la matrice et les particules, avant de diminuer à 20 %, probablement à cause de phénomènes de saturation ou d'agglomération.

- Le coefficient de striction ($Z\%$) présente une évolution non linéaire, avec un minimum autour de 10 %, indiquant une fragilisation structurelle, et un maximum à 15 %, où le matériau retrouve une capacité optimale de déformation localisée.

- Le module de Young (E) suit une tendance croissante avec l'augmentation de la teneur de la poudre d'alumine, atteignant une rigidité maximale à 20 %, ce qui traduit une amélioration notable de la raideur du matériau composite.

Ainsi, un compromis optimal entre rigidité, résistance et capacité de déformation semble être atteint pour un taux de poudre d'alumine situé entre 10 % et 15 %. Une charge trop faible ne permet pas une amélioration notable des propriétés, tandis qu'un excès supérieur à 15 %, peut induire des effets négatifs tels que l'agglomération des particules, la saturation de la matrice et la perte de cohésion interne.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] s. Koudach, *élaboration et caractérisation de matériaux composites pour l'aéronautique, soumai Koudach, enp2016*, 2016.
- [2] D. GAY, *Matériaux composite, Daniel GAY, 6^{ème} édition (2015)*, 2015.
- [3] J.M.BERTHELOT, *J.M.BERTHELOT, (2002). Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4^{ème} édition.*, 2002.
- [4] G. Lionel, *Lionel,G,(2011),Matériaux composites et structures composites. CACHAN Ecole normale supérieure. Université Paris-SACLAY.*, 2011.
- [5] J. Berthelot, *Berthelot, J.M. (2005).Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures Livre, éditions : Lavoisier*, 2005.
- [6] [En ligne]. Available: <https://lewebpedagogique.com/classesbilingueslpb/files/2018/06/Le%C3%A7on31..>
- [7] S. Ghorab, *Ghorab,S. (2005).Comportement viscoélastique des matériaux orthotropes, mémoire de magister, université Mentouri-Constantine.*, 2005.
- [8] MIDOUN, A. (2019).*Étude comparative du comportement mécanique des matériaux composites à matrice polymère : cas d'un matériau composite élastique unidirectionnel à fibres de verre et d'un matériau composite élastique unidirectionnel à fibres de carbone, m*, 2019.
- [9] W. TOUMI, *TOUMI, W. (2019).Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression. Mémoire de master, Université Mohamed Khider –Biskra*, 2019.
- [10] L. METTOUCHI, *METTOUCHI, L. (2018) Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite. Mémoire Master. Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou.*, 2018.
- [11] T. CEDRIC, *CEDRIC, T. (2011).Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV. L'École nationale supérieure des mines de Paris*, 2011.
- [12] J.-M. BERTHLOT, *JEAN-MARIE BERTHLOT, ((Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures)) ; 4^{ème} édition, ed tec&doc, Lavoisier, (2005).*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] [En ligne]. Available: <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-traction/>.
- [14] GHARBI, *GHARBI Brahim*, (2022) *Essai de Traction Université de Batna 2 Faculté de Technologie.*, 2022.
- [15] H. Abdelmoume, *HIDOURI Abdelmoumen fascicule de travaux pratiques des sciences des matériaux. Institut Supérieur des Études Technologiques Gafsa. Département de Génie Mécanique 2013.*, 2013.
- [16] K. Abdennour, *KASMI Abdennour et SAIB Miloud. EFFET DE TRAITEMENT THERMIQUE SUR CARACTERISTIQUES MECANQUES EN TRACTION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM. Memiore de Master. Université Mohamed Boudiaf University of M'sila. 2022.*, 2022.
- [17] A. MIDOUN, *MIDOUN, A. (2019). Étude comparative du comportement mécanique des matériaux composites à matrice polymère : cas d'un matériau composite élastique unidirectionnel à fibres de verre et d'un matériau composite élastique unidirectionnel à fibres de carbone, m.*
- [18] D. T. Vasconcellos, *Vasconcellos, D, Touchard S, F. Chocinski-Arnault, L. (2014). Tension-tension fatigue behaviour of woven hemp fibre reinforced epoxy composite: A multiinstrumented damage analysis, Int. J. Fatigue.*
- [19] B. HAMI, *HAMI, B. (2010). Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de verre et de résine polyester et étude de son comportement au choc. Mémoire de Magistère. Université M'Hamed Bougara-Boumerdes.*, 2010.
- [20] L. El Hadji B, *El Hadji B, LY. (2008) Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble.*, 2008.
- [21] Goret, L., *Goret, L. (6 Apr 2010). Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1.*, 2010.
- [22] S. Jacques Mesplède, *books, 100 manipulations de chimie organique et inorganique (2004) - 256 pages*, 2004.
- [23] É. Kohn-Abrest, *book, (52 pages), Recherches sur l'aluminium, Émile Kohn-Abrest, Université du Wisconsin-Madison, (2009)*, 2009.
- [24] k. Saidani, *Saidani, k. (2014). Analyse de composites sandwich et qualification de leur intégrité vis-à-vis à la ruine. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou.*, 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [25] O. ISSAM, *MEMOIRE DE FIN D'ETUDE OUADAH ISSAM (2024), master 02.COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION D'UN MATERIAU COMPOSITE.*
- [26] B. Lamia, *BENHAMADOUCHE Lamia. Etude de l'endommagement et rupture des stratifiés composites à base de fibres végétales. Thèse de Doctorat sciences. 2022. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Algérie..*
- [27] A. M, Athman. M et al. "Influence des paramètres de traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la microstructure d'un acier à outils de travail à chaud". 3ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et All.
- [28] «filier-3e,» 16 1 2014. [En ligne]. Available: <https://www.filier-3e.fr/2014/01/16/materiaux-composites-proprietes-utiles-usinage-difficile/>.