

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Amélioration des Performances d'un Matériau Composite Stratifié
Biomécanique chargé de granulés de noyaux de dattes**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : CONSTRUCTION MECANIQUE

PRESENTE PAR : SOUALAH Sarra

DEVANT LE JURY

Président : Pr. BEY Kamel UNIVERSITE D'ANNABA

Encadreur : Dr. CHEMAMI A/Nacer UNIVERSITE D'ANNABA

Co-Encadreur: Mr. BOUKHEZAR Skander URMA/CRTI-ANNABA

Membres : Dr. BENAMIRA Mohamed UNIVERSITE D'ANNABA

Mr. GOUASMI Sassi. UNIVERSITE D'ANNABA

Année: 2017/2018

Dédicaces

A la mémoire de ma Mère

A la mémoire de mon Père

A mes Frères

A mes Collègues

A toute ma famille

Je dédie ce travail.

Sarra

Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu le professeur CHEMAMI Abdenacer ; pour la qualité d'encadrement, son soutien et les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer.

Je tiens également à remercier le Pr BEY. Kamel, Mr.BOUKHEZAR Skander et Mr.GOUASSMI pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes enseignants, le personnel du département de génie mécanique ainsi que tous les étudiants et amies qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Je tiens également à remercier les ingénieurs de soutien à la recherche de l'unité de recherche en matériaux avancés URMA/CRTI Annaba, qui m'ont aidé à réaliser les essais expérimentaux

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à ma mère et mon père qui a beaucoup sacrifié pour que puisse atteindre mon but, celui de réaliser ce travail. Aussi, à mes frères, à toute ma famille.

Chapitre I

Figure I-1 matériaux composites (matrice + renfort).....05

Figure I.2 : matériaux composites stratifié..... 05

Figure I-3 Caractéristiques principales du matériau composite.....07

Figure I.4.Types de renfort.....09

Figure I-5 Différentes familles de matrice.....10

Figure I-6 Différentes architectures des fibres de verre.....14

Figure I-7 Tissu de verre.....15

Figure I-8 bobine de Fibre de verre.....16

Figure I-9 fibre de verre E.....16

Figure I-12 Structure d'un composite stratifié.....19

Figure I- 13 Les deux phases (a) micro. Et (b) macro. De l'étude du comportement mécanique.....20

Figure I-14 Principe d'un essai de traction.....21

Figure I-15 Courbe type de traction.....22

Figure I-16 Signification des courbes de traction.....23

Chapitre II

Figure II-1 Rupture transverse de la matrice27

FigureII-2 Rupture longitudinal de la matrice.....27

FigureII-3 Décohésion fibre-matrice28

Figure II-4 différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié.....29

Figure I-5 Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transversale.....30

Figure II-6 Rupteur fibre.....31

Figure II-7 Mécanisme d'endommagement observe dans les stratifié.....	32
Figure II-8 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement sur un matériau stratifié.....	33
<u>Chapitre III</u>	
Figure III-1 Réalisation des matériaux de l'étude.....	39
Figure III-2 La plaque composite.....	40
Figure III.3 Dimension d'éprouvette selon la norme AFNOR NF T 527-105.....	40
Figure III-4 Eprouvettes d'essai.....	41
Figure III-5 Machine de traction MTS 43.....	42
Figure III-6 Microscope optique.....	42
Figure III-7 Courbes de comportement expérimental charge-allongement en traction Statique.....	42
Figure III-8 Courbe moyenne de comportement expérimental charge-allongement en traction Statique.....	43
Figure III-09 Photographie des éprouvettes testées.....	45
Figure III -10 Observation des faciès de rupture de la fibre sur le côté tendue de l'éprouvette.....	45
Figure III-11 Observation des faciès de rupture au milieu de l'éprouvette.....	46
Figure III-12 Observation des faciès de rupture sur le côté de l'éprouvette.....	46

Liste des tableaux

Tableau I-1 Avantages et inconvénients de la Fibre de verre.....	15
Tableau I-2 Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques.....	18
Tableau III.1 Caractéristiques de la fibre de verre.....	36
Tableau III.2 : Composition chimique des noyaux de dattes.....	36
Tableau III-3 Analyse élémentaire des charbons fabriqués.....	37
Tableau III-4 Propriétés physiques du PMMA.....	38
Tableau III-5 Dimensions des éprouvettes.....	41
Tableau III-6 Résultats expérimentaux obtenus.....	45
Tableau III-7 Calcul des propriétés mécaniques en traction uni axiale.....	45

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I :étude bibliographique

I.1 Généralités.....04

 I.1.1 Constituants des matériaux composites.....04

 I.1.2 Présentation des matériaux composites.....05

 I.1.3 Domaine d'utilisation des matériaux composites.....07

 I.1.4 Les concepts clés des composites.....07

 I.1.5 Propriétés des matériaux composites.....08

 I.1.6 Eléments constituant les matériaux composites08

 I.1.6.1 Renfort..... 08

 I.1.6.2Les matrices.....08

 • Matrice organique.....10

 • Matrice métallique.....10

 • Matrice en céramique.....11

 I.1.7 Classification selon la nature des constituants.....11

 I.1.8 Les charges et les additifs.....12

 I.1.8.1 Les charges.....12

 I.1.8.2Les additifs.....13

 I.1.9 Les principales fibres.....13

 I.1.9.1Les fibres de verre et propriétés.....13

 I.1.9.2 Les avantages et les inconvénients des fibres de verre.....15

I.10 Les résine.....16

I.11 Les stratifiés	18
I.11.1 Comportement mécanique des stratifiés	20
I.2 Essai de traction uni axiale	20
I.2.1 Introduction	20
I.3 Différentes étapes de l'essai de traction.....	22
I.3.1 Zone de comportement élastique (Zone A)	23
I.3.2 Zone de comportement plastique (Zone B).....	24
I.4 Différents types de ruptures en traction.....	24

Chapitre II : Mécanisme d'endommagement

II-1 Introduction.....	26
II-1-2 Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel.....	26
II-1-2-1 Microfissuration matricielle.....	26
II-1-2-2 Décohésion fibre matrice.....	28
II-1.2.3 Fissurations des composites stratifiés.....	29
II.2 Critères de rupture.....	29
II.3 Composite unidirectionnel soumis à une traction transversale.....	30
II.4 Rupture de fibre	30
II.5 Délaminage.....	31
II.6 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement.....	32

Chapitre III : étude expérimentale (Essai de traction)

III.1. Introduction	35
III.2 Présentation du matériau étudié.....	35

III.2.1 Propriétés physicochimiques du renfort fibres de verre caractéristiques.....	35
III.2.2 Propriétés physicochimiques des noyaux de dattes.....	36
III.2.3 Propriétés physicochimiques de la matrice (PMMA).....	37
III.2.4 Mise en œuvre du matériau composite étudié.....	38
III.2.5 Préparation et mise en œuvre des éprouvettes d'essai de traction.....	40
III.3 Banc et conditions d'essai.....	42
III .3.1 La machine d'essai.....	42
III.3.2Microscopie optique.....	42
III.4 Comportement mécanique en traction des éprouvettes testées	43
III.4.1 Courbes expérimentales du comportement mécanique charge-allongement.....	43
III.4.2 Interprétation des courbes expérimentales de comportement obtenues.....	44
II.4.3 Résultats expérimentaux obtenus.....	45
II.5. Observation par microscope optique après l'essai de traction.....	45
Conclusion générale.....	49
Reference bibliographique.....	50
Annexe	52

Introduction générale

Les matériaux composite PMMA/Fibres de verre sont largement utilisés dans la fabrication des prothèses orthopédiques de par leur légèreté, coût modéré et leur mise en œuvre facile. Ce qui a incité les chercheurs à étudier leur comportement mécanique en service pour mieux cerner leurs mécanismes de rupture. Dans ce contexte, nous avons étudié leur rupture en traction uniaxiale, les premiers résultats obtenus nécessite une analyse plus poussée afin d'identifier leur comportement d'endommagement

Le matériau composite utilisé comme prothèse tibiale humaine est généralement constitué de renforts tissés verre/perlon imprégnés dans une résine de méthacrylate de méthyle. En vue d'obtenir de bonnes performances de ce composite, des granulés de noyaux de dattes (GND) ont été incorporés dans la résine du matériau de référence. Les matériaux de cette étude ont été préparés au laboratoire par moulage sous vide et dans des conditions normales.

Dans le premier chapitre constitue une étude bibliographique sur les matériaux composites d'une manière générale, l'un des objectifs de ce premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation les modes d'endommagements aux composites stratifiés qu'ils sont particulièrement sensibles aux chargements, comme les impacts à basse vitesse, qui peuvent créer des dommages internes invisibles à l'œil nu (délaminage, rupture de matrice et de fibres).

Dans le troisième chapitre nous avons entamé une présentation des constituant utilisés dans la fabrication de composite stratifié ainsi que les étapes menant à la caractérisation du comportement mécanique du composite utilisé en traction avec l'observation microscopique durant l'essai

Dans l'objectif d'améliorer les performances des prothèses fabriquées par l'Office National d'Appareillages et D'accessoires pour Personnes Handicapées (ONAAPH), qui ont généralement des emboitures indirectes fabriquée à partir d'une résine acrylique renforcée par des fibres de verre, nous avons entamé une sur le comportement mécanique du composite utilisé. Ce document rapporte une présentation des constituant utilisés dans la fabrication des

emboitures ainsi que les étapes menant à la caractérisation du comportement du composite en traction. Ce qui va constituer une partie de la plateforme forme permettant d'appréhender le comportement du composite et de comprendre les mécanismes d'endommagement et de dégradation qui mènent à la rupture des emboitures fabriquées. Beaucoup de travaux de recherche ont été dédiés à l'amélioration des propriétés des composites

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1. Généralités

« Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément »

On appelle maintenant de façon courante " matériaux composites" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [1].

Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés [2].

Un composite est très hétérogène et fortement anisotrope. Contrairement aux matières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement, connues qu'après fabrication. Actuellement, les composites à matrice organique représentent à plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice organique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale [3].

I.1.1. Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites, des charges et adjuvants
- D'un renfort (Figure I.1),

Les propriétés physiques d'un matériau composite dépendent directement de ses différents constituants. L'imprécision sur l'orientation et la position des fibres, par exemple, lors de la fabrication du composite, augmentera les incertitudes dans l'estimation de ses propriétés physiques [3].

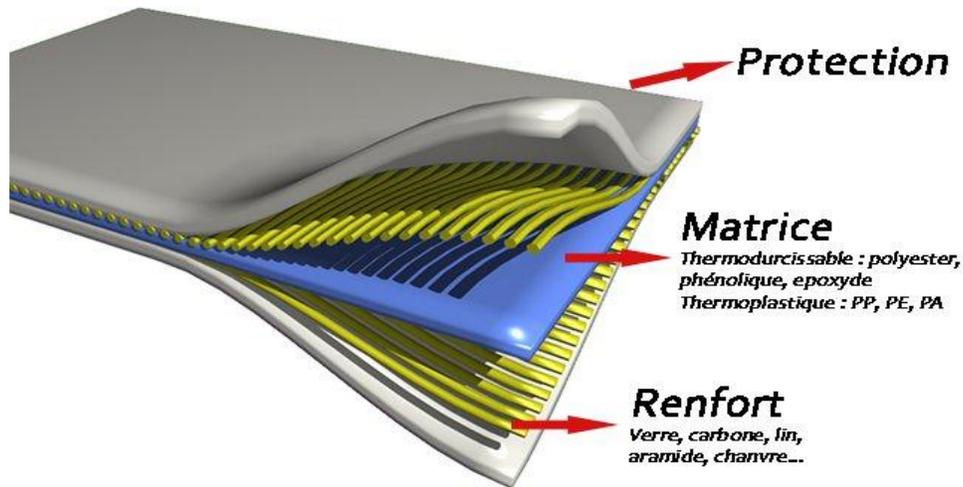


Figure I-1 matériaux composites (matrice + renfort)

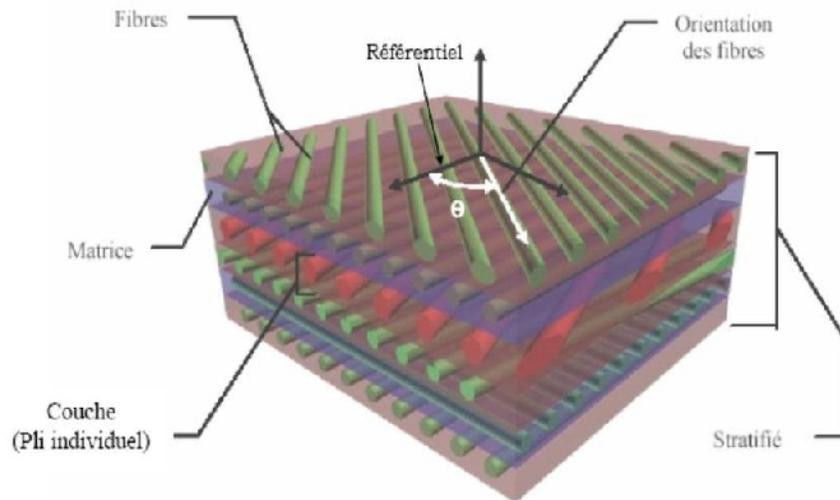


Figure I.2 : matériaux composites stratifié

I.1.2.Présentation des matériaux composites

Un matériau composite est défini comme un produit solide comportant au moins deux phases physiques distinctes. Il est composé d'un matériau de liaison (matrice) et d'un matériau sous forme granulée, fibreuse, ou lamellaire (renfort) [4].

La classification des composites se fait selon la nature de ces deux éléments constituants.

Une autre voie de classification est basée sur la forme du renfort, qui peut être fibreuse ou granulée. Dans le premier cas, les fibres utilisées se présentent, soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres coupées, fibres courtes, etc.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte des propriétés afin d'obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur peut proposer un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté.

Les comportements mécaniques et physiques jouent sur:

- La nature des constituants
- La proportion des constituants
- L'architecture du renfort, et en suivant le cahier des charges.

Pour les nano composites, le renfort se trouve sous forme de particules. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc...

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice – particules dépend des propriétés souhaitées par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmentent leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tels le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporé dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés des utilisations à températures élevées, par exemple les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à hautes températures. Également, des particules d'élastomères peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la

sensibilité à la fissuration. Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse [5].

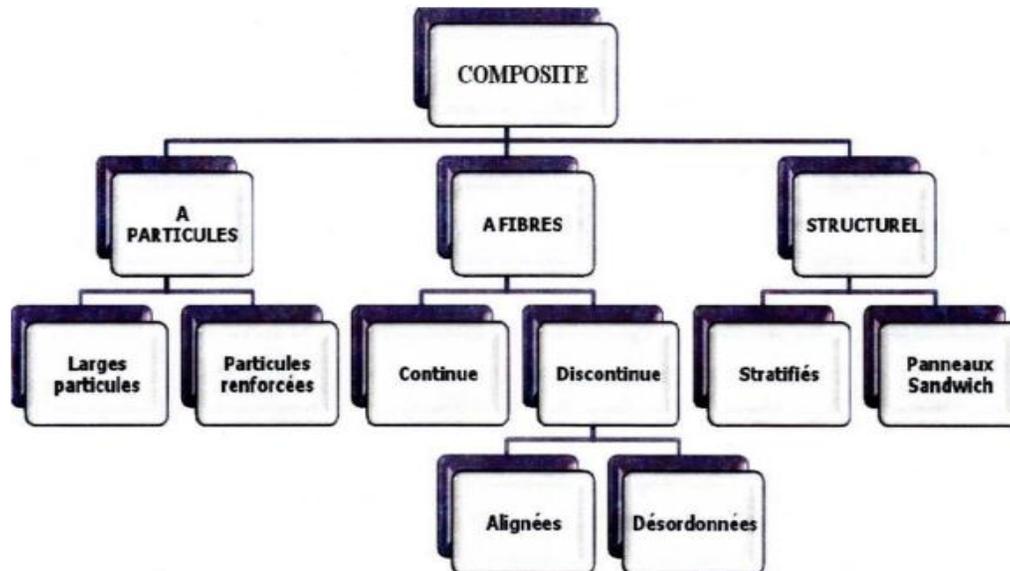


Figure I-3 Caractéristiques principales du matériau composite

I.1.3. Domaine d'utilisation des matériaux composites

- Electricité: éoliennes, antennes ...
- Bâtiment : portes, cellules d'habitation, ...
- Automobile: carrosserie, arbre de transmission,....
- Transport ferroviaire: wagons,
- Transport aérien : avions de tourisme, planeurs,...
- Transport spatial : corps de propulseurs, corps d'entrée dans l'atmosphère.
- Transport maritime : hovercrafts, canoës
- Mécanique générale et divers: engrenages ...
- Sport : ski, raquette de tennis [6]

I.1.4. Les concepts clés des composites

Réunir en un seul deux ou plusieurs matériaux à caractéristiques différentes, qui n'ont pas, séparés des caractéristiques de valeur, mais qui ensemble forment un matériau avec des propriétés importantes : c'est l'union qui fait a force !

Les fibres utilisées comme renfort ont des propriétés nettement meilleures (résistance et rigidité) du même matériau en forme massive : la diminution des dimensions caractéristiques implique, souvent, une amélioration des prestations mécaniques car la fibre a, par le procédé de fabrication, une structure plus parfaite du matériau massif et parce que la probabilité de trouver des défauts importants diminue avec les dimensions [7].

I.1.5. Propriétés des matériaux composites

Au final, les matériaux composites se différencient des matériaux classiques par un fort module d'Young, une faible masse volumique et une bonne tenue en fatigue. Ils ont l'avantage d'avoir une limite élastique très élevée, de ne pas se corroder et de résister aux produits chimiques courants tels que les graisses, huiles, peintures, etc. De plus, les techniques de mise en forme par moulage permettent la réalisation de pièces complexes.

Cependant, leur résistance aux impacts est souvent plus faible que celle des matériaux métalliques classiques. Enfin, ils sont plus sensibles à la chaleur et à l'humidité. [8]

I.1.6 Eléments constituant les matériaux composites :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont : la matrice, le renfort et l'interface. Dans certains cas des charges et des additifs peuvent être utilisés.

I.1.6.1 Renfort :

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût. [9]

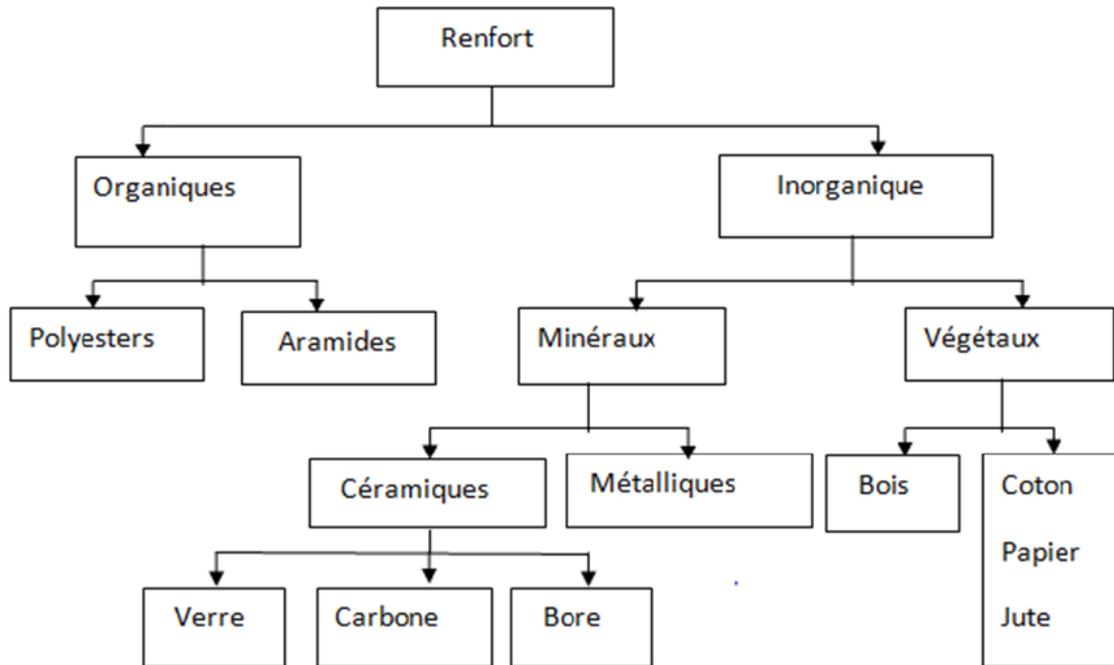


Figure I.4. Types de renfort.

I.1.6.2 Les matrices :

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

-La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

-La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontonne (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

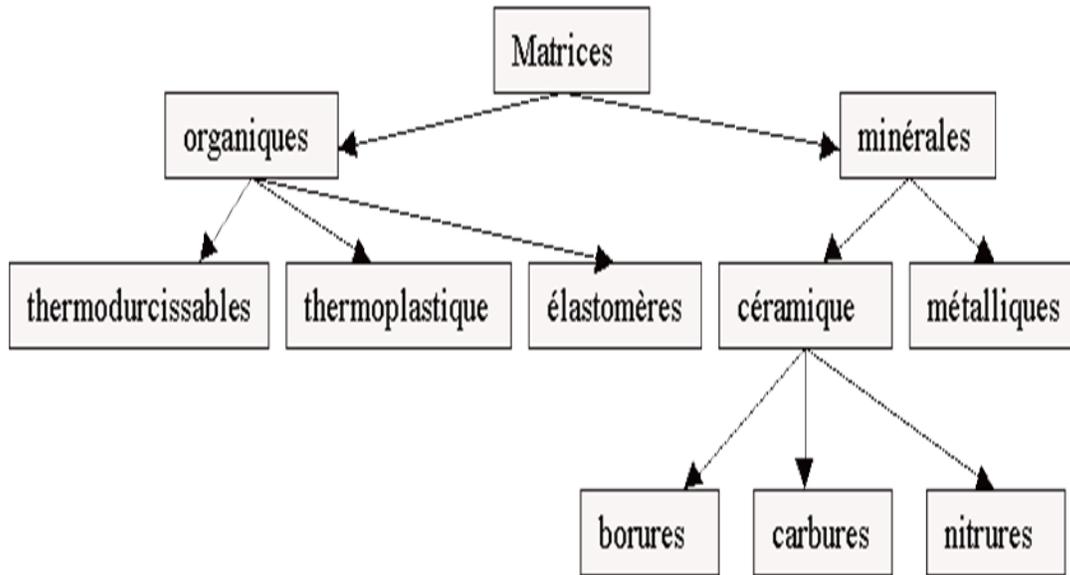


Figure I-5 Différentes familles de matrice. [10]

- **Matrice organique**

Elle se caractérise par deux familles de résines : thermodurcissables et thermoplastiques. Les Résines thermodurcissables sont les produits les plus employés actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites à cause de leurs propriétés mécaniques élevées, et comme leur nom l'indique, ces produits durcissent après un cycle de chauffage, appelé cycle de polymérisation ou cycle de réticulation.

Les matrices de ce type sont le plus souvent des résines polyesters, époxydes, phénoliques, silicones, élastomères et caoutchoucs.

- **Matrice métallique**

Parmi les matériaux métalliques utilisés pour constituer la matrice des matériaux composites, sont l'Aluminium et ses alliages, le Nickel, le Titane et le Magnésium. Un avantage essentiel apporté par une matrice métallique réside dans la possibilité d'utiliser le composite à des températures élevées, avec en plus de bonne conductibilité électrique et thermique et de bonnes

caractéristiques mécaniques transverses ; ce qui n'est pas le cas pour les composites à matrice organique.

- **Matrice en céramique**

Les céramiques sont utilisées pour la réalisation des pièces en matériaux composites et qui doivent supporter des températures excessivement hautes. Ainsi, ils sont utilisés pour la fabrication d'éléments de machines à combustions, des organes d'engins spatiaux très exposés aux contraintes d'origines thermiques. La matrice de ce type est très difficile puisque elle nécessite des manipulations à des températures très élevées d'où l'intervention de main d'œuvre très qualifiée [11]

I.1.7 Classification selon la nature des constituants

Selon la nature de la matrice et du renfort on rencontre plusieurs combinaisons possibles

a) Composites à matrice organique : Pour une utilisation à $T^{\circ} < 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Résines et charges sont associées à :

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
- Des fibres organiques : kevlar, polyamides, etc. ;
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

b) Composites à matrice métallique : Pour utilisation à $T^{\circ} < 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, métaux légers et leurs alliages sont associés à :

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
- Des fibres métalliques : bore ;
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de SiC.

c) Composites à matrice minérale : Pour utilisation à $T^{\circ} < 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, céramiques sont associées à :

- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales: carbures, nitrures, etc.[12]

I.1.8 Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être ajoutés à la résine pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter sa mise en œuvre ou en réduire le coût. L'addition de ces produits permet soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre.

I.1.8.1 Les charges

a). Les charges renforçant elles sont incorporées aux résines pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, selon leur forme géométrique elles sont classées en :

- **Charges sphériques:** Sphères de faible diamètre, de 10 à 150 um généralement, appelées aussi microbilles. La forme sphérique évite les concentrations de contraintes dans la matrice et diminue par conséquent sa sensibilité à la fissuration. Les microbilles de verre creuses représentent 99% des charges sphériques utilisées.
- **Charges non sphériques:** Le mica sous forme d'écaillés est le matériau le plus utilisé. Des écailles de dimensions allant de 100 à 500 um et d'une épaisseur de 1 à 20 um sont incorporées à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables pour des applications électriques et électroniques.

b) Les charges non renforçant es Les charges non renforçant sont ajoutées pour diminuer le coût de la résine sans altérer ses performances, ou bien pour améliorer certaines de ses propriétés:

- **Charges de faible coût:** extraites de roches ou de minerais (carbonates, silicates, silices, etc.), leur incorporation augmente le module d'élasticité, la dureté, la viscosité et la stabilité dimensionnelle mais diminue la résistance à la traction et à la flexion.
- **Charges ignifugeantes:** ont pour rôle de réduire ou d'empêcher la combustion de la résine.
- **Charges conductrices et antistatiques:** ces charges sont utilisées pour rendre la matrice conductrice de chaleur et d'électricité dans certaines applications. [13]

I.1.8.2 Les additifs

a) Les lubrifiants et agents de démoulage :

Ils sont utilisés pour faciliter le façonnage de la résine et réduire sa tendance à adhérer aux moules et mandrins.

b) Les pigments et colorants :

En fonction de la nature de la résine et de l'utilisation du matériau composite, ce dernier est coloré soit par des pigments (particules insolubles d'oxydes ou de sels métalliques) dispersés dans une pâte, soit par des colorants (composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant).

c) Les agents anti-retraits :

Le retrait de la résine après polymérisation peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. L'ajout de produits spécifiques anti-retrait, à base de thermoplastiques ou d'élastomères, permet de diminuer ou même d'annuler le phénomène.

d) Les agents anti-ultraviolets :

Ils ont pour rôle de protéger la résine des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. En les absorbant, ils évitent une dégradation prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par photo-oxydation. [13]

I.1.9 Les principales fibres

I.1.9.1 Les fibres de verre et propriétés

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. ces produits peu coûteux, associés de procédés assez simple d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport

performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. [14]

Le comportement du verre dans sa forme massive est dominé par son caractère fragile. En revanche, lorsqu'il est élaboré sous forme de fibres de très faibles diamètres, il devient tenace et révèle de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres sont obtenues à partir du verre textile composé d'un mélange d'oxydes : silice, alumine, magnésie, et oxyde de bore. Les proportions du mélange, et l'ajout d'oxydes modificateurs donnent au matériau final ses propriétés spécifiques. Différents types de verre peuvent être distingués :

- **Le verre E** : à usage général, bonnes propriétés électriques ;
- **Le verre D** : à hautes propriétés diélectriques, utilisé pour la construction de matériel de télécommunications ;
- **Le verre C** : résistant aux agents chimiques, enrobage des structures sévèrement exposées ;
- **Les verres R et S** : à caractéristiques mécaniques élevées, utilisés pour la réalisation de structures de hautes performances mécaniques. [15]

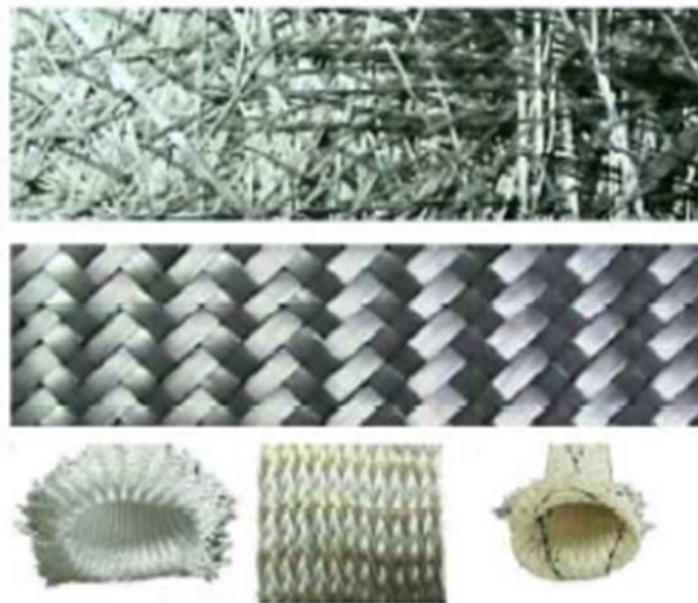


Figure I-6 Différentes architectures des fibres de verre

I.1.9.2 Les avantages et les inconvénients des fibres de verre

Tableau I-1 Avantages et inconvénients de la Fibre de verre

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">-Bonne résistance thermique et électrique-Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité.-Bonne compatibilité avec les matrices organiques.-Faible coût.	<ul style="list-style-type: none">-Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique.-Tenue au choc médiocre.

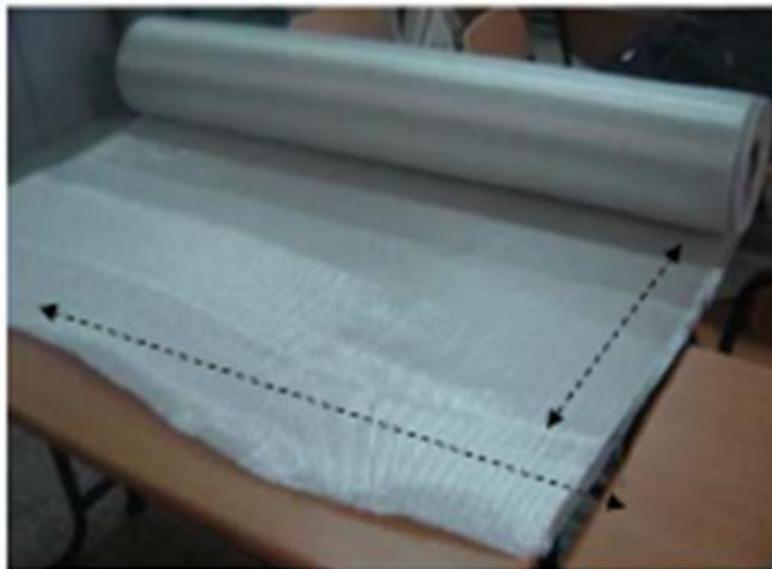


Figure I-7 Tissu de verre

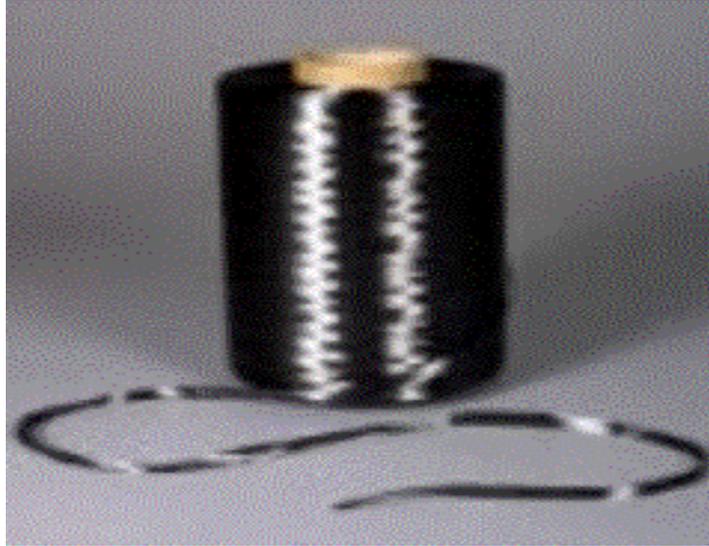


Figure I-8 bobine de Fibre de verre



Figure I-9 fibre de verre E

I.10 Les résine

La matrice a pour rôle de lier les fibres renfort, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donnée la forme désirée au produit.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement : [16]

- **Résine thermodurcissable:** polymère transformé en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur).
- **Résine thermoplastique:** polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité.
- **Résine thermostable :** polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.
- **Elastomère thermoplastique:** polymère fortement élastique.
- **Époxydes :** En raison de leur coût élevé et de leurs bonnes caractéristiques mécaniques (traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.), les résines époxydes sont essentiellement employées pour l'élaboration de matériaux composites à hautes performances (aéronautique, aérospatial, balistique, etc.), utilisables jusqu'à des températures de l'ordre de 190 °C ou en milieu agressif. La mise en œuvre des composites est facilitée par la très bonne mouillabilité des renforts et la compatibilité avec les différents types de fibres (verre, carbone, Kevlar). Leur faible retrait lors du moulage (<1%) permet d'obtenir des pièces précises. L'obtention de performances optimales requiert un temps de polymérisation assez long, ce qui se répercute sur le coût de fabrication.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrice

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontonne (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible. [17]

Tableau I-2 Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques.

Matrices	Thermoplastiques	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à Polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chute et déchets	Recyclable	Perdus

I.11 Les stratifiés :

Les stratifiés sont formés par l'empilement de monocouches unidirectionnels, chacun ayant une orientation θ propre par rapport aux axes principaux de la structure (Figure 1.1). Un choix judicieux de la séquence d'empilement et des différentes orientations permettra d'obtenir des propriétés mécaniques adaptées au champ de contrainte subi par la structure [20]. Il existe différentes classes de stratifiés :

- Équilibré : le stratifié compte autant de couches orientées selon l'angle $+\theta$ que l'angle $-\theta$
- Symétrique : les couches du stratifié sont disposées de manière symétrique par rapport au plan moyen
- Antisymétrique : les couches du stratifié sont disposées de manière antisymétrique par rapport au plan moyen
- Croisé : le stratifié compte autant de couches orientées à 0° qu'à 90° .

- Hybride: les couches successives du stratifié comportent des fibres de natures différentes

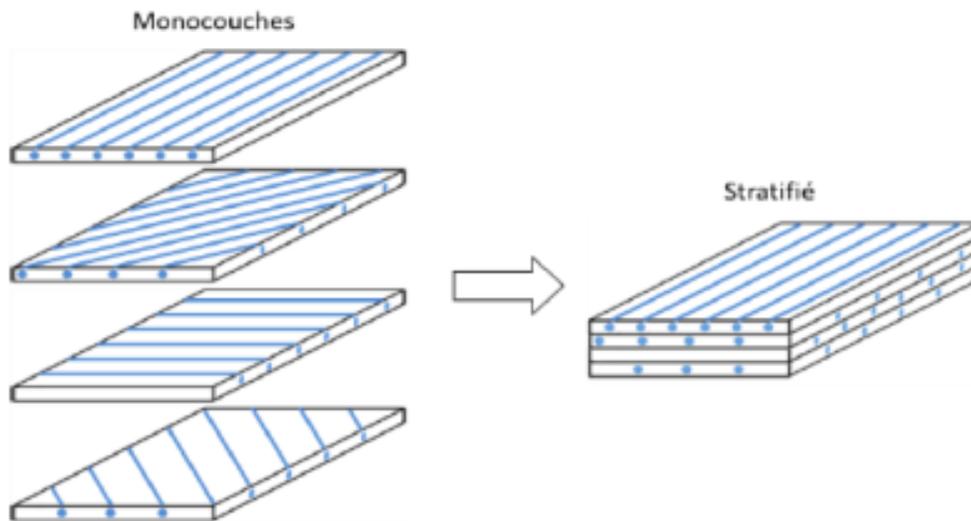


Figure I-12 Structure d'un composite stratifié

Les stratifiés résultent de la superposition de plusieurs couches ou pli, qui peuvent être des nappes unidirectionnelles, de tissus ou des mats, imprégnés de résine. Chaque couche peut avoir une orientation propre. Le choix de la nature et de la séquence d'empilement dépend de l'utilisation, en l'adoptant au mieux au champ de contraintes imposées, à savoir :

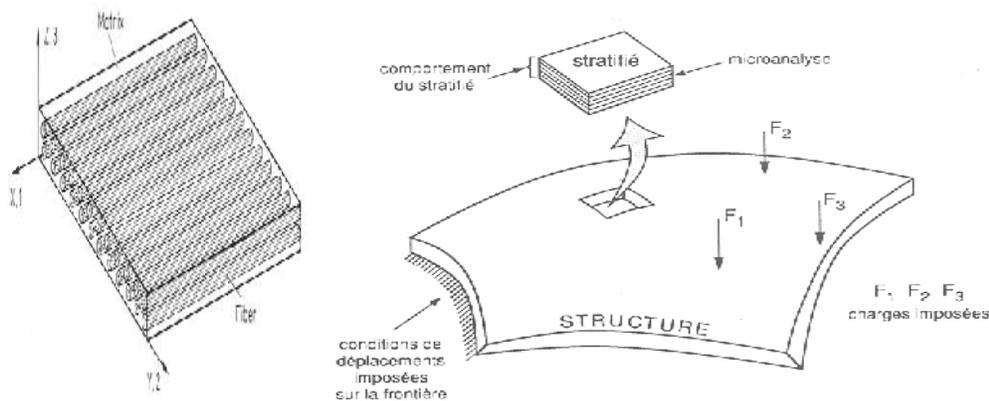
- Les couches unidirectionnelles présentent une grande rigidité. Elles constituent un type de stratifié de base au quel peut se ramener, en principe, tout autre type de stratifié. [21]
- Les mats sont peu résistants en traction.
- Une stratification croisée est sensible au délaminage inter-laminaire.
- Une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.
- En général on a tendance à utiliser une stratification symétrique afin de garantir une bonne planéité du stratifié après démoulage

I.11.1 Comportement mécanique des stratifiés :

L'étude du comportement mécanique des matériaux composites stratifiés comportera 2 phases:

1. L'étude du comportement mécanique de chaque pli, pris individuellement. C'est la micromécanique (figure I-13 (a)).
2. L'étude du comportement global du matériau constitué de la superposition de plusieurs plis de natures et d'orientations différentes. C'est la macro-mécanique (figure I-13 (b)).

Le comportement global d'une structure en composite sera ensuite analysé en utilisant les outils classiques du calcul des structures [22]



(a) (b)

Figure I- 13 Les deux phases (a) micro. Et (b) macro. De l'étude du comportement mécanique

I.2.Essai de traction uni axiale :

I.2.1. Introduction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux

matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques. Cet essai a comme objectif :

- de faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués ;
- de mesurer des courbes de traction sur des alliages d'aluminium, de cuivre et des aciers ;
- d'interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture etc...
- d'estimer la précision de mesure.

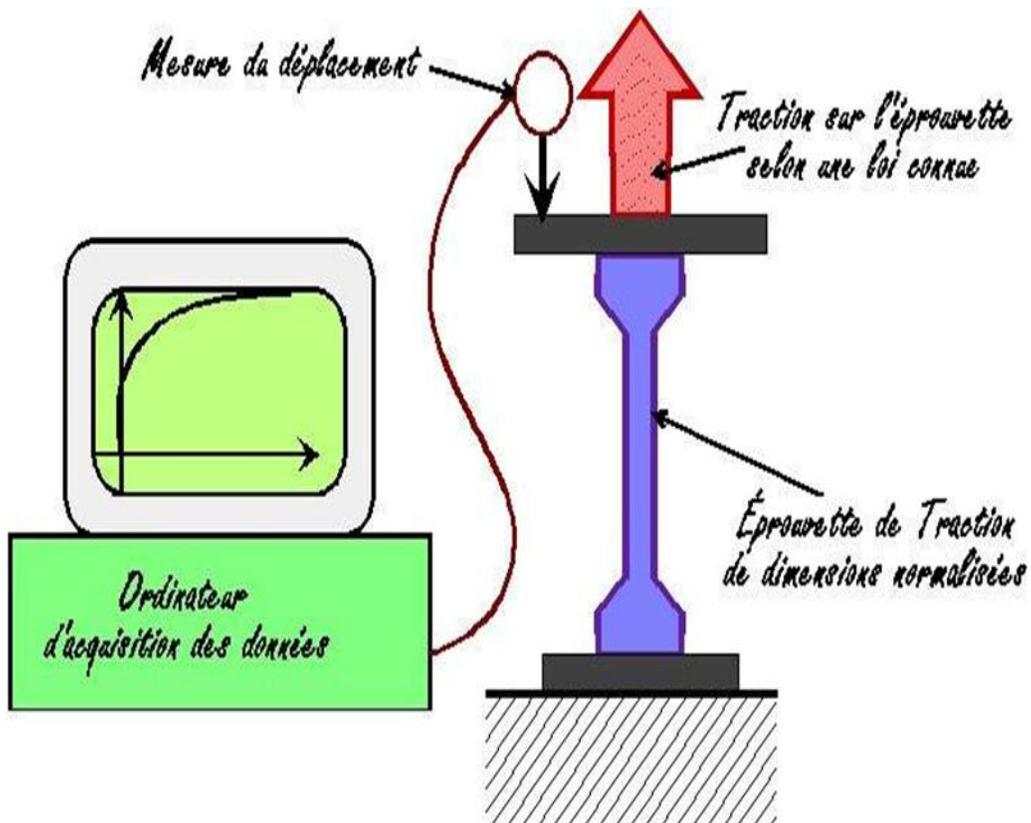


Figure. I-14 Principe d'un essai de traction

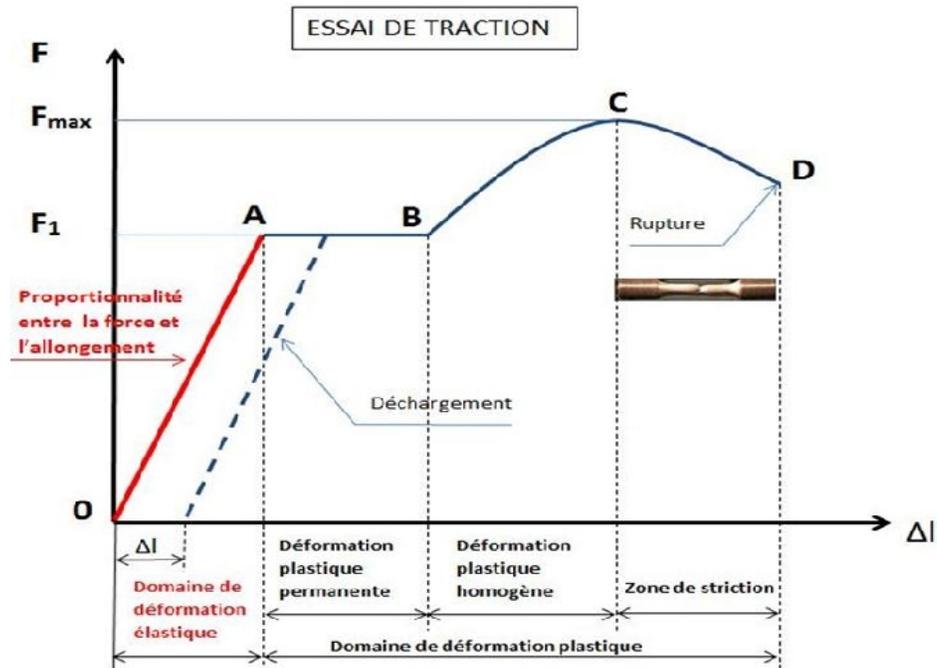
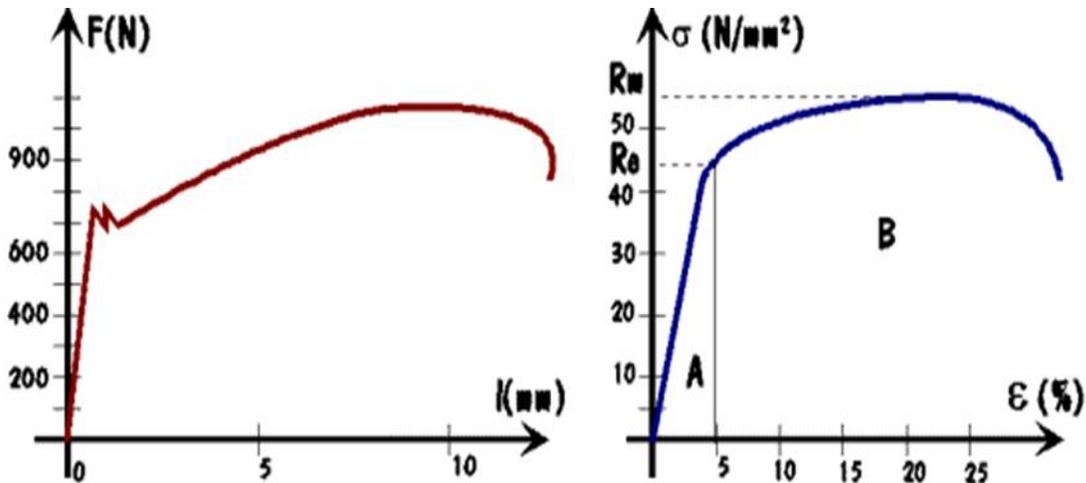


Figure I-15 Courbe type de traction.

I.3 Différentes étapes de l'essai de traction

Un enregistrement de l'allongement de l'éprouvette entre deux repères permet de mettre en évidence le comportement élastique et plastique du matériau qui la constitue à travers un graphe. Des paramètres caractéristiques du matériau peuvent alors être définis par le graphe d'un essai de traction.



Sur le graphe de gauche, on étudie l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort appliqué, c'est une courbe propre à l'éprouvette testée.

Sur le graphe de droite, on fait apparaître les paramètres du matériau, à savoir le pourcentage d'allongement, en fonction de la contrainte qui est le rapport de l'effort de traction sur la section l'éprouvette.

Figure I-16 Signification des courbes de traction.

I.3.1 Zone de comportement élastique (Zone A) :

L'éprouvette est sollicitée par une contrainte $< R_e$, pendant cette phase-là, une suppression de l'effort de traction entraînerait un retour de l'éprouvette à ses dimensions normales.

On dit que la forme de la courbe est réversible, et que le comportement de l'éprouvette est élastique.

R_e (N/mm²) est la contrainte de limite élastique du matériau. C'est un paramètre très important de la résistance des matériaux puisque l'on cherchera en permanence, pendant la durée de vie d'une pièce, à ce que les sollicitations auxquelles elle est soumise, la maintienne dans sa zone de comportement élastique.

I.3.2 Zone de comportement plastique (Zone B)

Le comportement plastique du matériau est atteint lorsqu'on dépasse la limite élastique R_e . À partir de ce moment-là, une suppression de l'effort de traction sur l'éprouvette laisse apparaître une déformation dite rémanente, c'est à dire que l'éprouvette ne retrouve plus sa forme initiale, la déformation n'est plus réversible.

Le comportement plastique de l'éprouvette permet de faire apparaître les caractéristiques suivantes:

- La contrainte de limite à la rupture R_m : c'est la valeur maximale de la contrainte pendant l'essai de traction.
- La contrainte de limite élastique à 0,2% : pour beaucoup de matériau, la courbe d'essai de traction ne montre pas un passage très net du domaine élastique au domaine plastique, on définit alors une limite élastique à 0,2 % notée $R_{\ll 0,002}$ comme étant la contrainte provoquant un allongement rémanent de 0,2 %.
- Le coefficient de striction qui caractérise la variation relative de la section.
- Le coefficient de poisson qui caractérise la variation relative de diamètre.[23]

I.4 Différents types de ruptures en traction

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de diverses micros fissures mécaniques élémentaires :

- La rupture des fibres,
- La rupture transverse de la matrice,
- La rupture longitudinale de la matrice,
- La rupture de l'interface fibre- matrice,

Généralement un mécanisme n'est pas isolé, mais des mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

Chapitre II

Mécanisme

d'endommagement

II-1 Introduction:

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une "discontinuité" locale de matière appelé fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture

L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut.

On parlera de microfissuration. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de microfissuration. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique.

II-1-2 Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel :

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- La rupture des fibres,
- La rupture transverse de la matrice,
- La rupture longitudinale de la matrice,
- La rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent.

Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

II-1-2-1 Microfissuration matricielle :

Dans les cas des CMC (composites à matrice céramique). Ce mécanisme intervient en premier lieu du fait d'une faible déformation à la rupture de la matrice fragile et constitue l'un de leurs mécanismes de dégradation prépondérant.

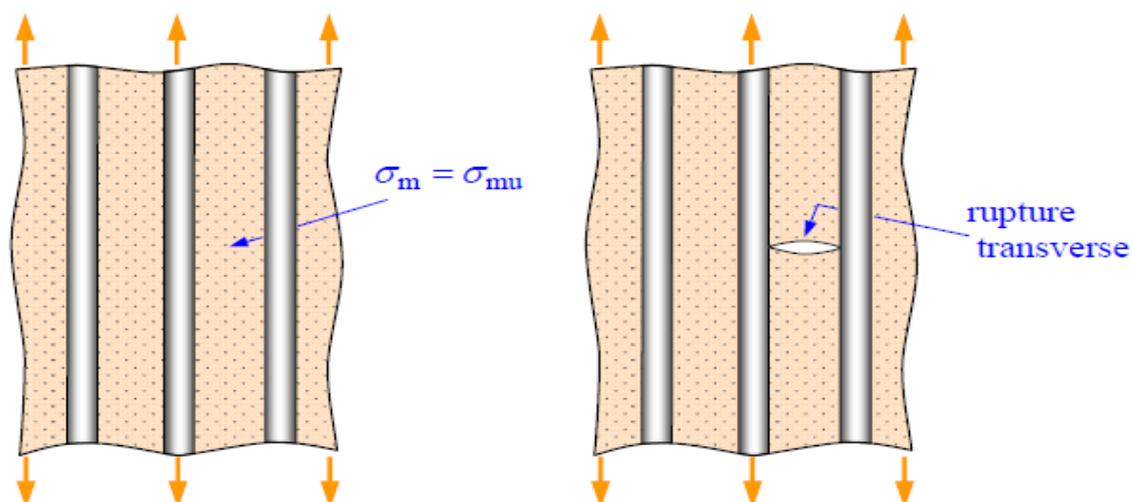


Figure II-1 Rupture transverse de la matrice [1]

Les fissures matricielles s'initient généralement aux zones de concentration des contraintes telles que les hétérogénéités du matériau.

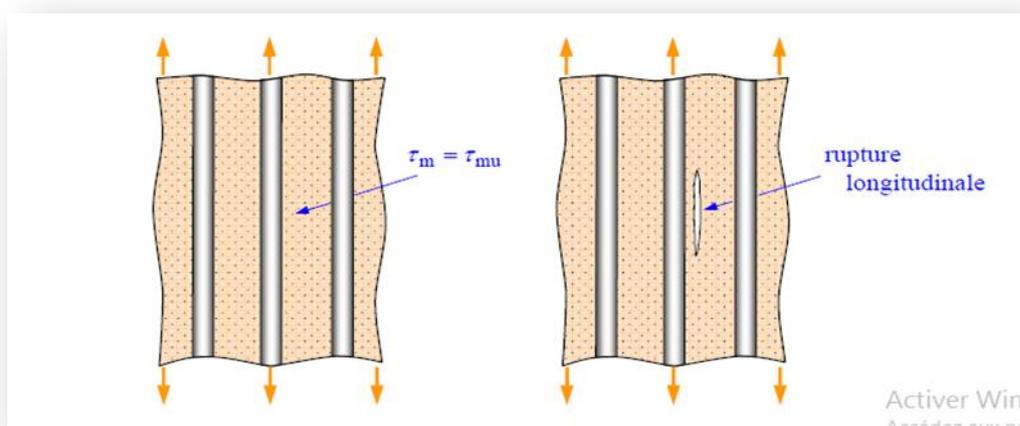


Figure II-2 Rupture longitudinal de la matrice [1]

Elles se propagent ensuite suivant l'orientation du chargement, notamment perpendiculairement à l'axe de traction ou parallèlement à la sollicitation dans le cas d'un cisaillement.

On notera que certains auteurs distinguent la fissuration matricielle suivant sa localisation inter et intra torons.

II-1-2-2 Décohésion fibre matrice :

Pour les résines plastiques présentant une importante déformation à rupture, l'interface fibre-matrice constitue le point plus faible à l'intérieur des plis.

Ces ruptures d'adhérence, généralement induites par des contraintes de cisaillement locales, se propagent le long des fibres jusqu'à former des fissures transverses (traversant l'intégralité d'un pli) dans le cas des stratifiés unidirectionnels ou longitudinales dans le plan des plis dans le cas de composites tissés.

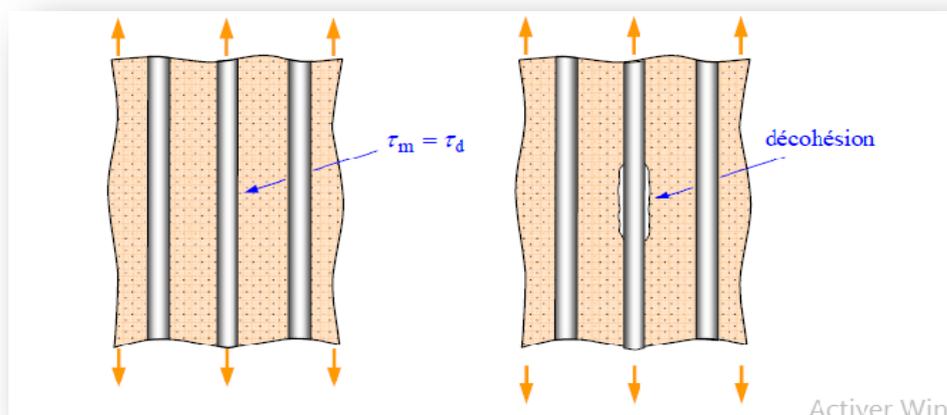


Figure II-3 Décohésion fibre-matrice [1]

En ce qui concerne les CMC en revanche, ce mécanisme est associé à la fissuration matricielle lorsque ces défauts atteignent une zone de renfort.

La nature de l'interface joue dans ce cas un rôle majeur qui conditionne la progression de l'endommagement :

- Si l'interface est forte, elle peut limiter voire stopper l'extension des fissures en assurant un transfert de charge vers les parties saines.
- Si l'interface est faible, la fissuration matricielle est déviée à l'interface amenant comme auparavant des fissures transverses (suivant le contour des renforts perpendiculaires à la sollicitation). Ou longitudinales (à l'interface des renforts parallèles à la sollicitation).

II.1.2.3 Fissurations des composites stratifiés

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels, de tissus ou de mats peuvent présenter différents type de fissuration (inter laminaire, intra laminaire, ou Trans laminaire). Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.

- Fissures inter laminaire : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches. Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai en mode de flexion entre appuis rapprochés.
- Fissures intra laminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort a l'intérieure des couches. Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple

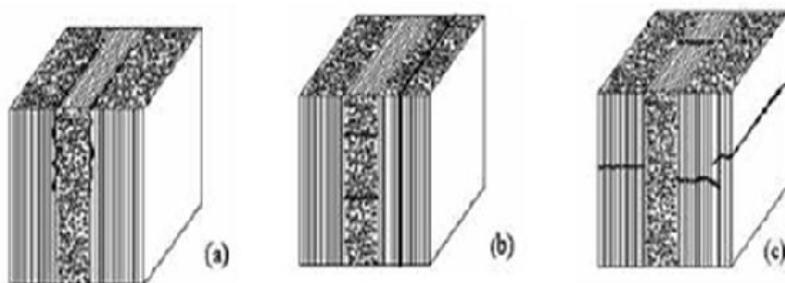


Figure II-4 différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié

II.2 Critères de rupture

Les critères de rupture sont établis dans le cas d'une couche et peuvent être classés suivant:

- Le critère de la contrainte maximale,
- Le critère de la déformation maximale,
- Les critères interactifs ou critère énergétiques.[32]

Les critères de la contrainte maximale et de déformation maximale ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble des résultats expérimentaux. D'autre part, ces critères excluent l'existence d'interactions entre les contraintes ou déformations principales: les mécanismes de rupture longitudinale, transversale ou en cisaillement sont supposés se produire indépendamment.

Des critères interactifs ont alors été recherchés en étendant aux matériaux orthotropes le critère de Von Mises, utilisé pour les matériaux isotropes. Le critère de Von Mises est relié à l'énergie de déformation emmagasinée par unité de volume du matériau déformé. C'est la raison pour laquelle ces critères interactifs sont parfois appelés critères énergétiques. Toutefois dans le cas de matériaux orthotropes, ces critères ne sont plus reliés exclusivement à l'énergie de déformation.[33]

II. 3 Composite unidirectionnel soumis à une traction transversale

Dans le cas du composite unidirectionnel soumis à une traction transversale, la rupture se produit soit par rupture de la matrice, soit par décohésion de l'interface fibre- matrice. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture de la matrice. Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est inférieure à la contrainte de décohésion σ_d en traction l'interface fibre- matrice. Dans le cas contraire ($\sigma_m > \sigma_d$) la rupture du composite se produit par rupture de l'interface fibre- matrice.[34]

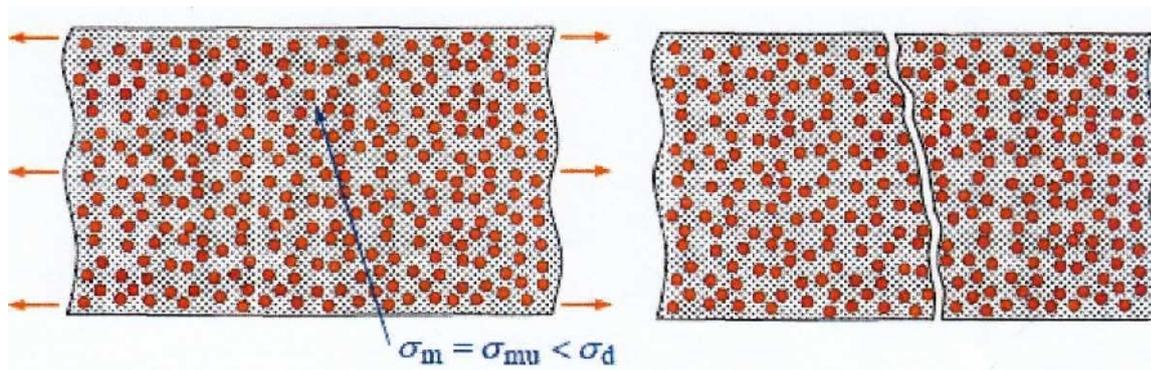


Figure I-5 Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transversale

I.4 Rupture de fibre :

Ci des cassures de fibres peuvent survenir dans le prolongement des décohésions fibres matrice la rupture des fibres intervient, par définition du renfort, a un stade avancé de l'endommagement de la structure et de manière brutale (comportement fragile).

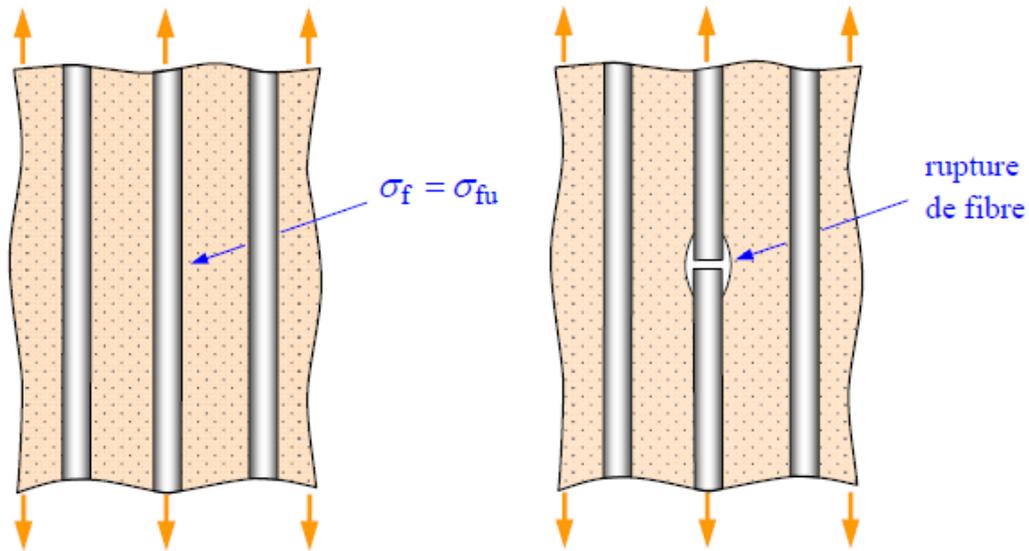


Figure II-6 Rupteur fibre[1]

Elles interviennent essentiellement au sein des plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation pour lesquels les fibres reprennent le plus d'efforts.

II--5Délaminage :

Si les trois mécanismes présentés ci-avant peuvent être considérés comme diffus au sein du pli, le délaminage ou décohésion inter-plis correspondant en revanche a une dégradation d'ordre macroscopique dans la mesure où il est visible à l'œil nu.

Ce décollement s'amorce généralement dans les zones de forts gradients de contrainte comme les bords libres de la structure ou près des défauts macroscopiques pour progresser ensuite en séparant les couches constituent évidemment des facteurs aggravants pour ce phénomène.

Notons que dans le cas de structure impacté, le délaminage est fortement couplé avec la fissuration matricielle.

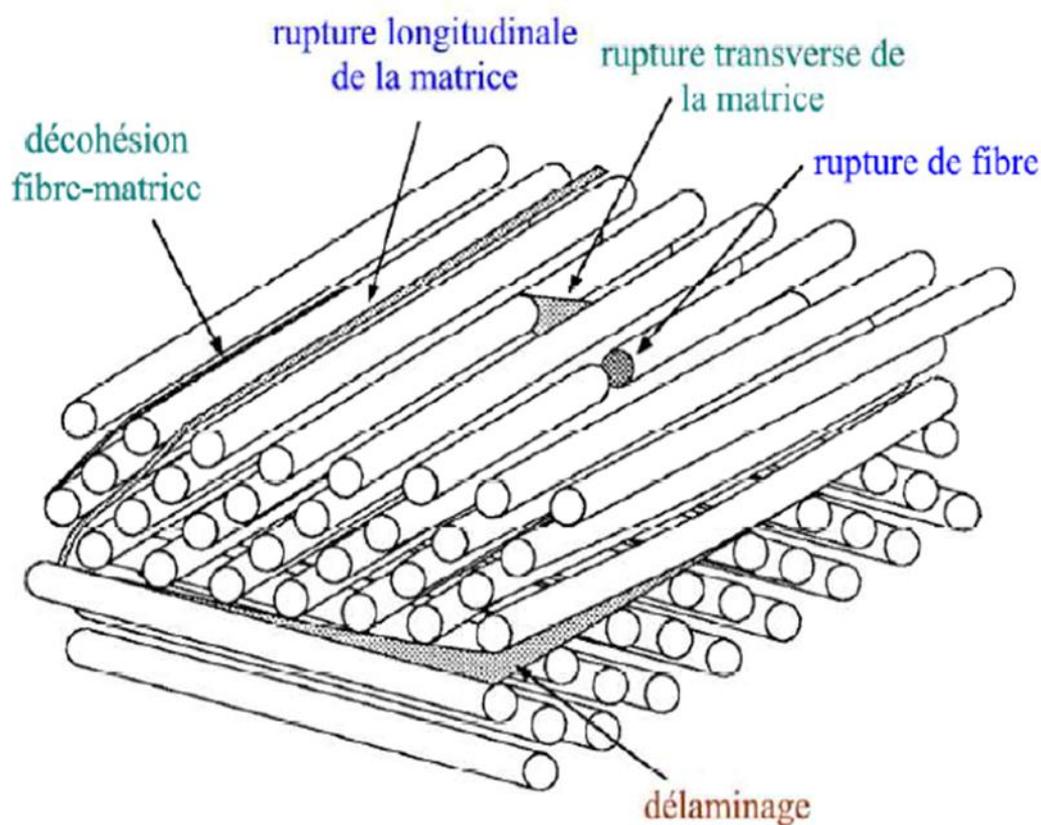


Figure II-7 Mécanisme d'endommagement observé dans les stratifiés [1]

I.6 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissée qui se révèlent à différentes échelles d'observation. Les plus significatifs sont les suivants :

- A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice et d'autre part, la rupture de fibre, de matrice.
- A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter plis : c'est le délaminage.
- A l'échelle mésoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intra-laminaires mais également la rupture de fibre qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.

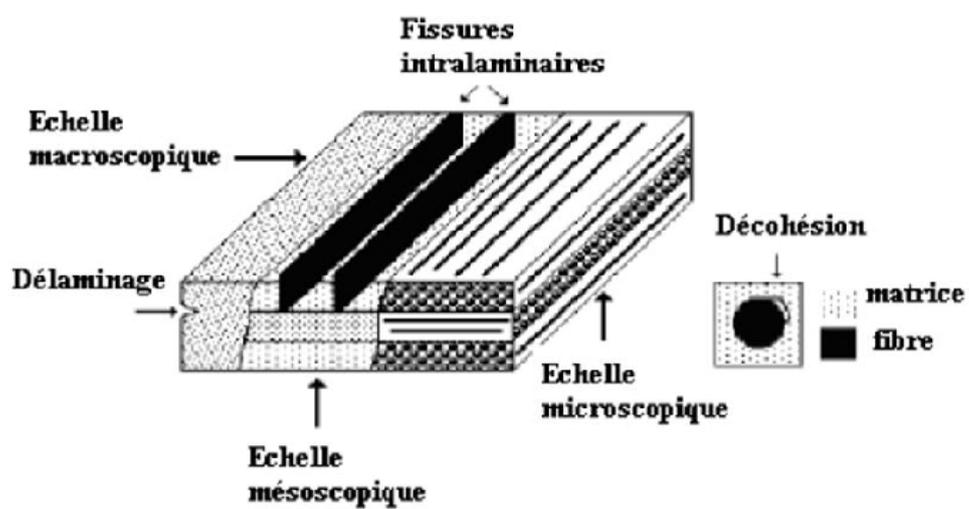


Figure II-8 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Sur un matériau stratifié

Chapitre III

étude expérimentale

(Essai de traction)

III.1 Introduction :

L'hétérogénéité de la structure des matériaux composites est à l'origine de la multiplicité de types de dégradation, qui peuvent être distingués par leur nature et leur mode de développement et qui conduisent à l'endommagement du matériau. Dans le cas des composites renforcés par des fibres, où la matrice est généralement plus fragile que les fibres, l'endommagement dépend de la fraction volumique de fibres, leur diamètre, leur longueur, leur résistance à la rupture et celle de la matrice. Il débute évidemment par la création d'une fissure dans la matrice, suivie par sa transmission aux fibres. Des interfaces suffisamment faibles procurent des déviations des fissures le long des fibres. Par conséquent, les fluctuations de fractions volumiques de fibres introduisent dans ce type de composites des zones où la largeur de la matrice est plus importante que la moyenne, ce qui y engendre une fissuration précoce.

Dans l'objectif d'améliorer les performances des prothèses fabriquées par l'Office National d'Appareillages et D'accessoires pour Personnes Handicapées (ONAAPH), nous caractérisons, en traction, le matériau composite utilisé pour la fabrication des prothèses, afin d'identifier le produit ainsi que les éventuels points d'intervention permettant d'atteindre notre objectif. [23]

III.2 Présentation du matériau étudié :

Le matériau composite étudié est destiné à la fabrication des prothèses orthopédiques de l'ONAAPH. Il est composé de :

- Fibre de verre.
- Résine PMMA.
- Poudre des noyaux de dattes.

III.2.1 Propriétés physicochimiques du renfort fibres de verre caractéristiques

- Les renforts les plus répandus pour les applications courantes sont les fibres de verre. Elles sont fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). Leurs propriétés mécaniques sont de l'ordre de 70 GPa et 2200 MPa respectivement pour le module d'élasticité et la résistance en traction.

Dans les applications composites, le renfort peut se présenter sous forme de fils ou sous forme d'armures bidirectionnelles : séparation locale entre deux couches qui s'amorce généralement aux bords libres de la structure.

Le comportement en traction spécifique aux composites à renfort tissés se manifeste par l'apparition de fissures matricielles, avant la rupture, causant une non-linéarité des courbes contrainte-déformation. Elle se matérialise par le point d'inflexion, qui peut être associé à la fissuration matricielle.

Tableau III.1 Caractéristiques de la fibre de verre

Fibre de Verre	Diamètre du Filament Élémentaire (µm)	Densité Kg/m ³	Charge de rupture en Traction (Mpa)	Module d'Elasticité (Mpa)	Charge de Rupture en Compression (Mpa)	Allongement à la Rupture (%)	Reprise d'Humidité à 20°C 65%HR (%)
E	à 30	.54	400	3000	200	.8	.1

III.2.2 Propriétés physicochimiques des noyaux de dattes

- La composition en l'état du noyau de dattes a été déterminée au laboratoire de biochimie (Tableau III-2)

Tableau III.2 : Composition chimique des noyaux de dattes

Eléments	Valeur (%)	Eléments	Valeur (%)
Eau	15,76	cendre	0,67
Cellulose	4,92	K	0,325
Sucre totaux	14,06	P	0,23
Protéines	12,71	Ca	0,2
Sucres réducteurs	6,5	Na	0,056
Lipides	5,21	Mg	0,259
		Fe, Zn, Cu,	0,67

- Une autre analyse des éléments du noyau de dattes a été effectuée par le laboratoire de biochimie à différents des températures (600°C;800°C;1000°C) montrant la teneur en carbone du noyau de dattes (Tableau III-3).

Tableau.III-3 Analyse élémentaire des carbons fabriqués.

Eléments	Teneur (%)		
	Carbonisé à 600°C	Activé à 800°C	Activé à 1000°C
Soufre	0,05	0,04	0,04
Carbone	85,09	86,13	87,11
SiO ₂	0,14	0,19	0,09
Al ₂ O ₃	1,11	0,78	0,69
Fe ₂ O ₃	Traces	0,05	0,06
CaO	0,7	0,51	0,6
MgMnO	0,61	0,69	0,05

III.2.3 Propriétés physicochimiques de la matrice (PMMA)

La matrice d'un composite sert à figer le renfort dans une géométrie donnée tout en assurant le transfert de charge au renfort. Elle assure aussi la fonction de protection du renfort vis-à-vis de l'environnement extérieur. Les matrices thermoplastiques sont des chaînes linéaires ou ramifiées à liaisons covalentes. Ces chaînes sont liées entre elles par des liaisons faibles de type Van der Waals et hydrogène par exemple.

Le poly (méthacrylate méthyle) (PMMA) appartient à cette famille. Il est le polymère du méthacrylate de méthyle, de formule chimique $(C_5H_8O_2)_n$. Il s'agit d'un polymère incolore clair disponible sur le marché sous forme de pellets, de feuilles ou et peut être mis en solution aqueuse par le fabricant avant utilisation par le praticien. Cette résine qui appartient à la classe des résines thermoplastiques dont le ramollissement ou la température de transition vitreuse T_g est à 105°C. Sous cette température, le PMMA est rigide et se comporte comme un verre organique. Au-dessus de 125°C, le polymère devient souple et capable de se déformer. [24]

Tableau III-4 Propriétés physiques du PMMA

Propriété physique	Valeur
Densité	1,15-1,19 g/cm ³
Absorption de l'eau	0,3-2 %
La contraction volumique lors de la polymérisation	21%
Indice de réfraction	1,489
Module de Young	2,4 GPa

III.2.4 Mise en œuvre du matériau composite étudié :

Pour but de confectionner des éprouvettes haltères destinés aux essais de traction, afin de terminer les propriétés mécaniques en traction de composite PMMA/Fibres de verre utilisé dans la fabrication des emboitures au sein d'ONAAPH. L'architecture de composite de la plaque est le même de celle de l'emboiture, à savoir deux fois 2 perlon/2 fibre de verre/2 perlon. L'élaboration de la plaque a été réalisée dans l'atelier de l'ONAAPH-Annaba, par le technicien responsable. La figure 1 décrit les étapes de la fabrication similaire au procédé de fabrication des emboitures indirectes décrit précédemment. [23]

Pour l'élaboration de ce type de matériau, trois approches pour l'intégration des particules dans les composites à fibres longues son généralement adoptées :

- 1 - La dispersion des charges dans la matrice, puis l'injection du mélange dans la préforme ;
- 2- La mise en place des charges dans les fibres puis l'ensemble est imprégné par la résine ;
- 3- L'introduction des charges dans des composites à fibres longues déjà imprégnées.

Dans notre cas, nous avons opté pour la première approche (figure.III.1), en raison de la facilité de sa mise en œuvre, ainsi que la disponibilité des moyens.

Bien que ce procédé permette de contrôler la dispersion des charges dans la suspension, l'intégration de ces dernières à ce stade élève la viscosité, ce qui constitue un facteur défavorable à la pénétration des dans la préforme.

La dispersion des charges dans la résine est une étape cruciale dans l'élaboration des composites chargés. Cette étape est déterminante pour l'obtention d'un produit final homogène, en offrant le moyen de contrôler les propriétés d'usage du composite. [23]

Il existe trois méthodes principales pour la dispersion des particules au sein d'une matrice polymère :

1. Dispersion par l'intermédiaire d'un solvant : ça consiste à disperser les particules dans un solvant dans lequel le polymère est soluble, puis l'ajout du polymère pendant l'agitation.

2. Dispersion à l'état fondu : le principe de cette se repose sur le mélange direct des particules avec le polymère à l'état fondu.

3. La polymérisation in-situ : dans ce cas, on mélange les particules dans la solution de monomère, puis on ajoute l'initiateur au mélange pour catalyser la polymérisation. Pour la dispersion des charges dans le polymère, nous avons réalisé des tests de dispersion dans une résine commerciale, par cette voie. Vu la nature du polymère utilisé (PMMA) et les conditions de notre travail, cette méthode semble la plus adéquate pour l'élaboration de nos échantillons.

- La mise en œuvre de matériau composite modifié est obtenue à partir du composite orthopédique de référence (Fibre de verre + Résine PMMA), auquel on a rajouté 5% de poudre de dattes dans le poids est de 18g.

Les 18g de poudre de dattes sont mélangés avec 350g de résine PMMA dans un agitateur pendant 30 minutes à température ambiante.

Une fois le mélange de Résine et poudre des noyaux dattes broyés, il est versé dans le moule contenant la fibre de verre.

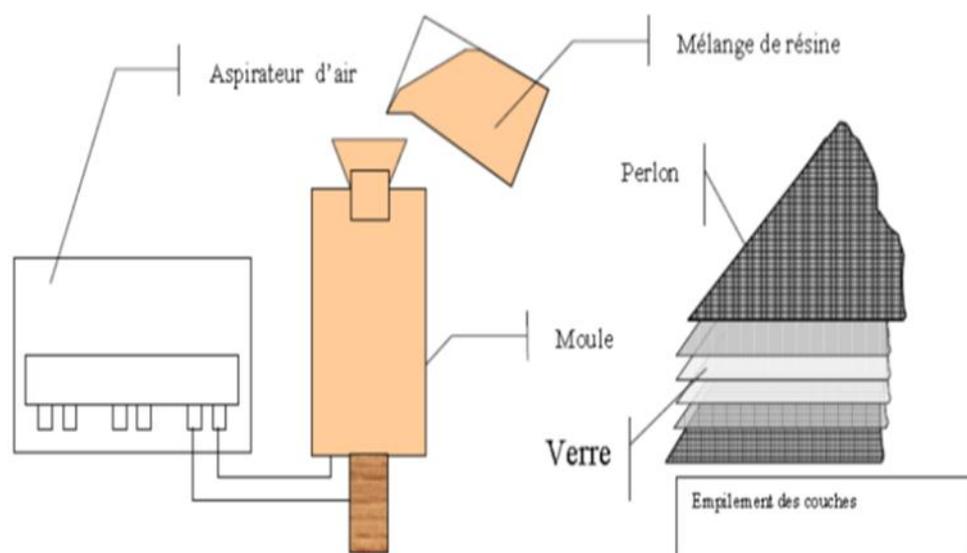


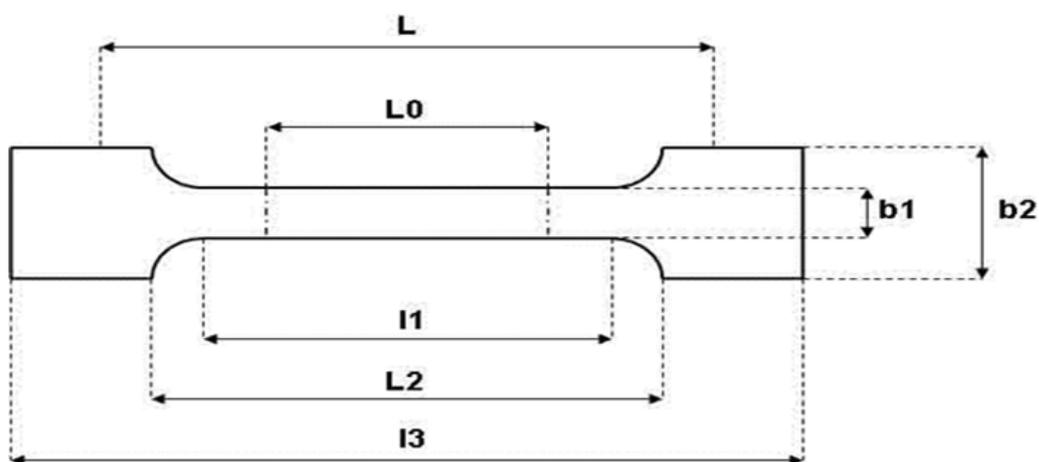
Figure III-1 Réalisation des matériaux de l'étude[24]

III.2.5 Préparation et mise en œuvre des éprouvettes d'essai de traction :

A partir des plaques de composite modifié durcies, on procède au découpage des éprouvettes selon la norme [AFNOR NF EN ISO 527].



Figure III-2 La plaque composite élaborer .



$$L_3 = 15 \text{ mm}$$

$$b_1 = 10 \text{ mm}$$

$$h = 4 \text{ mm}$$

Figure III.3: Dimension d'éprouvette selon la norme AFNOR NF T 527-105

Les éprouvettes testées ont les dimensions suivantes :

Tableau III-5 Dimensions des éprouvettes

	Ep 1	Ep 2	Ep 3	Ep4	Ep5
Longueur(L_3)(mm)	148,80	148,40	152,34	151 ,50	150,95
Largeur (b_1) (mm)	10	9,70	10,30	10,70	10
Epaisseur(h)(mm)	4,83	4,27	4,60	4,70	4,35



Figure II.4.Eprouvettes d'essai.

III.3 Banc et conditions d'essai

III.3.1 La machine d'essai:

Les éprouvettes sont sollicitées en traction monotone sur une machine d'essais universelle type MTS 43 (URMA/CRTI-Annaba). Dotée d'un capteur de force de 50 kN et pilotée par ordinateur. La vitesse de déplacement de la traverse est imposée directement au programme d'essai, elle est choisie selon la norme AFNOR NF T 527-105. Dans notre cas, elle est constante et égale à 1 mm/min.



Figure III-5 Machine de traction MTS 43 [25]

III.3.2 Microscopie optique :

L'observation macroscopique et microscopique a été réalisée dans l'unité de recherche en matériaux avancés (URMA/CRTI) d'Annaba.

L'observation du faciès de rupture est réalisé pour une éprouvette endommagée, en composite de fibre de verre et la résine acrylique le poly (méthacrylate méthyle) (PMMA) charger de noyaux de datte broyés.



Figure III.6 Microscope optique [25]

III.4 Comportement mécanique en traction des éprouvettes testées :

III.4.1 Courbes expérimentales du comportement mécanique charge-allongement

Cinq (05) éprouvettes normalisées sont soumis aux essais de traction avec les conditions préétablies ont donné les courbes comportementales suivantes (Figure III-7)

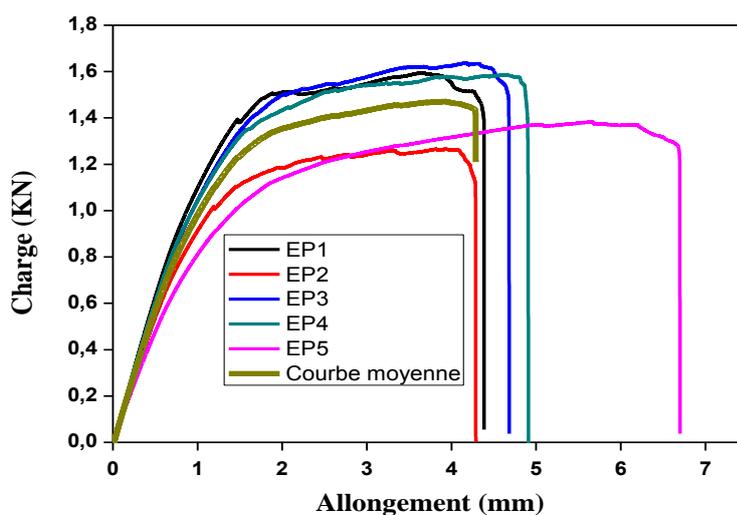


Figure III.7. Courbes de comportement expérimental charge-allongement en traction Statique.

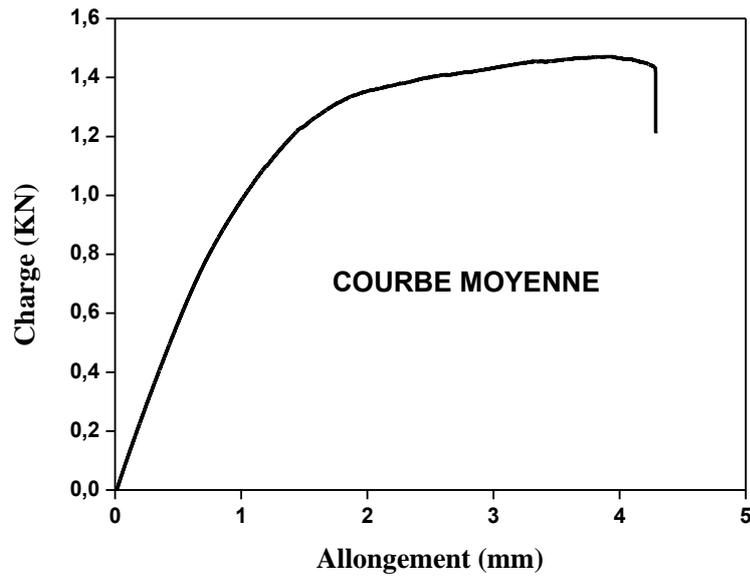


Figure III-8 Courbe moyenne de comportement expérimental charge-allongement en traction Statique.

III.4.2 Interprétation des courbes expérimentales de comportement obtenues

Les Cinq courbes charge- déplacement des éprouvettes qui ont la même allure montrent un comportement élastique linéaire, suivi d'un comportement non linéaire pour aboutir à une rupture brusque.

L'inclinaison des pentes de la partie linéaire de ces courbes dénotent une légère variation des modules d'élasticité à la traction. Ceci est dû aux erreurs de découpe des éprouvettes à partir des plaques et aussi à la présence de porosités dans le matériau.

L'apparition de fissures matricielles avant la rupture est à l'origine du non linéarité des courbes de comportement.

III.4.3 Résultats expérimentaux obtenus :

Tableau III-6 Résultats expérimentaux obtenus

N° éprouvette	S_0 (mm ²)	E (MPa)	F_{max} (kN)	F_r (kN)	Al,(corr,) (mm)
1	48,3000	1606,835	1,596	1,37	4,38
2	41,4190	1597,719	1,266	1,11	4,28
3	46,0000	1647,268	1,639	1,30	4,68
4	50,2900	1481,451	1,588	1,13	4,91
5	43,5000	1357,475	1,384	1,18	6,70

Tableau III-7 Calcul des propriétés mécaniques en traction uniaxiale

Numéro de l'éprouvette	Propriétés Mécaniques				
	E (MPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	σ_r (MPa)	ε_r (%)
1	1606,835	28,38	2,49	31,21	3,74
2	1597,719	24,27	2,03	28,88	3,66
3	1647,268	30,61	2,89	33,17	3,99
4	1481,451	26,65	2,7	29,74	4,19
5	1357,475	25,32	3,11	29,39	5,8
Valeur Moyenne	1538,1496	27,046	2,644	30,478	4,276
Ecart Moyen	94,94928	1,9592	0,3072	1,3696	0,6096

Le tableau III-7 représente les valeurs du module E , la contrainte au seuil d'écoulement plastique σ_y , la déformation au seuil d'écoulement ε_y , la contrainte à la rupture σ_r et la déformation à la rupture ε_r .

Toutes ces valeurs ont été calculées par le logiciel *MTS Test Suite*.

II.5 Observation par microscope optique après l'essai de traction

Les éprouvettes suivantes, ayant fait l'objet d'essais de traction ont été soumis à des observations microscopiques sur leurs faciès de rupture et sans aucun traitement de surface préalable.



Figure III-09 Photographie des éprouvettes testées

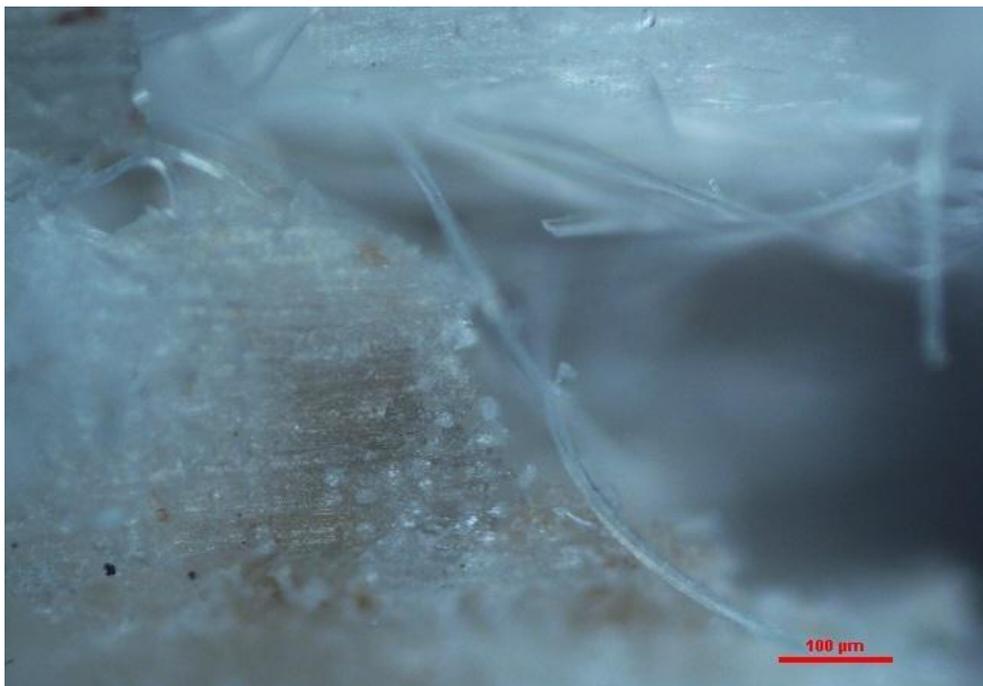


Figure III -10 Observation des faciès de rupture de la fibre sur le côté tendue de l'éprouvette



Figure III-11 Observation des faciès de rupture au milieu de l'éprouvette



Figure III-12 Observation des faciès de rupture sur le côté de l'éprouvette

En observant les faciès de rupture sur microscope, on peut affirmer ce qui suit :

- Il apparaît une décohésion des fibres du tissu de verre/matrice. Le détachement du tissu de perlon indique que sa liaison avec la matrice est faible. Après décollement, le transfert de la contrainte restante à la matrice peut se produire et une déformation supplémentaire est possible. La morphologie de la fracture de ce composite montre une fracture ductile avec quelques étirements de la matrice.
- une décohésion des fibres du tissu de verre et illustre la rupture de fibres nette et droite perpendiculairement à l'axe de traction. Néanmoins, après rupture, les deux moitiés de l'éprouvette restent reliées par quelques fibres dont on peut noter un déchaussement progressif si l'on continue l'essai.

Conclusion générale

Les matériaux composite PMMA/Fibres de verre sont largement utilisés dans la fabrication des prothèses orthopédiques de par leur légèreté, coût modéré et leur mise en œuvre facile. Dans ce contexte, nous avons étudié leur rupture en traction uniaxiale, les premiers résultats obtenus nécessite une analyse plus poussée afin d'identifier leur comportement d'endommagement

L'influence de la séquence d'empilement du composite de référence sur le comportement mécanique a été envisagée. Les résultats montrent que la séquence de deux plis de perlon et un pli de tissu de verre fait augmenter considérablement le module d'élasticité et réduit la contrainte à la rupture. D'autre part, l'incorporation de GND (5% ou 10%) a donné une diminution maximale du module d'élasticité de 26,8% alors que les contraintes élastique et à la rupture ont été améliorées de 18% et 11,8% respectivement. Le taux de 5% a donné les meilleures performances en termes de contraintes. En ce qui concerne le mécanisme de rupture, une décohésion des fibres du tissu de verre/matrice est observée, par contre, une consolidation nette prend place entre fibres et la matrice contenant les GND.

Les courbes de comportements mécaniques obtenus sont linéaires élastiques avec des pentes différentes dénotant une variation légère des modules d'élasticité à la traction. Une dispersion des résultats a été observée pour les valeurs des modules d'élasticité en traction. Elle est liée principalement au mode de mise en œuvre des

L'examen du faciès de rupture a fait ressortir un délaminage des plis avec rupture des fibres et fissuration accompagnée de rupture de la matrice

En prenant compte des moyens que nous disposons, pour les essais d'élaboration des échantillons de composite modifié, il est plus commode de :

- Incorporer la charge dans la résine avant l'injection sur les fibres.
- Utiliser la technique de la polymérisation in-situ pour réaliser la dispersion des charges dans la résine.
- Opter pour une granulométrie de charge la plus fine possible

Référence bibliographique

- [1] Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1>, 2010-2011]
- [2] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre
- [3] D. Trichet, “Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites”, Thèse de doctorat, école doctorale sciences pour l’ingénieur de Nantes, Jan 2000.
- [4]. Vu ThienBinh, IUT B - 1^{ère} année GMP, Matériaux Composites TD 2005-2006 (1)]
- [5] IUT B - 1^{ère} année GMP , Matériaux Composites TD 2005-2006 .
- [6] L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux Composites," *Ministère de l'économie des finances et de l'industrie*, pp. 1-47, 2002.
- [7] "GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES," *Centre d'animation régional en matériaux avancés*, 2006.
- [8] B. E. H. LY, "Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres cellulose," INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2008.
- [9] A. BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques de matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [10] E. J. JULES, "Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l’hystérésis diélectrique." ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D’ARTS ET METIERS, 2001.
- [11] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*, 1999.

- [13] DANIEL GAY: "Matériaux Composites», Hermès ,1999
- [14] Composites, GC1, A. Guidoum
- [15]BERTHELOT J.M., « Matériaux composites comportement mécanique et analyse Des structures », Masson, 1992
- [16] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. A346
- [19] D. GUILLON, "Fibres de verre de renforcement," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. A2110
- [20] D. Gay, Matériaux composites, 5ième édition ed, 2005.
- [21] D. Rouby Comportement des composites à fibres longues et matrice flexible et tenace. Micromécanique des composites (1999).
- [22] B. BONNET, Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles, thèse de doctorat, école des Mines de Paris, Avril 2005
- [23]Rapport scientifique annuel », Unité de recherche en matériaux avancés URMA/CRTI Annaba, 2016.
- [24] chemami article hct en correction Amélioration des Performances d'un Matériau Composite Stratifié Biomécanique chargé de granulés de noyaux de dattes
- [25] l'unité de recherche en matériaux avancés (URMA/CRTI) d'Annaba.

Annexe

Résultats de l'exécution d'essai (Contrainte –déformation)**éprouvette 1 :**

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,830	mm
Surface	48,3000	mm ²
Pic de contrainte	31,0	MPa
Force maximale	1,596	kN
Déformation à la rupture	3,808	%
Contrainte au point de limite élastique	22,647	MPa
Modules	1606,835	MPa

éprouvette 2:

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	9,700	mm
Épaisseur	4,270	mm
Surface	41,4190	mm ²
Pic de contrainte	28,6	MPa
Force maximale	1,266	kN
Déformation à la rupture	3,728	%
Contrainte au point de limite élastique	20,463	MPa
Modules	1597,719	MPa

éprouvette 3 :

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,600	mm
Surface	46,0000	mm ²
Pic de contrainte	32,8	MPa
Force maximale	1,639	kN
Déformation à la rupture	4,057	%
Contrainte au point de limite élastique	21,060	MPa
Modules	1639,217	MPa

épreuve 4:

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,700	mm
Épaisseur	4,700	mm
Surface	50,2900	mm ²
Pic de contrainte	29,5	MPa
Force maximale	1,588	kN
Déformation à la rupture	4,272	%
Contrainte au point de limite élastique	22,644	MPa
Modules	1481,451	MPa

épreuve 5 :

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,350	mm
Surface	43,5000	mm ²
Pic de contrainte	28,5	MPa
Force maximale	1,384	kN
Déformation à la rupture	5,832	%
Contrainte au point de limite élastique	18,230	MPa
Modules	1357,475	MPa

Résultats de l'exécution d'essai (Force –allongement) :**Epreuve 1 :**

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,830	mm
Surface	48,3000	mm ²
Pic de contrainte	31,0	MPa
Force maximale	1,596	kN
Déformation à la rupture	3,808	%
Contrainte au point de limite élastique	22,647	MPa
Modules	1606,835	MPa

épreuve 2 :

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	9,700	mm
Épaisseur	4,270	mm
Surface	41,4190	mm ²
Pic de contrainte	28,6	MPa
Force maximale	1,266	kN
Déformation à la rupture	3,728	%
Contrainte au point de limite élastique	20,463	MPa
Modules	1597,719	MPa

épreuve 3 :

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,600	mm
Surface	46,0000	mm ²
Pic de contrainte	32,8	MPa
Force maximale	1,639	kN
Déformation à la rupture	4,055	%
Contrainte au point de limite élastique	21,060	MPa
Modules	1647,268	MPa

épreuve 4 :

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,700	mm
Épaisseur	4,700	mm
Surface	50,2900	mm ²
Pic de contrainte	29,5	MPa
Force maximale	1,588	kN
Déformation à la rupture	4,272	%
Contrainte au point de limite élastique	22,644	MPa
Modules	1481,451	MPa

épreuve 5:

Nom d'affichage	Valeur	Unité
Motif de fin d'exécution de l'essai	Rupture détectée	
Largeur	10,000	mm
Épaisseur	4,350	mm
Surface	43,5000	mm ²
Pic de contrainte	28,5	MPa
Force maximale	1,384	kN
Déformation à la rupture	5,832	%
Contrainte au point de limite élastique	18,230	MPa
Modules	1357,475	MPa