

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES



Faculté des sciences de l'ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par :

ROUAM Kamila

en vue de l'obtention du diplôme **de Magister** en :

Filière : Science et Génie des Matériaux

Option : Physique et Mécanique des Matériaux

Thème

**Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique
d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles**

Devant le jury :

Mr. BENMOUNAH	Abdelbaki	Pr	UMBB	Président
Mr. BEZZAZI	Boudjema	Pr	UMBB	Promoteur
Mr. AZEM	Said	pr	UMMTO	Membre
Mr. MIR	Abdallah	MCA	UMBB	Membre

Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant
Qui m'a donné de la force et du courage pour terminer mes études dans de bonnes
conditions.*

*Aussi je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur **Pr. BEZZAZI
Boudjema** pour son accueil, sa compréhension, sa patience et son soutien afin
de réaliser ce travail.*

*Je remercie très vivement le jury composé de : Monsieur **BENMOUNAH
Abdelbaki** professeur à UMB-Boumerdès, le président de jury, monsieur
AZEM Saïd professeur à UMMTO et monsieur **MIR Abdallah MCA** à UMB-
Boumerdès Pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.
Aussi, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce projet*

*Mes derniers remerciements et ce ne sont pas des moindres vont à tous les
membres de l'unité de recherche : Matériaux – procédés et environnement et
surtout à Mr **AIT HASSANE**,*

Dédicace

À mes chers parents

*Qui sont la joie de ma vie et qui me procurent tant de soutien, d'amour
et d'affection ; ma
moindre réussite est le fruit de leur sacrifice, dévouement et
persévérance ; je leurs dédie ce
travail en signe d'une sincère reconnaissance et d'une
gratitude éternelle.*

À mon cher mari « Billal »

*Pour ses aides précieuses, son encouragement et sa patience, à qui je dois
offrir ma réussite, qu'il trouve ici
l'expression de mon affection et une récompense de ses sacrifices.*

À ma très chère fille, mon ange « Lilia »

À mes chères sœurs et frères

Souad, Imène & Rania

Zohi, Kheiro et zino

Je vous aime de tout mon cœur

*Je vous souhaite une vie pleine de joie, de bonheur et de réussite dans
vos études et votre vie.*

À mes belles sœurs et frères

Hadile, moh, Aya et surtout

Abdou

À tous les membres de ma belle famille

Qui ont toujours été affectueux et serviables

En témoignage de mon amour, je vous souhaite la bonne santé.

À tous mes fidèles amis pour leur aide et leur encouragement.

À tous ceux qui ont contribué à ma formation

*Que ce travail soit l'expression de ma vive gratitude et de mon profond
attachement*

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux.....	II
Introduction générale.....	III

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

1.1 Introduction.....	1
1.2. Caractéristiques générales :.....	1
1.3. Classification des matériaux composites selon:.....	3
1.3.1. Forme des constituants :.....	3
1.3.1.1 Composites à fibres.....	3
1.3.1.2 Composites à particules.....	4
1.3.2. Selon la nature des constituants :.....	4
1.4. Composants :.....	4
1.4.1. Renforts.....	4
1.4.1.1. Renfort en fibres discontinues.....	5
1.3.1.2. Renfort continu :.....	5
1.4.2. Matrice :.....	8
1.4.2.1. Matrices thermodurcissables.....	8
1.4.2.2. Matrice thermoplastique.....	10
1.4.3. Charge.....	11
1.4.3.1. Charges renforçantes.....	11
1.4.3.2. Charges non renforçantes.....	11
1.4.4. Additifs	12
1.5. Matériaux composites structuraux.....	12
1.5.1. Monocouches	12
1.5.2. Stratifiés	12
1.5.3. Sandwichs.....	14
1.6. Technologie de la mise en œuvre.....	14
1.7. Avantage et inconvénients des matériaux composites.....	17

Sommaire

1.8. Domaine d'utilisation des matériaux composites.....	18
1.9. Conclusion.....	19

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

2.1 Introduction :.....	20
2.2 Fibres naturelles:.....	21
2.2.1. Définition de la fibre végétale :.....	22
2.2.2. Classification des fibres végétales.....	22
2.2.3 Structure et morphologie des fibres naturelles.....	25
2.3. Propriétés mécaniques des fibres naturelles.....	25
2.4. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales.....	26
2.5. Présentations des différentes fibres végétales :.....	27
a. Lin.....	27
b. Ramie.....	27
c. Chanvre.....	27
d. Sisal.....	28
e. Coir de la noix de coco.....	28
f. Jute.....	28
2.6 Méthodes d'extraction des fibres.....	28
2.7 Utilisation des fibres végétales: avantages et inconvénients.....	29

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

4.1 Caractérisation des différentes matières utilisées :.....	30
4.1.1 Caractérisation de la matrice :.....	30
4.1.1.1. Analyse thermique de la matrice ATG et l'ATD.....	31
4.1.1.2 Etude de la stabilité dimensionnelle par dilatométrie :.....	32
4.1.1.3 Caractérisation mécanique de la matrice :.....	33
4.1.1.3.1 Essais de traction :	33
4.1.2 Caractérisation des fibres naturelles :.....	34

Sommaire

4.1.2.1 Essai de traction de la fibre et la mèche de sisal :	34
4.1.2.2 Essais de traction des fibres naturelles :.....	37
4.1.3. Préparation des tissus :	39
4.2. Elaboration des plaques de stratifiés :.....	39
4.3. Caractérisation des composites élaborés :.....	40
4.3.1 Analyse thermique : (ATD, ATG)	40
4.3.2 Etude de la stabilité dimensionnelle par dilatométrie :	42
4.3.3 Analyse hygrothermique :.....	43
4.3.3.1 Analyse de la variation de la masse :.....	43
4.3.3.2 Analyse du pouvoir d'absorption d'eau du stratifiés :.....	44
4.3.4 Comportement mécanique des composites élaborés :.....	44
4.3.4.1.1 Essai de traction :.....	44
4.3.4.1.2 Essai de flexion :.....	48
4.3.4.1.3 Comportement en fatigue.....	53
Conclusion générale.....	57
Conclusion générale.....	57
Références bibliographiques.....	65

Liste des figures :

Figure 1.1 : Quelques applications des CMO "haute performance.....	2
Figure 1.2 : Constituants des matériaux composites	3
Figure 1.3: Les différents types de renfort de base.....	5
Figure 1.4. Différentes formes de renforts continus.....	6
Figure 1.5 : composite monocouche.....	12
Figure1.6 : composite stratifié.....	13
Figure 1.7 : Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels.....	13
Figure 1.8 : Composite sandwichs.....	14
Figure 2.1 : Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales.....	21
Figure 2.2 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington, 1998).....	23
Figure 2.3 : Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale.....	24
Figure 3.1: L'appareil DSC.....	35
Figure 3.2 : courbe de l'ATD et l'ATG.....	35
Figure 3.3 : Comportement dilatométrique de la résine inject INJ812.....	36
Figure 3.4 : la géométrie de l'éprouvette haltère.....	37
Figure 3.5 : comportement mécanique en traction de la matrice INJ 812.38.....	38
Figure 3 .6 : machine traction.....	39
Figure 3.7: courbe en traction de la fibre élémentaire	41
Figure 3.8 : Courbe en traction de la fibre d'un faisceau de mèche.....	41
Figure 3.9 : l'histogramme de déformation, contrainte max et le module de young.....	42
Figure 3.10 : comportement mécanique en traction des fibres de lin, jute et sisal.....	43

Figure 3.11 : les histogrammes de déformations, de module de young et de la contrainte max.....	44
Figure 3.12: le tissu de : (a)sisal, (b) lin	45
Figure 3.12: Elaboration de stratifié par la méthode dite « par infusion ».....	46
Figure 3.14. courbe de l'ATG et l'ATD.....	47
Figure 3.15 : courbe de dilatométrie	48
Figure 3.16 : courbe de la perte de masse.....	49
Figure 3.17 : Courbe de pouvoir d'absorption d'eau.....	50
Figure 3.18 : échantillon des éprouvettes coupées et étalonnées.....	51
Figure 3.19 : Machine de traction universelle Zwick de type Z250.....	51
Figure 3.20. : Comportement mécanique en traction des stratifiés.....	48
Figure 3.21 : Mode de fissuration des stratifiés lin jute sisal et le stratifié jute.....	53
Figure 3.22 : Les histogrammes de la contrainte, déformation et Module de young	54
Figure 3.23 : Machine de flexion de type Zwick	55
Figure 3.24 : principe de la flexion 3 points.....	55
Figure 3.25 : courbe moyen de comportement mécanique en flexion 3points.....	52
Figure 3.26 : Les histogrammes de la déformation, force en flexion, contrainte et le Module de young.....	57
Figure 3.27 : Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/lin/jute/époxy'.....	59
Figure 3.28 : Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/sisal/jute/époxy'	60
Figure 3.29: Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/époxy'.....	60
Figure 3.30 : Courbe de l'essai de la fatigue 'lin/ époxy'.....	60
Figure 3.31 : Courbe de l'essai de la fatigue lin/sisal/époxy.....	61
Figure 3.32 : Courbe de l'essai de la fatigue 'sisal/époxy'	61

Figure 3. 33: Courbe de l'essai de la fatigue 'Lin/jute/sisal/époxy'62

Liste des tableaux :

Tableau.1.1 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.....	9
Tableau 2.1 : Composition chimique de fibres végétales, d'après Baley	25
Tableau 2.2 : représente les propriétés mécaniques moyennes en traction des différentes fibres naturelles.....	26
Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des fibres naturelles.....	30
Tableau 4.1 : Quelques caractéristiques de la résine la MEDAPOXY 812INJ.....	36
Tableau 4.2 : Résultats de l'ATD, ATG des matrices.....	38
Tableau 4.3: Tableau des caractéristiques mécaniques en traction de la matrice INJ 812.....	40
Tableau 4.4 : résume les graphiques.....	42
Tableau 4.5 : Résultats des essais des fibres naturelles.....	43
Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse thermique différentielle et l'analyse gravimétrique.....	48
Tableau 4.7 : Résultats du comportement des différents stratifiés	53
Tableau 4.8 : Résultats des essais sur différents éprouvettes.....	57

Résumé

Résumé :

Ce travail a pour objet d'étudier les caractérisations mécaniques en statique, et en fatigue ; ainsi le comportement thermique et hygrothermique de différents stratifiés constitués de fibres naturelles de : jute/époxy, lin/époxy, sisal/époxy, jute lin jute/époxy, jute sisal jute/époxy, lin sisal/époxy, jute lin sisal/époxy. Ces stratifiés ont subi une caractérisation mécanique (traction et flexion 3points), puis ont été émergés dans l'eau pour quantifier le pouvoir absorbant ainsi ils sont séchés pour voir l'effet de la température sans oublier l'analyse thermique l'ATD et l'ATG afin de déterminer la température vitreuse et la chute de masse de chaque échantillon. Cette étude nous a permis d'approfondir notre connaissance sur les propriétés et le comportement des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles.

Mots clés : caractérisation mécanique, composite, fibres naturelles, hygrothermique, thermique.

Abstract:

This work aims to study the mechanical characterizations in static and fatigue. Thus, the thermal and hygrothermal different laminates made of natural fibers behavior: jute / epoxy, flax / epoxy, sisal / epoxy, jute linen jute / epoxy, jute sisal jute / epoxy, flax sisal / epoxy, flax jute sisal / epoxy. These laminates have suffered a mechanical characterization (tensile and flexural 3points), then emerged into the water to quantify the absorbing power so they are dried to see the effect of temperature as well DSC. This study allows us to deepen our knowledge about the properties and behavior of natural fiber reinforced composites.

Keywords: mechanical characterization, composite, natural fibers, hygrothermal and thermal.

الملخص :

ويهدف هذا العمل إلى الخصائص الميكانيكية ودراسة تأثير الحرارة والرطوبة. لذلك قمنا بصنع مواد مركبة من الألياف الطبيعية وهي كالتالي: الجوت / الأيبوكسي والكتان / الأيبوكسي والسيزال / الأيبوكسي والكتان والجوت الجوت / الأيبوكسي، والجوت والسيزال والجوت / الأيبوكسي والسيزال، والجوت والكتان والسيزال / الأيبوكسي. بعد ذلك أجريت للغطاء المركب قياسات ميكانيكية أولها عملية المد بعد ذلك عملية الضغط في وسط المادة المركبة من 3 نقاط ثم نغمر هذه المواد بالماء لدراسة قوة إمتصاصها كما نقوم بإدخالها داخل فرن تكون حرارته 80 من أجل دراسة تأثير الحرارة. تسمح لنا هذه الدراسة إلى تعميق معرفتنا حول خصائص وسلوك المواد المركبة من ألياف طبيعية المسلحة.

كلمات البحث: توصيف الميكانيكية، والمركبة، والألياف الطبيعية، الرطوبة الحرارية والحرارية.

Introduction Générale

Les progrès de la technologie et l'accroissement de la demande augmentent considérablement les contraintes sur les ressources naturelles. La prise de conscience grandissante de l'impact de l'Homme sur l'environnement conduisant à l'épuisement de nos ressources et la modification du climat, incitent fortement les industriels et les chercheurs au développement d'alternatives moins gourmandes en énergie et diminuant l'impact environnemental en améliorant leur recyclabilité et leur renouvelabilité.

L'utilisation de matériaux à base de fibres naturelles n'est pas récente et date de plusieurs civilisations, les paniers en osier en sont un exemple frappant, plus récemment les sièges et les réservoirs des avions de 1896 ont été réalisés en fibres naturelles avec une petite quantité de liant polymériques [20]. A l'heure actuelle, les différentes utilisations de ces matériaux composites à renforts naturels sont souvent limitées à des applications où les contraintes mécaniques et thermiques ne sont pas importantes

L'utilisation de fibres végétales (bois, lin, chanvre) comme éléments de renfort dans les matériaux polymères, thermoplastiques ou thermodurcissables, en remplacement des fibres de verre, est un concept déjà industrialisé et commercialisé. On trouve ces composites dans les meubles de jardin, les bardages, les plinthes et huisseries, les pièces d'habillage intérieur d'automobiles de toutes marques. Une partie du compartiment de roue de secours de la Mercedes classe A est constituée d'un composite mélangeant polypropylène et fibres d'abacca, une espèce de bananier. L'idée de remplacer les fibres de synthèse, comme les fibres de verre, le renfort dominant sur le marché, n'est pas nouvelle. Mais dans un contexte dit de *développement durable* où le recours à des ressources renouvelables est encouragé, ce remplacement est désormais considéré comme une voie sérieuse et prometteuse. De plus, si ces ressources d'origine naturelle séduisent l'industrie des composites et les chercheurs aujourd'hui, c'est aussi à cause de leur abondante variété (donc disponibilité), leur légèreté et leur souplesse (par rapport aux fibres de verre). On trouve en effet des fibres végétales de toutes sortes dans diverses parties de la planète, et le fait que certaines d'entre elles font déjà l'objet d'une agriculture commerciale est en soi un atout majeur pour ces matériaux.

Certains pays en développement comme l'Inde ont une longue tradition dans l'utilisation des fibres naturelles dans la résine polyester pour la fabrication de conduites, de panneaux ou de profilés pultrudés. D'autres comme le Brésil, le Mexique, la Tanzanie ou les Philippines ont lancé de vastes programmes de recherche sur les fibres naturelles telles que le coton, le chanvre, le kapok, le lin, la feuille d'ananas, le bambou, la canne à sucre, les fibres de noix de

coco. Parmi les diverses sources fibreuses rencontrées (ou cultivées) dans les pays développés, le jute, sisal et le lin sont particulièrement utilisés grâce aux propriétés mécaniques de ces fibres, mais aussi grâce aux qualités agronomiques de leurs plantes. Ces fibres ont en outre une très large et longue utilisation dans le textile. Avec l'utilisation particulière des composites renforcés de fibres naturelles dans des domaines comme l'automobile, le bâtiment et très bientôt l'aéronautique,

Le frein majeur à leur utilisation dans des applications dites _ de structure _ est le manque de connaissance de leur comportement, leur endommagement et leur vieillissement. Est-ce que ces matériaux ont un réel potentiel pour une utilisation future dans des applications structurelles ou resteront-ils limité aux applications d'esthétisme et d'emballage ?

Ainsi ce travail s'appuie sur une démarche expérimentale de caractérisation du comportement mécanique et thermomécanique des composites thermodurcissables (époxyde) renforcés par des fibres naturelles d'origine végétale. Parmi ces fibres végétales, le lin, sisal et le jute qui sont des matériaux de renfort prometteurs. Leur culture est relativement facile; ainsi dans l'objectif de valoriser les ressources de proximité, ces fibres ont été sélectionné comme matériaux de renfort des composites étudiés. Toutefois leur comportement mécanique constitue un champ d'investigation à part entière.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres articulés de la manière suivante.

Le premier chapitre : nous présentons les matériaux composites d'une manière générale. (Définition et classification, les éléments constitutifs et les procédés de la mise en forme de matériaux composites.

Le deuxième chapitre est consacré à présenter les fibres naturels leurs définition, classification et leurs structure, leurs propriétés et ces avantage et ces inconvénients.

Le troisième chapitre est consacrer à étudier le comportement mécanique des matériaux composites.

Et le dernier chapitre traite la partie expérimentale à travers la quelle sera exposé le procédé de l'élaboration des stratifiés étudiés ainsi la caractérisation mécanique, statique et dynamique, et la caractérisation thermique et hygrothermique.

Et enfin un conclusion générale.

1.1 Introduction :

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre (vers 1940), les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit les moins coûteux possibles, soit les plus performants, ou bien les deux à la fois en connaissant une croissance régulière de 10% depuis 20 ans. Grâce à leurs caractéristiques techniques et mécaniques, ils peuvent remplacer de nombreuses pièces métalliques, tout en bénéficiant d'une plus grande légèreté. Le matériau « parfait » doit posséder des propriétés mécaniques élevées, être durable et préserver l'environnement lors de son cycle de vie. Le facteur économique reste le principal moteur car pour être viable, le composite doit être compétitif.

Ces matériaux sont impliqués dans de nombreux secteurs : aéronautique, automobiles, bâtiment... Toutefois face à des contraintes économiques et environnementales toujours plus exigeantes, l'utilisation de renforts naturels et végétales dans les composites à matrice organique apparaît aujourd'hui comme une alternative de choix. La recherche sur le sujet s'est ainsi fortement dynamisée au cours de ces dernières années et un certain nombre de produits commencent à apparaître sur le marché (balustrades, bardage, palettes, fenêtres...). De nouvelles applications et des composites plus performants sont déjà anticipés, mais les connaissances restent insuffisantes et des études doivent être menées afin de mieux comprendre certains mécanismes. [2]

1.2 Caractéristiques générales :

D'une manière générale, un matériau composite est un produit constitué d'au moins deux matériaux – l'un étant un renfort et l'autre un liant (ou matrice) unissant les deux matériaux (figure 1.1). Il existe de nombreux produits composites fabriqués avec plus de deux matières premières. Ces matériaux ne sont pas miscibles et possèdent des caractéristiques dissemblables. La quantité, la position et l'orientation des renforts ainsi que la sélection de la matrice sont des aspects critiques de la conception du produit et de son développement. Ces paramètres doivent être optimisés pour améliorer constamment le produit. [3]

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- De leur distribution géométrique
- De leur interaction

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- La géométrie du renfort, sa distribution
- La nature de l'interface matrice/ renfort [3]

Il existe deux types de matériaux composites :

- les composites grandes diffusions (GD)
- les composites hautes performances (HP)

Les composites GD, représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30%. Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (95 % des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (plus de 99 % des renforts utilisés).

Les composites HP sont principalement utilisés dans l'aéronautique le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle (Figure). Les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues dont le taux de renfort est supérieur à 50 %. Contrairement aux composites GD, leurs propriétés mécaniques, résistance mécanique et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux.

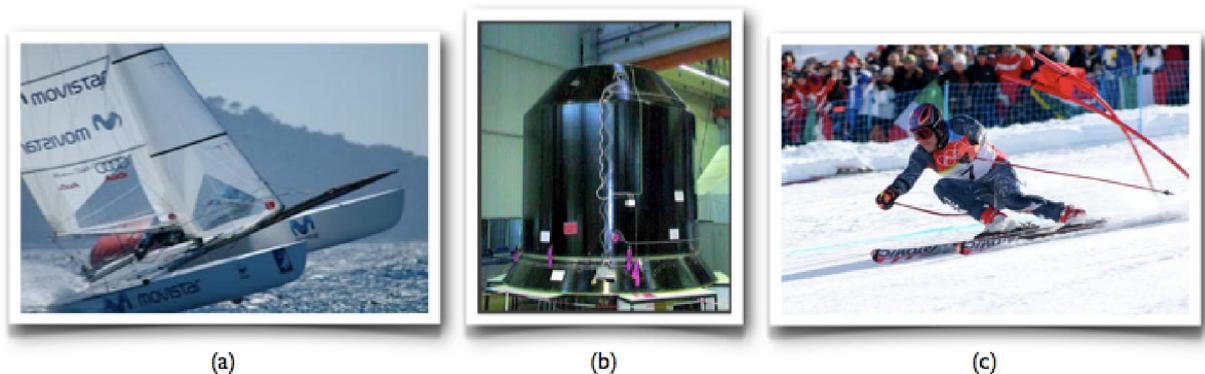


Figure 1.1 : Quelques applications des CMO "haute performance" : (a) un catamaran, (b) le support de la charge utile d'Ariane 5 (image d'Aerospace Technology), (c) des skis de compétition

La maîtrise de l'élaboration de matériaux composites nécessite la connaissance des propriétés individuelles des constituants de base des matériaux que l'on résume dans l'organigramme suivant :

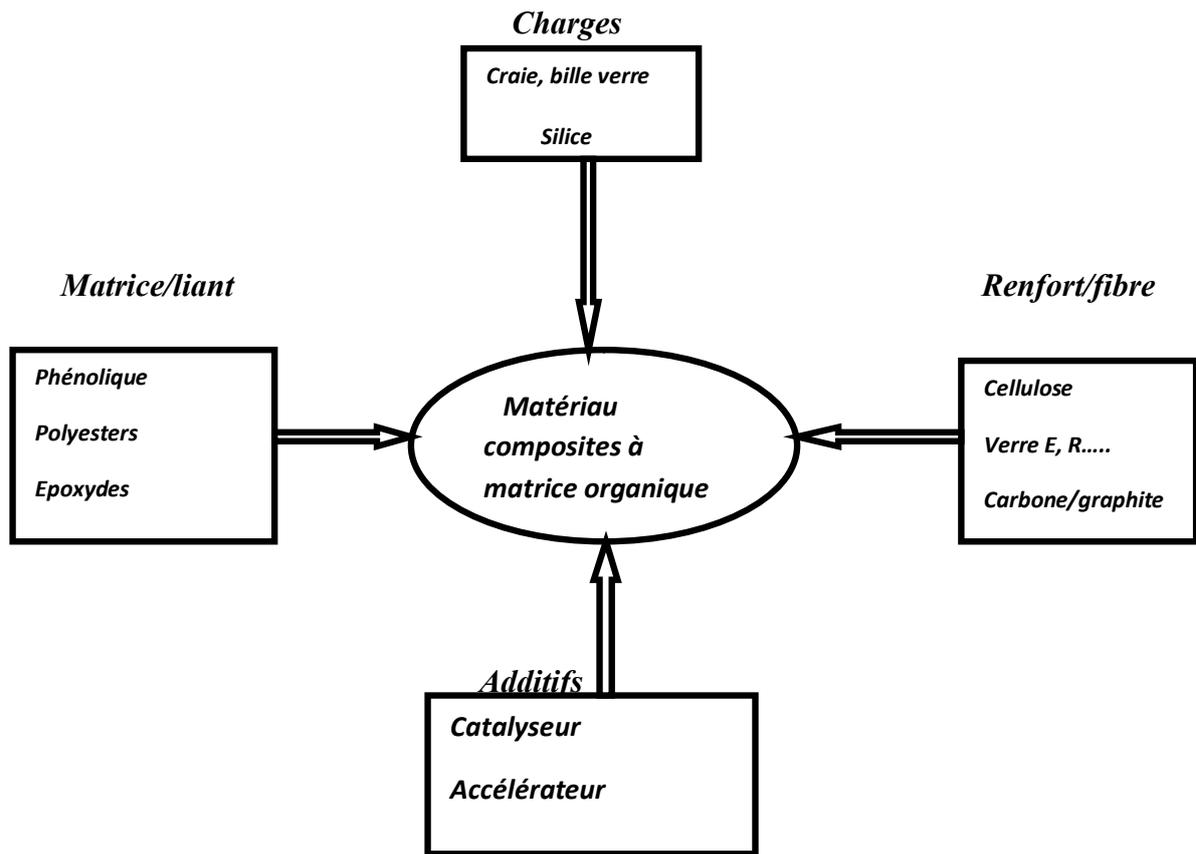


Figure 1 - 2 : Constituants des matériaux composites.

1.3. Classification des matériaux composites selon :

1.3.1. Forme des constituants :

En grandes fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux classes :

- Les matériaux composites à particules
- Les matériaux composites à fibres

1.3.1.1. Composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent sous forme des fibres continues, soit sous forme des fibres discontinues, fibres courtes, fibres coupées, etc. l'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux anisotropes dans un plan. L'importance des matériaux composites à fibres justifier une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques

1.3.1.2. Composites à particules :

Un matériau composite est un composite à particules si le renfort se trouve sous forme des particules. Une particule par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines des propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité la tenue, la résistance à l'abrasion, la diminution de retrait etc. Dans de nombreux cas les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le cout du matériau sans en diminuer les caractéristiques.

1.3.2. Selon la nature des constituants :

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés comme des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renfort sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche.

1.4. Composants :

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle d'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

En ajoutant des additifs pour modifier certains des propriétés physiques ou chimiques. On les utilise même pour des raisons économiques et par fois pour facilité la mise en œuvre.

1.4.1. Renforts

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 [4]

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses comme il est indiquée sur la figure 1.3

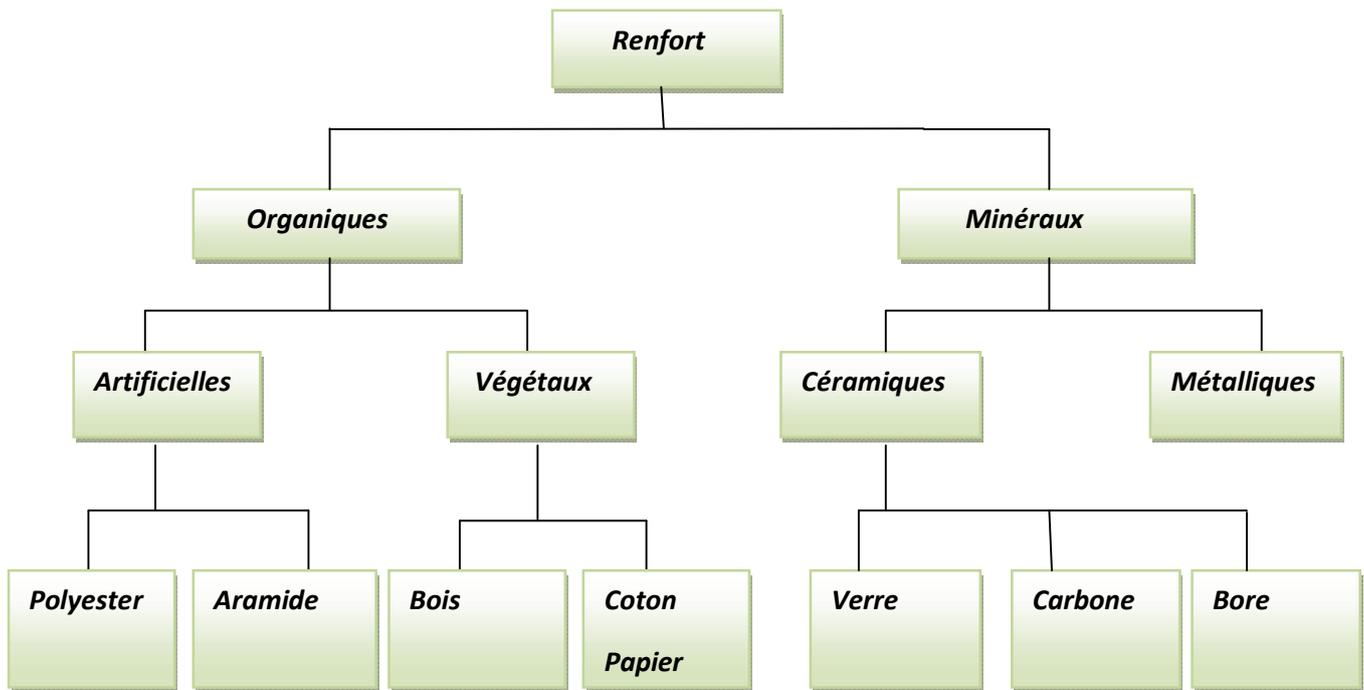


Fig1.3: Les différents types de renfort de base. [6]

Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par la nature des fibres.

La forme du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles.

1.4.1.1. Renfort en fibres discontinues : des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

1.4.1.2. Renfort continu : sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre [7]

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

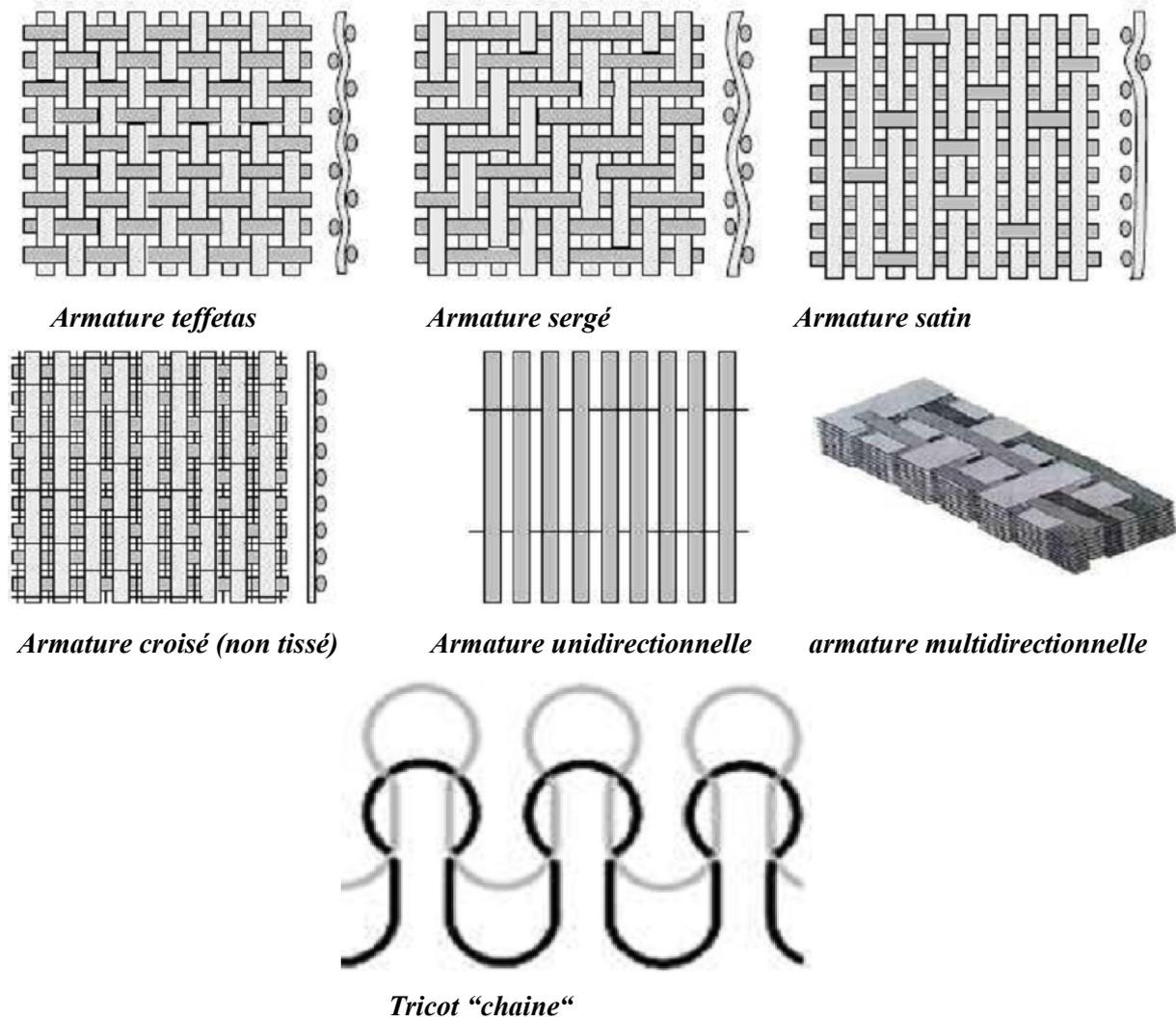


Fig.1.4. Différentes formes de renforts continus [8]

Cas des renforts tissés

Les tissus sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures ; on distingue : la toile ou le taffetas, le sergé nm et le satin (figure 1.4).

❖ Unidirectionnels (1D)

Dans une nappe 1D, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise

❖ Toile ou taffetas

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

❖ Serge

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-dessous, un sergé 2/2.

❖ Satin

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique. [9]

L'armure contrôle la rigidité du tissu ; on obtient respectivement un tissu relativement rigide, souple et dense et très souple et déformable. Il est important de souligner la grande variété des renforts tissés. Par ailleurs, il est possible de construire des tissus mixtes en utilisant des matériaux différents dans les directions chaîne et trame, ou des tissus hybrides en employant des fils de natures différentes dans la même direction, ce qui permet d'obtenir des tissus aux caractéristiques spécifiques dans chaque direction. Un tissu est dit équilibré lorsque les fils de chaîne et de trame sont identiques ou très semblables et que le motif du tissage est symétrique [10].

Le comportement du renfort tissé dépend fortement des constituants et de leur agencement, on le caractérise par :

- le type de fibres utilisées, au il ya :

Fils de chaîne : sont les fils parallèles à la longueur du tissu ;

Fils de trame : sont les fils perpendiculaires à la longueur du tissu.

- Le type d'armure : c'est-à-dire le mode d'entrecroisement des fibres. Pour les définir, deux chiffres sont utilisés : n_c , qui indique qu'un fil de trame est entrecroisé avec chaque n_c -ième fil de chaîne, et n_t , précisant qu'un fil de chaîne est entrecroisé avec chaque n_t -ième fil de trame.

- **Type de mèches** : une mèche est un assemblage de fibres (de milliers voire dizaine de milliers) plus ou moins cohérentes entre elles suivant le mode de fabrication. Par exemple, on peut rencontrer des mèches à fibres uniques, juxtaposées, courtes, entrelacées, torsadées.

Les tissus diffèrent par :

- Le taux de renfort exprimé en mèches/mm de tissu pour chaque direction.

- L'embuvage, qui caractérise l'ondulation du tissu, exprimé en %. On définit l'embuvage par :

$$E = \frac{\text{longueur de la mèche} - \text{longueur du tissu dont elle est extrait}}{\text{longueur de la mèche}} * 100\% \quad [5]$$

1.4.2. Matrice :

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres, et lie les fibres du renfort entre eux et assure la répartition de la contrainte c'est « l'emballage ». Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont :

- les résines thermodurcissables
- les résines thermoplastiques.

Ces deux types de polymères diffèrent en leur structure moléculaire aussi bien que leur comportement

1.4.2.1. Matériaux thermodurcissables : ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons, à savoir réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, conductivité thermique, dilatation thermique, propriétés électriques, propriétés magnétiques, retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [12]. En général, les remplisseurs peuvent changer l'exécution des composés de polymère en changeant la couleur, viscosité, propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, le rétrécissement, etc...

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- **Résines époxydes :** font l'objet de notre étude.
- **Résines phénoliques :** sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée, c'est pour cette raison qu'on les utilise dans les transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- **Résines polyamides.**

- **Résines polyesters** : se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

Le tableau suivant présente une comparaison entre ces types de résines :

Tableau.1.1. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [19]

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyimides
Caractéristiques mécaniques	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	moyenne
Mise en œuvre	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

- **Résines époxydes.**

La plupart du temps, les époxydes sont employés avec un agent de réticulation appelé durcisseur pour former un réseau tridimensionnel stable et de ce fait infusible. Parfois, un accélérateur est utilisé pour faire démarrer la réaction et souvent on ajoute des adjuvants supplémentaires dont les plus importants sont les charges.

Les résines époxyde sont des produits performants qui possèdent de nombreuses qualités (bonne tenue mécanique, bonne tenue aux agents chimiques, faible reprise d'humidité, excellente adhérence, faible retrait, bonne mouillabilité des renforts). Elles entrent dans un très grand nombre d'applications dont certaines sont d'un niveau de technologie élevé telles que :

- l'industrie aéronautique et automobile (collages de structures et de panneaux),
- l'industrie électrique moyenne et haute tension,

- l'électronique (enrobage de condensateurs, confection de circuits imprimés,...),
- le sport (ski, raquettes, arcs et flèches de compétition, cadres de vélos en carbone,...),
- l'outillage (modèles à reproduire, maîtres modèles, ...),
- les stratifiés et composites (nids d'abeilles, structures triangulaires, arbres de transmission, carrosseries de voitures de sport,...), les revêtements résistants aux agents chimiques, réparation de fissures des structures en béton.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application de la résine, tels que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants. Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines, (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un prépolymère approprié ou une combinaison de différentes familles de prépolymère.
- La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé.
- L'addition simple des charges organiques ou inorganique et les composantes [14].

1.4.2.2. Matrices thermoplastiques.

Dans les matériaux thermoplastiques, les différentes molécules ont une structure linéaire et il n'y a aucun produit chimique liant entre eux. Ces molécules s'associent par des forces de Van der Waals, interactions de dipôle-dipôle, liaison d'hydrogène et égalisent l'empilement des anneaux aromatiques. Le thermoplastique peut être ramolli et fait pour couler avec l'application de la chaleur et de la pression pendant que l'interaction faible entre les molécules peut être temporairement décomposée. Quand le matériau est alors refroidi, les molécules reconstituent la liaison secondaire entre elles et il se solidifie. En raison de cette facilité de fabrication et de formabilité, les matériaux thermoplastiques sont largement répandus dans une variété de produits.

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

- le polyéthylène (PE)
- le polypropylène (PP);
- le poly (acétate de vinyle) (PAV) (colles à bois et autres adhésifs) ;
- le poly (chlorure de vinyle) (PVC) (tuyauteries) ;
- le poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA) ;
- le nylon 6,6 (fibres, vêtements) ;
- l'acétate.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température.

Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité.

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau:

Il existe aussi les biopolymères, dont Daniel Wyart [15] donne cette définition : "Un biopolymère est un polymère d'origine naturelle, biodégradable par des agents biologiques habituellement présents dans la nature ou recyclable après usage ". Il y a trois familles de polymères biodégradables :

- les polymères d'origine naturelle
- les polymères d'origine fossile

Chaque famille de polymères biodégradables a ses sous-familles. Pour les polymères naturels, on trouve les polysaccharides végétaux (amidon, cellulose...), les protéiniques (soie, laine...), et les polymères d'origine bactérienne ou biopolyesters dont le Poly Acide Lactique (PLA), le polycaprolactone (PCL), le polybutylène succinate (PBS), les poly-hydroxyalcanoates (PHA) et leurs dérivés (PHB) [7]. Pour les polymères d'origine fossile, on trouve le polyacétate de vinyle (PVA), le polycaprolactone (PCL), le polyéthylène téréphtalate modifié (PET modifié avec ajout de monomères aliphatiques) et les autres polyesters aliphatiques (PTT, PBAT. . .).

I.5 Charges :

1.5.1. Charges renforçantes :

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charge peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- charges sphériques.
- Charges non sphériques.

1.5.2. Charges non renforçantes :

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de démineur le cout des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible cout.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques.

1.6. Additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantités (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait.
- Agents anti-ultraviolets.

1.7. Matériaux composites structuraux :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

1.7.1. Monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

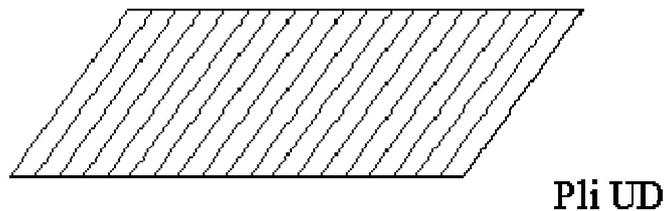


Figure 1.5 : composite monocouche. [15]

1.7.2. Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du

stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques 15.

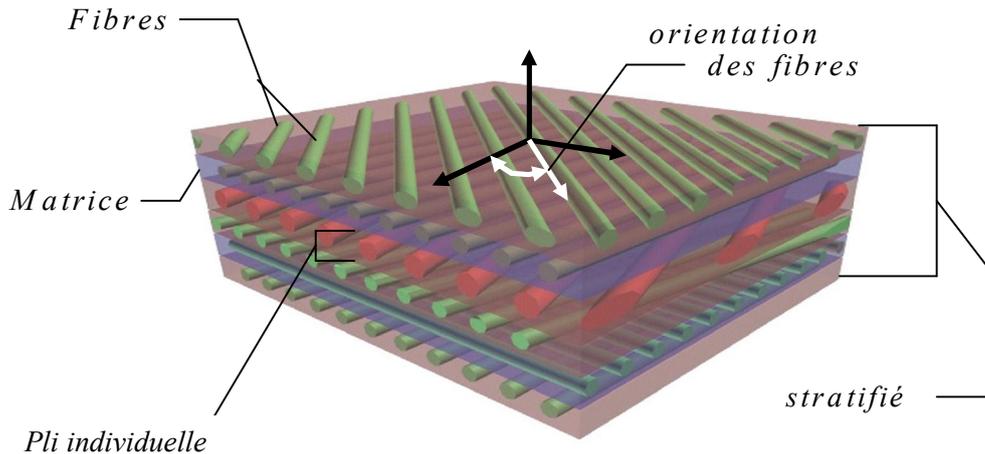


Fig.1.6 : composite stratifié [16]

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec 4 couches dans les directions $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

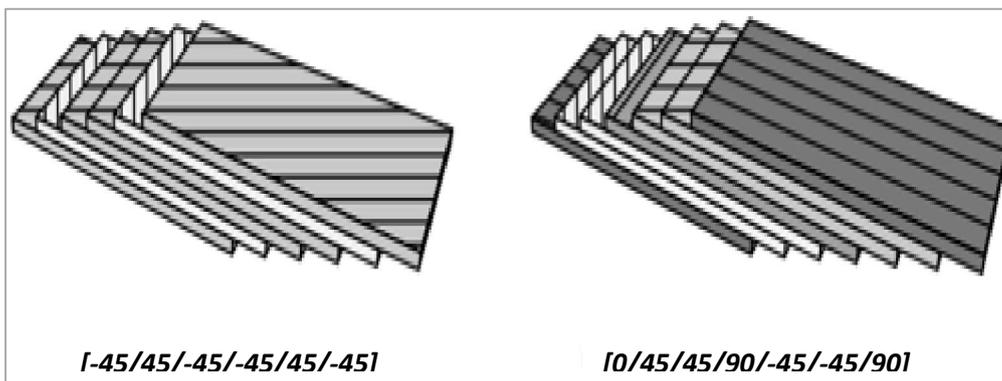


Figure 1.7 : Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels. Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés) par rapport à une direction de référence. Images de  Laurent Gornet.

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches orientées suivant la direction $-\theta$.
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

1.7.2. Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

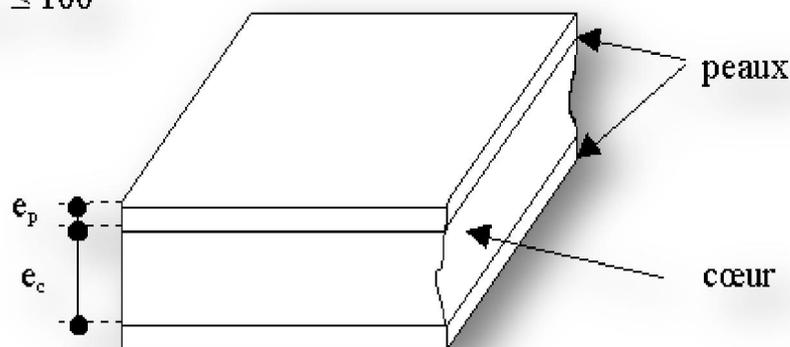


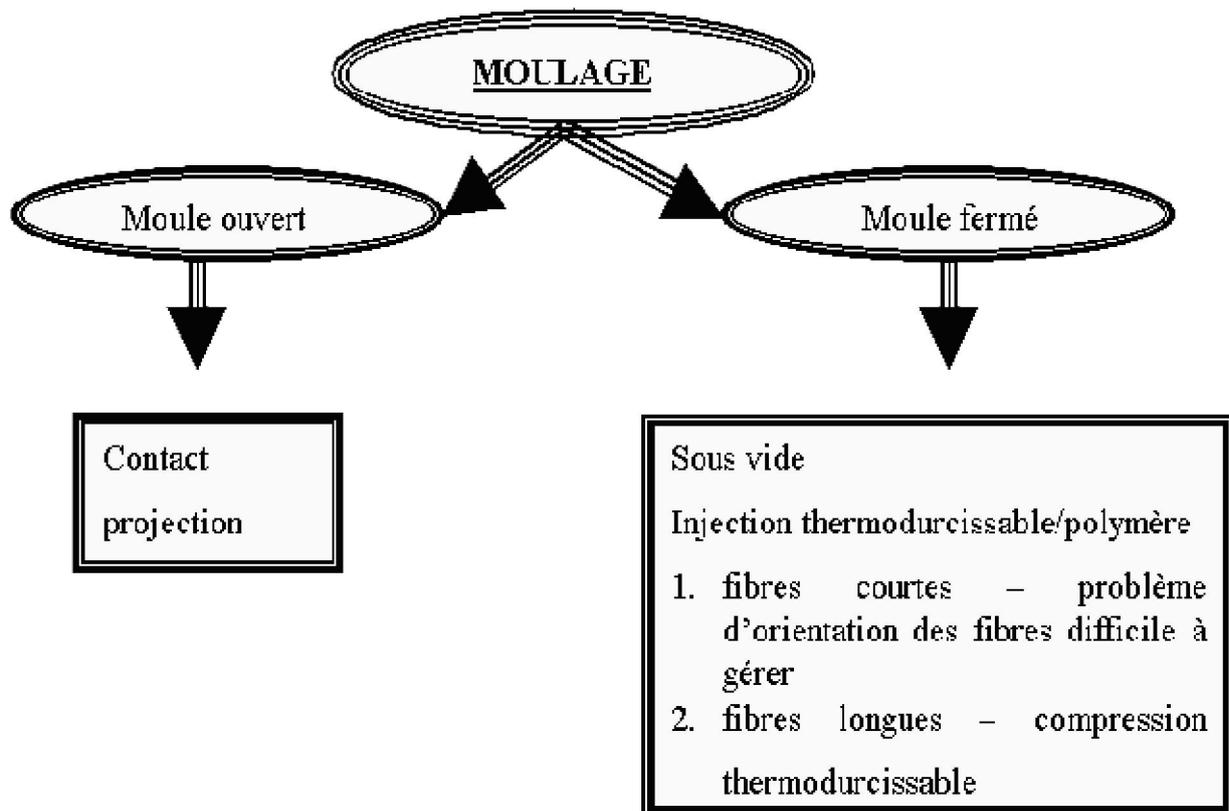
Fig.1.8 : Composite sandwichs [18]

1.8. Technologie de la mise en œuvre :

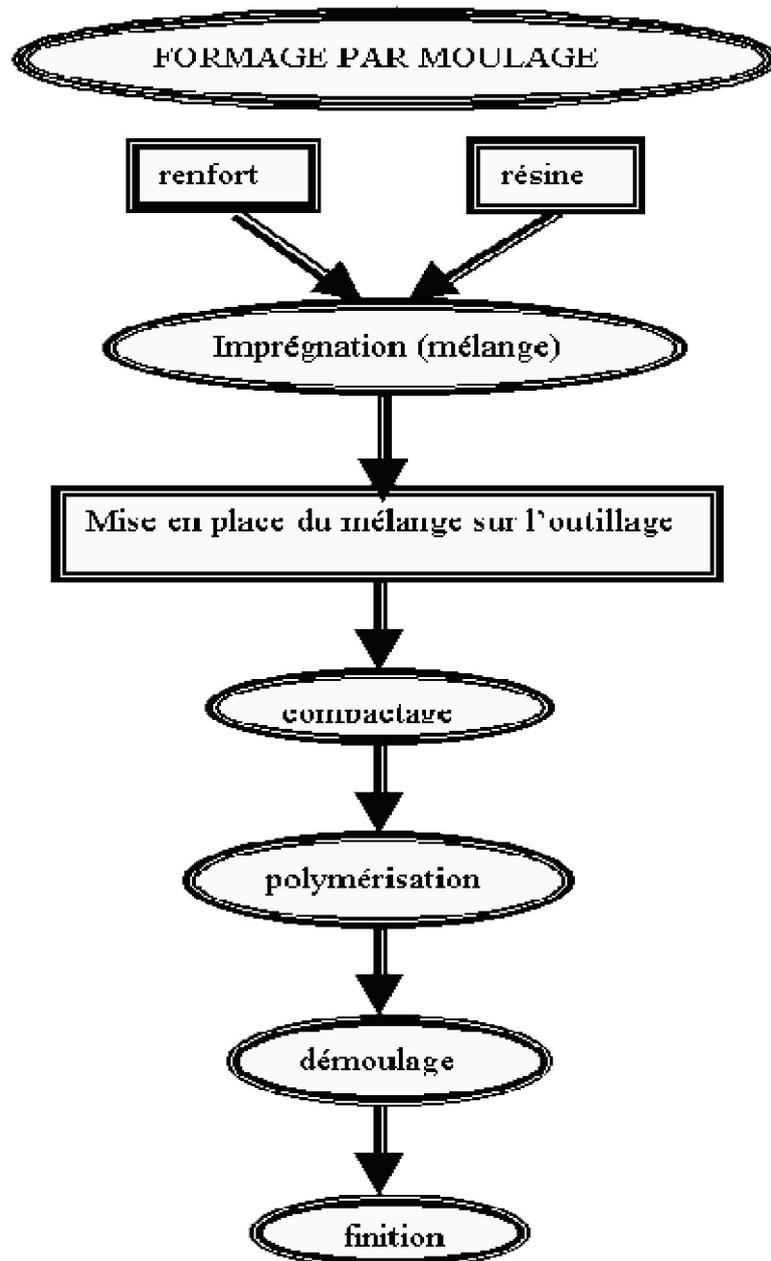
Trois opérations sont indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage.



Limitation de taille des pièces par la taille des moules.



Les procédés les plus importants sont :

- **Moulage au contact** : technologie de réalisation de pièces prototypes ou de simulation. Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais cadence très faible.

Le procédé consiste à déposer sur l

- une couche de surface (gel coat)

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

□ des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante

- **Moulage par projection simultanée** : technologie similaire mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.
- **Injection thermodurcissable BMC** (Bulk Molding Compound ou préimprégné en vrac). Procédé discontinu haute pression (100 bars). Alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection. Les avantages sont : réalisation de grande série, faible coût matière, peu de finition, temps de cycle. Les limites sont : le taux et la longueur des renforts et les propriétés mécaniques du composite obtenu.
- **Compression thermodurcissable SMC** (Sheet Molding Compound ou préimprégnés en feuilles. Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.
- **Pultrusion** : Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé. Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.
- **Enroulement filamentaire (ou bobinage)**: technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses. Les limites sont que formes uniquement convexes et investissements importants.

Il existe d'autres procédés : drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide, estampage...

I.8. Avantages et inconvénients des matériaux composites:

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Inconvénients qui freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- la maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous entend une très bonne connaissance des constituants mis en place.
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité. Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables.

I.9. Domaines d'utilisation des matériaux composites :

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines de par leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques, les matériaux composites peuvent répondre aux exigences des différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et renfort, et ceci, dans différents domaines.

Les matériaux composites ont été introduits progressivement dans les automobiles, à la suite des matériaux polymères dont certains sont utilisés comme matrices.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines : aéronautique, transport, bâtiment, loisirs etc. Du point de vue écologique, les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les composites prennent une place croissante et sont de nouveau d'actualité.

I.10. Conclusion :

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

Dans les composites les fibres se trouvent sous formes organiques et naturelles, ces dernières peuvent donner une bonne résistance au matériau grâce à leurs propriétés ce qu'on va le voir dans le deuxième chapitre.

2.1. Introduction :

D'un point de vue historique, l'utilisation des végétaux a toujours existé, comme par exemple dans la construction ou bien dans le textile. Cet intérêt pour les matériaux agro-sourcés a doublé d'intensité ces dernières décennies dans l'industrie du composite grâce au protocole de Kyoto, qui a instauré les notions de développement durable et de protection de l'environnement. C'est pour cela que les fibres végétales ont commencé à faire leur apparition en remplacement des fibres de verre afin de fabriquer des matériaux composites plus respectueux de l'environnement

Les fibres végétales se démarquent des fibres de verre par leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées grâce à une faible densité, qui induira lors d'applications structurales un gain de masse se traduisant par une économie d'énergie. De plus, les fibres végétales ont aussi l'avantage d'être bio-sourcées et certaines sont disponibles annuellement

Les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit les moins coûteux possibles, soit les plus performants, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. Pour réduire les fibres traditionnelles de coût élevé (carbone, verre et aramide), de nouveaux composés ont été développés. Des recherches ont porté leur attention sur les composites renforcés par les fibres naturelles. Ces composites combinent de bonnes propriétés mécaniques avec une faible densité [17, 18]. De tels composés offrent un certain nombre d'avantages bien connus qui incluent le coût, la disponibilité des ressources naturelles renouvelables, la biodégradabilité, etc... [18].

2.2. Fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

✚ les fibres végétales qui comprennent :

- les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok) ;
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ;
- les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco).

✚ les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie ;

✚ les fibres minérales telles que le basalte.

La figure 2.1 montre les différentes matières naturelles que nous pouvons utiliser dans l'élaboration des matériaux composites :

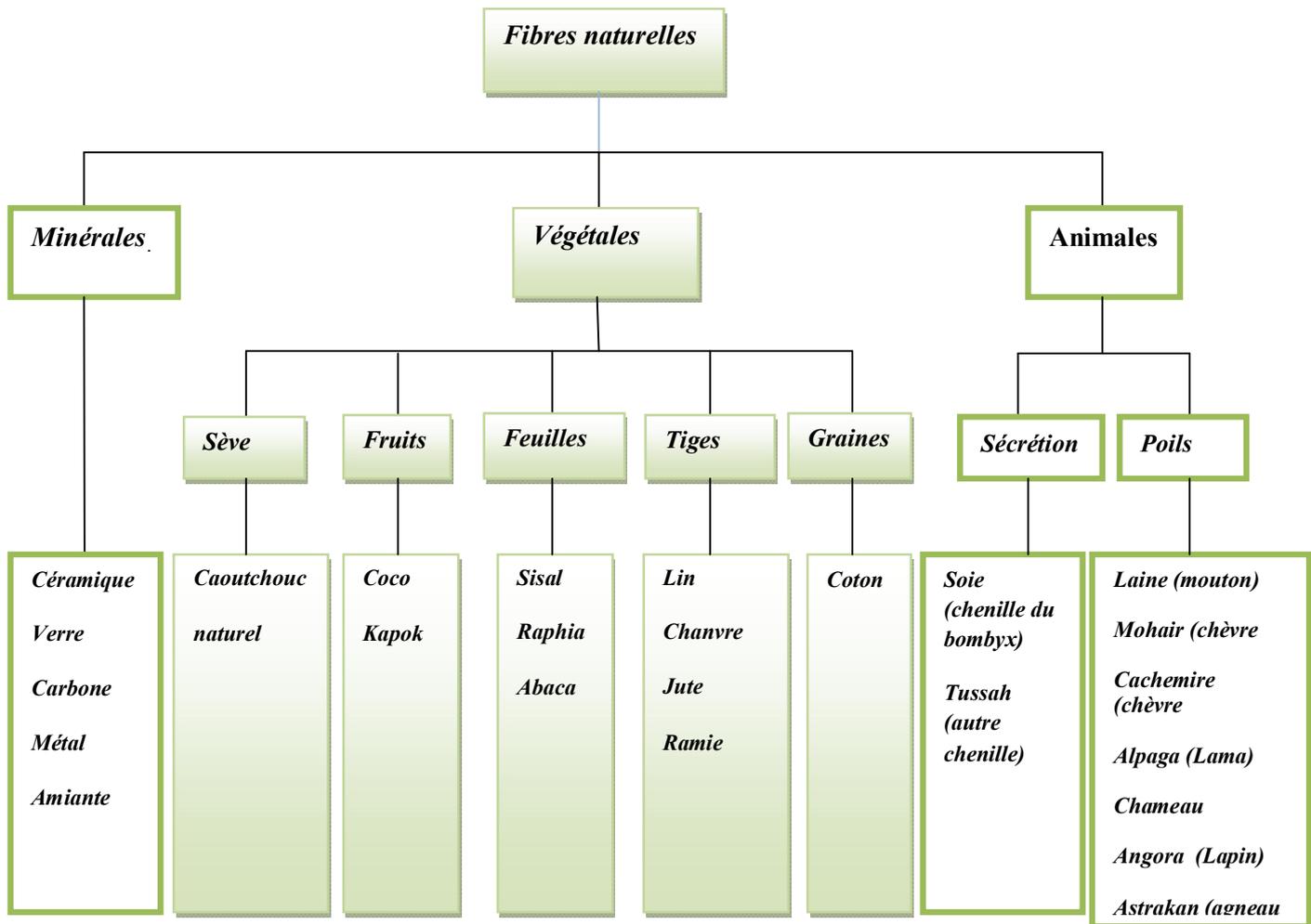


Figure 2.1 : Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales.

Elles constituent une alternative aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Néanmoins leurs propriétés doivent être encore améliorées. Elles présenteraient, toutefois, de nombreux avantages :

- des propriétés mécaniques proches de celles des fibres de verre (module d'Young) ; telle que le lin.

- un recyclage facile (combustion).

En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel :

- une méthode de mise en œuvre difficilement reproductible (non industrielle) ;

- des propriétés physiques non reproductibles ;

- la quantité et la qualité des fibres dépendent de l'environnement et de l'humidité ;

- une reprise en eau importante : 8 ou 10 % du taux d'humidité ;

- une calibration difficile

Nous serons intéressés dans notre travail aux renforts de types naturels végétaux.

2.2.1. Définition de la fibre végétale :

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [19,20]. Ils sont assimilables à un empilement de plis dont la structure est constituée d'une lamelle mitoyenne, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire.

2.2.2. Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres:

- suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénafe, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca, paille de graminée) [19].
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénafe, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [20].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [19].

2.2.3. Structure et morphologie des fibres lignocellulosiques :

Les fibres végétales sont principalement composées d'hémicellulose, de pectine et de cellulose, ce dernier constituant est le seul à présenter une forme cristalline conférant à la fibre des propriétés thermomécaniques intéressantes. Le tableau 1.2 donne la composition moyenne de quelques fibres.

Une fibre présente les parties suivantes (cf. une vue en coupe figure 2.1) :

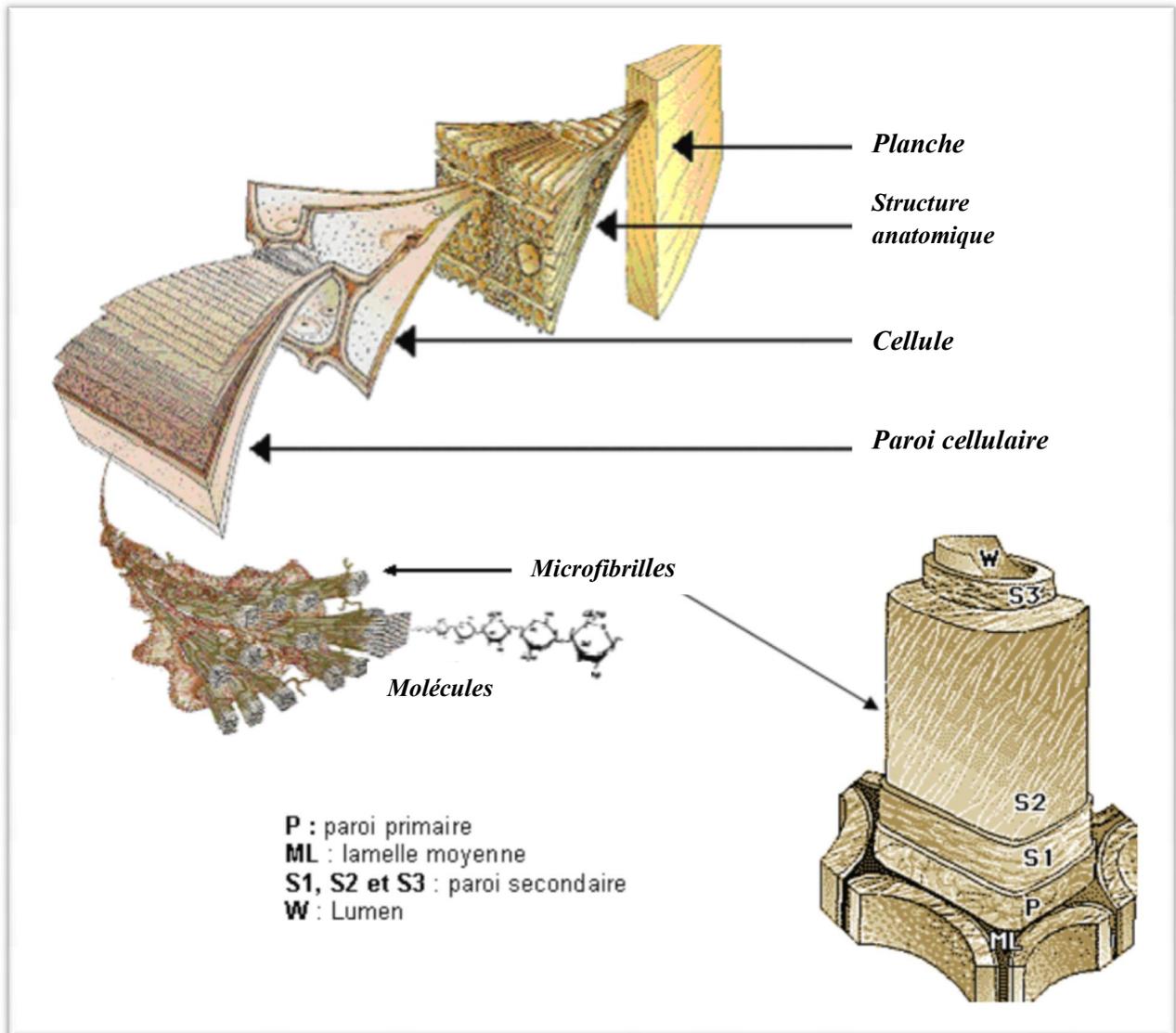


Fig.2.2 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington, 1998) [21]

- la lamelle mitoyenne *M* d'épaisseur de 0.5 à 2 μm en périphérie qui est commune aux cellules voisines. Elle est composée principalement de lignine (70%) associée à d'autres composés organiques tels les hémicelluloses, la pectine, la cellulose. La lamelle mitoyenne soude les fibres les unes aux autres et leur confère une grande rigidité grâce à la présence de la lignine.

- La paroi secondaire, principale partie de la fibre qui comprend trois parties distinctes :

- La paroi externe S1 mince (0.1 à 0.2 μm) dans laquelle les fibrilles sont enroulées en hélices parallèles, de sens opposés (une couche dans un sens, l'autre couche croisée).
- La paroi centrale S2, de beaucoup la plus épaisse (0.5 à 8 μm). Les fibrilles sont disposées en hélices parallèles, la rigidité de la fibre dépend de l'épaisseur de cette paroi.

Chapitre II : *Etude des fibres naturelles végétales.*

- La paroi interne S3 (appelée paroi tertiaire) ; mince (0.04 à 0.1 μm), voisine du lumen W. Entre les fibres, il existe des espaces qui sont partiellement composés de lignine et d'hémicelluloses.

Les parois sont constituées de microfibrilles de cellulose qui sont les éléments de base des fibres végétales (64 à 85% en masse [22] [23]). Elles peuvent être considérées comme des couches composites renforcées par des microfibrilles arrangées de manière hélicoïdale, dans une matrice amorphe composée de pectine.

L'interface entre les couches est constituée d'hémicelluloses [24] [25]. L'orientation des microfibrilles au sein des parois cellulaires confère aux fibres végétales les caractéristiques structurales les plus importantes. Leur inclinaison par rapport à l'axe de la fibre influe fortement sur les propriétés mécaniques de cette dernière [26] [27]. Plus l'angle d'inclinaison est faible et meilleures sont les caractéristiques mécaniques car les microfibrilles de cellulose tendent à être sollicités suivant leur axe. A ce titre, on peut remarquer que parmi toutes les couches, celle notée S2 est la plus épaisse et possède les microfibrilles ayant l'inclinaison la plus faible (Fig. I-2). Il en résulte que cette couche confère à la fibre l'essentiel de sa rigidité et sa résistance. L'angle microfibrillaire est mesuré entre 6 et 11° selon [28] [29] [30] [31][32.]

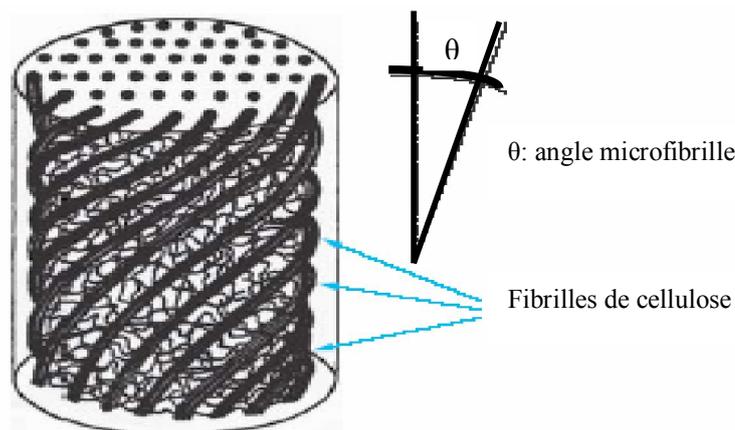


Figure 2.3: Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale [36].

Dans les plantes, la fibre contribue à des fonctions essentielles pour son développement : soutien et conduction. Elle est donc poreuse et certains liquides et gaz peuvent y pénétrer. Sa morphologie peut être influencée par plusieurs facteurs comme les saisons et les contraintes auxquelles sont soumis les arbres. Des différences de morphologie fibreuse ont également été observées suivant l'âge de la fibre : le bois formé pendant les premières années est différent du bois adulte. Le bois dit Juvénile présente des fibres plus courtes, à épaisseur de parois plus faible que celle du bois adulte [33] [34]

Chapitre II : *Etude des fibres naturelles végétales.*

2.2.3. Structure et composition des fibres naturelles

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont déterminées par leur :

- Composition chimique : pourcentage de cellulose (microfibrille = renfort)
- Structure physique : angle microfibrillaire (cf. 1.18). La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.³⁶

Tableau 2.1 : Composition chimique de fibres végétales, d'après Baley [35]

<i>Fibre</i>	<i>Pectine</i>	<i>Hémicellulose</i>	<i>Cellulose</i>
Lin	6-3	7-3	82-5
Chanvre	2.5	5.5	78.3
Jute	0.2	12	64.4
Sisal	0.8	12	65.8

2.3. Propriétés mécaniques des fibres naturelles

De par leur composition physique et chimique, les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques très variables conférant ainsi à chaque type de fibre une utilisation bien spécifique. Les travaux menés par Baley [37] montrent que les propriétés des fibres naturelles changent considérablement, cette variabilité prend naissance à partir de leurs récoltes par l'identification de l'aspect physiologique et biochimique sur les espèces de récoltes de la tige de jute [38].

Le tableau 2.2 représente les propriétés mécaniques moyennes en traction des différentes fibres naturelles.

Fibres	E (GPa)	A(%)	σ_u (MPa)	Densité
Lin	12-85	1-4	600-2000	1,45
Lin : moyenne mini-maxi	58±15 27-91	3,27±0,84 1,6-5,9	1339±486 531-3282	1,53
Ramie	61,4-128 27 65±18	1,2-3,8 3,2	400-938 755 800-1000	400-938 755 800-1000
Chanvre	35	1,6	389	1,07
jute	26,5	1,5-1,8	393-773	1,44
sisal	9-21	3-7	350-700	1,45
Noix de coco	4-6	15-40	131-175	1,15
Cotton	5,5-12,6	7-8	287-597	1,5-1,6

2.4. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales

Plusieurs facteurs peuvent influencer les propriétés des fibres. On peut notamment distinguer l'influence des conditions : i) culturelles de la plante pendant sa croissance (variété de semis, terrain, traitements phytosanitaires, engrais, maturité), ii) climatiques (saison, température, pluviométrie) et les étapes de l'élaboration (séchage, rouissage, teillage, filature, traitements). Par ailleurs, la géométrie des fibres testées a une influence sur les propriétés. En effet, il apparaît que le module d'Young a tendance à diminuer avec le diamètre moyen [39] [40] [41] et la longueur [42] [43] de la fibre. Charlet [40] a rapporté que les fibres de lin, de la variété Hermès, localisées dans la zone médiane de la tige présentent, bien que de façon très dispersée, de meilleures propriétés mécaniques. [44]

Les paramètres extrinsèques, tels que les techniques d'extraction des fibres [42], les traitements chimiques [42], mécaniques [45] ou biologiques [46] ainsi que les réglages des paramètres des procédés, les conditions d'essai (humidité, température, vitesse de sollicitation), ou encore les méthodes d'analyses (déformation, section), sont autant de facteurs pouvant avoir une influence importante sur les résultats [45]

2.5. Présentations des différentes fibres végétales

a. Lin

Le lin appartient à la famille des lénacées. C'est une plante annuelle dont la tige atteint de 0.6 à 1.2 mm de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Le lin textile est une culture septentrionale. En Europe, on le trouve en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin est soit coupé, soit arraché. On récupère la matière textile qui se trouve être la tige de la plante, sous forme de faisceaux qui constituent la fibre technique. Cela requiert trois opérations : le rouissage, le teillage et le peignage. La cellule élémentaire (ou fibre ultime de lin apparaît comme un cylindre imparfait polygonal, généralement à six côtés, comportant éventuellement un lumen (cavité centrale d'une fibre végétale).

b. Ramie :

La ramie (*bochneria nivea*) est un arbuscule de la famille des urticacées (en anglais China grass). Elle se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles. L'extraction de la fibre nécessite un décorticage et un

Chapitre II : *Etude des fibres naturelles végétales.*

dégomunage très poussé. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17cm de longueur ; elle présente une concentration en cellulose importante, une haute et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement.

c. Chanvre :

Le chanvre (*canabis sativa*) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe en France et en Italie. Le processus d'obtention de la fibre du chanvre est identique à celui du lin. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie et légèrement plus lignifiée que celle du lin

d. Sisal :

Ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (*agave sisalana*). Originaire de Yucatan, elle est produite en Amérique du sud, en Afrique, aux Antilles et en Extrême Orient [42]. Les fibres mécaniques sont surtout extraites de la périphérie de la feuille. Un plant de sisal produit environs 200 à 250 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont rouissage et le teillage. Les fibres sont ensuite lavées à grand eau pour enlever les déchets en surplus.

e. Coir de la noix de coco

Le cocotier (*Cocos nucifera*) est un palmier poussant dans les pays tropicaux. Les fibres sont prélevées dans le coir (mésocarpe fibre) de la noix de coco et sont utilisées en corderie et en sparterie (objet tisse, vanné ou tressé).

f. Jute :

Le jute est une plante des régions tropicales (genre *Corchorus*) appartenant à la famille liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6m avec un diamètre d'environ 3 m. Le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce en existe deux (une blanche et une rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre est très courte et très lignifiée. L'extraction de la fibre technique est obtenu par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau 3 m [47]

2.6. Méthodes d'extraction des fibres végétales

Il existe six types de fibres végétales : les fibres provenant des poils qui recouvrent certaines graines, les fibres du liber, les fibres rugueuses des dicotylédones, les fibres vasculaires, les fibres dures extraites des feuilles et des tiges des monocotylédones, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées.

Chapitre II : *Etude des fibres naturelles végétales.*

Les fibres végétales sont extraites des plantes par différentes méthodes mécaniques, chimiques et biologiques (utilisation des bactéries et enzymes) en fonction du type de fibre considéré. La méthode d'extraction traditionnelle, le rouissage, utilise des bactéries existant dans l'environnement pour dissoudre les extractibles. Certaines bactéries, utilisées lors du rouissage à l'eau et certains champignons utilisés lors du rouissage à la rosée se sont révélés très efficaces pour attaquer les substances non celluloses des plantes et libérer la fibre. Bien que le rouissage atmosphérique fournisse des fibres de qualité, il requiert un temps d'extraction relativement long durant lequel le contrôle de la qualité de la fibre n'est pas aisé. Une méthode de rouissage très pratiquée utilise des solutions alcalines, des solutions d'acide doux et des enzymes pour accélérer le processus de libération de la fibre. L'alcali le plus utilisé est la soude (ou hydroxyde de sodium) ; mais des acides doux comme l'acide sulfurique et l'acide oxalique en combinaison avec un détergent ont été aussi utilisés pour l'extraction des fibres. Les facteurs déterminant la qualité des fibres chimiquement extraites sont la teneur du composé chimique en usage et la durée du traitement. En ce qui concerne le rouissage enzymatique, une combinaison d'enzymes telles que les pectinases, hémicellulases et cellulases est généralement employée en association avec un pré- ou post- traitement chimique. Plus récemment, des multi-enzymes pouvant effectuer de 10 à 15 activités pour une amélioration de la qualité ont été élaborés. La séparation mécanique quant à elle utilise des machines à décortiquer, le vapocraquage, l'extraction à l'ammoniac et le process Tilby. La méthode Tilby, en effet, se révèle efficace notamment dans l'extraction des fibres de canne à sucre, de maïs, et d'autres plantes dont la tige regorge de fibres celluloses, car elle offre l'avantage de réaliser une extraction sans désintégration des constituants. Des fibres extraites de la paille de blé et de la canne à sucre par la méthode Tilby et le vapocraquage ont été de meilleure qualité pour être utilisées dans le textile dans les composites.

2.7. Utilisation des fibres végétales : avantages et inconvénients

Outre l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement au stade de la fabrication, un composite renforcé par des fibres naturelles peut également contribuer au respect de l'environnement durant la phase de production en plus de son poids réduit.

- Culture renouvelable,
- Culture non polluante : pas de traitements phytosanitaires (herbicides, fongicides),
- Bonne rentabilité économique pour les agriculteurs notamment dans les pays peu industrialisés. Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de

Chapitre II : *Etude des fibres naturelles végétales.*

matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous

Tableau 2.3 : Avantage et inconvénients des fibres naturels.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Faible coût.	Absorption d'eau
Biodégradabilité.	Faible stabilité dimensionnelle.
Neutre pour l'émission de CO ₂ .	Mauvaise tenue en vieillissement.
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max).
Pas de résidus après incinération.	Fibres anisotropes.
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	Renfort discontinu.
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.1. Caractérisation des différentes matières utilisées :

3.1. 1. Caractérisation de la matrice :

La résine utilisée dans ce projet est la MEDAPOXY 812INJ, livré par Granitex sous forme de kit hermétique

Les résines MEDAPOXY 812INJ sont des matières plastiques **thermodurcissables**, c'est-à-dire qu'elles durcissent à température ambiante grâce à l'association d'un accélérateur et d'un catalyseur qui provoquent une réaction exothermique (élévation de la température de la résine), cette transformation est irréversible. Une résine de synthèse est généralement composée de deux produits chimiquement différents dont l'association est complémentaire.

Le premier **A** est la résine en elle-même, chaîne de polymères ouverts à tendance plutôt visqueuse et de couleur presque incolore.

Le second **B** est le catalyseur a pour effet de provoquer la fermeture des chaînes de polymères entièrement contenues dans la résine

Dont le rapport massique entre les deux composants A et B, R_m , est donné par le fournisseur.

$R_m = 2$.

Tableau 3.1 : Quelques caractéristiques de la résine la MEDAPOXY 812INJ

Rm	2
Densité	1,1± 0,1
Viscosité	800 mPa.s
Durée de vie en pot après mélange	30 à 20 minutes
Résistance en compression	>70 Mpa
Résistance à la flexion	>57 Mpa

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.1.1.1. Analyse thermique de la résine : L'ATG et L'ATD

L'analyse thermogravimétrique est effectuée au niveau de l'UR- MPE à l'aide de l'appareil de type STA NETZSCH (Simultaneous Thermal Analysis) 409. Ce dernier est basé, d'une part, sur la mesure différentielle de l'effet thermique à l'aide de deux piles thermoélectriques et, d'autre part, sur la mesure de la chute de masse sous l'effet de la température. Cette technique fait partie de la norme *NF-EN31357-2* (plastique. Analyse calorimétrique différentielle).

La figure 5.1 représente l'appareil *STA 409* constitué de deux cellules identiques (échantillon et référence) scellées dans un bloc hermétique programmé en température et équipé d'une balance pour l'analyse thermogravimétrique.



Figure 3.1. L'appareil DSC.

Les résultats de l'ATD et de l'ATG de la résine sont présentés dans la figure

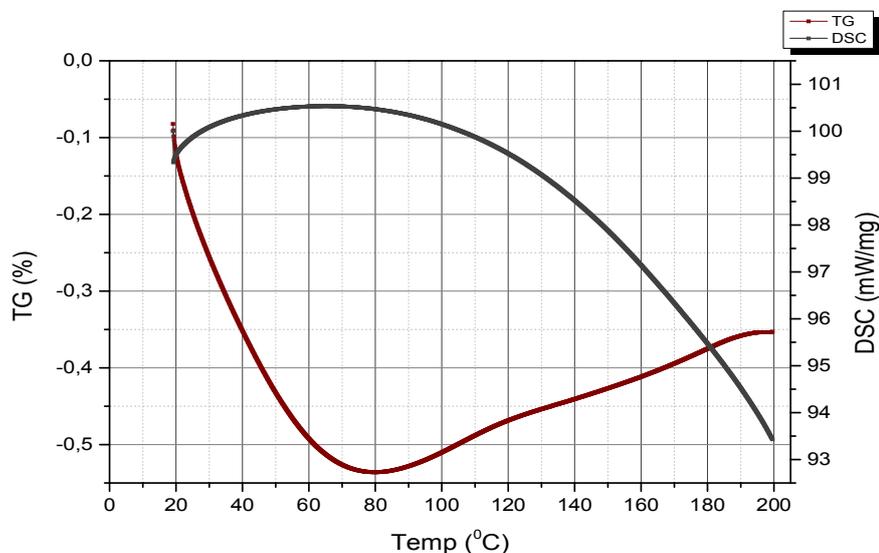


Figure 3.2 : Analyse thermique différentielle, Analyse thermique

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Le graphique est résumé dans le tableau 3.2 qui montre la température de transition et la chute de masse de la matrice.

Tableau.3.2. Résultats de l'ATD, ATG des matrices

<i>La matrice</i>	<i>La température de transition</i> $T_g (^{\circ}C)$	<i>La chute de masse</i> $\Delta M/M_0$
INJ 812	128.5	7%

Pour les résultats de l'analyse thermogravimétrique, nous avons obtenu une chute de masse de 7% pour la matrice INJ812. Cette valeur revient à la quantité des ajouts chimiques dans la matrice INJ812 qui s'évapore sous l'action de température, en dégradant sa stabilité thermique

3.1.1.2 Etude de la stabilité dimensionnelle par dilatométrie

Afin de pouvoir introduire la matrice dans le porte échantillon de l'appareil, les éprouvettes sont élaborées sous forme cylindrique de diamètre 6 mm et de longueur 24,40 mm. La vitesse de chauffage a été fixée à 2 °C/min selon la norme NF-EN31357-2.

Les résultats obtenus sont présentés par la figure 3. 3.

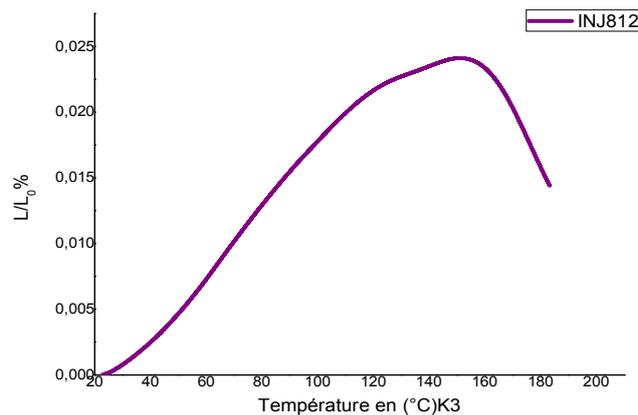


Figure 3.3 : Comportement dilatométrique de la résine inject INJ812.

Cette courbe dilatométrique montre un changement brusque à partir de 120 °C à 140°C. On constate un retrait considérable de l'ordre de 75% par rapport à la longueur initiale. En outre, les mesures de l'ATG montrent une chute de masse de 7%, ceci est dû à la présence d'une grande quantité de diluant dans la matrice.

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.1.1.3. Caractérisation mécanique de la matrice :

3.1.1.3.1. Essais de traction

Les essais de traction sont effectués sur la matrice MEDAPOXY INJ812. Les éprouvettes sont réalisées en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527-4 type B.

Les essais de traction sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle munie d'un capteur de force de 10 KN et d'un extensomètre, sur des éprouvettes en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527-4 type B, avec une vitesse de charge appliquée est de 2 mm/min à la température ambiante.

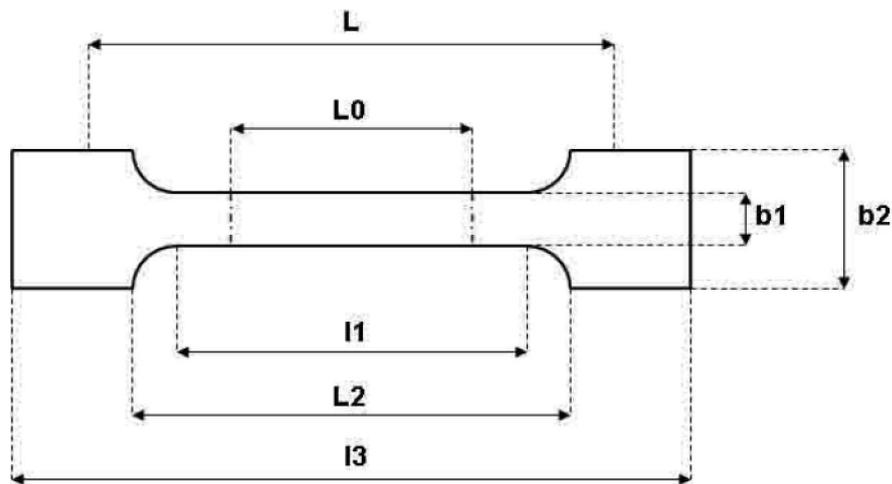


Figure.3.4. la géométrie de l'éprouvette haltère.

$L3$: Longueur totale

$L1$: Longueur de la partie étroite parallèle

R : Rayon

$b2$: Largeur aux extrémités

$b1$: Largeur de la partie étroite

h : Épaisseur

$L0$: Longueur de référence

L : Distance initiale entre mors

Les Résultats expérimentaux pour les éprouvettes de la résine :

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

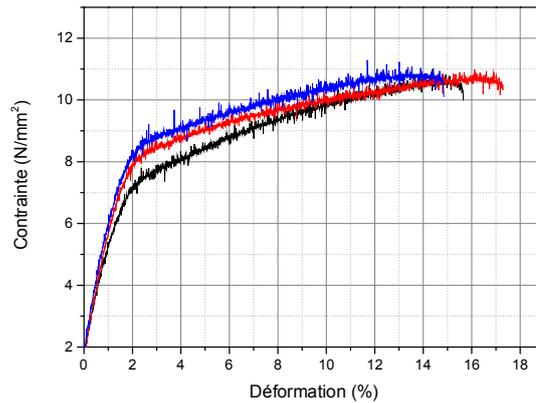


Figure.3.5 : comportement mécanique en traction de la matrice INJ 812.

Tableau 3.3: Tableau des caractéristiques mécaniques en traction de la matrice INJ 812.

<i>Eprouvette</i>	ϵ_{rep} (%)	σ_{rep} (Mpa)	E (Mpa)
Eprouvette 1	15.70	9.98	465.60
Eprouvette 2	17.30	10.30	461.70
Eprouvette 3	14.80	10.10	479.20
Moy	15.93	10.13	468.83

La matrice INJ812 est caractérisée par une phase plastique très importante par rapport à son domaine élastique. On note une contrainte à la rupture très faible (10.13 MPa), cependant, les déformations sont très importantes.

3.1.2. Caractérisation des fibres naturelles :

Dans notre étude, Nous allons utiliser les fibres de jute, de lin et de sisal comme renfort pour l'élaboration de notre composite, pour cela en va étudier le comportement mécanique de chaque variétés.

3.1.2.1. Caractérisation mécanique en traction de la fibre et la mèche de sisal :

Cette essai est effectuée sur une machine de type Zwick équipée d'un capteur de force de 2 kN et piloté par le logiciel testexpert 9.11, à une température ambiante.



Figure .3 .6 : machine de traction

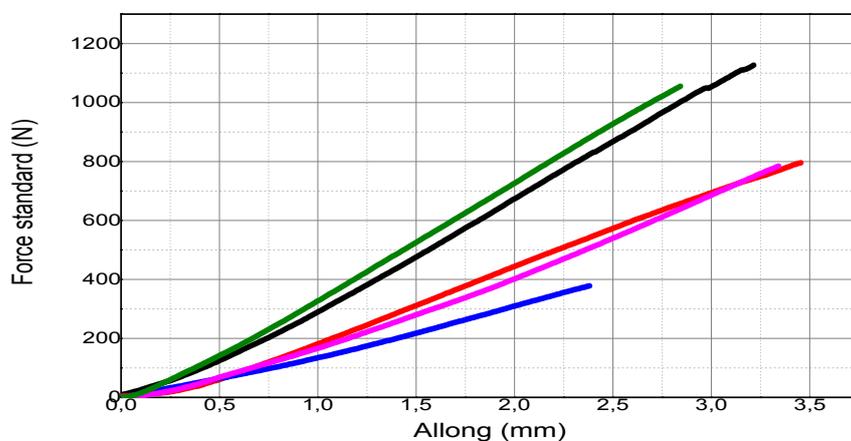


Figure 3.7 : Courbe en traction de la fibre élémentaire e sisal

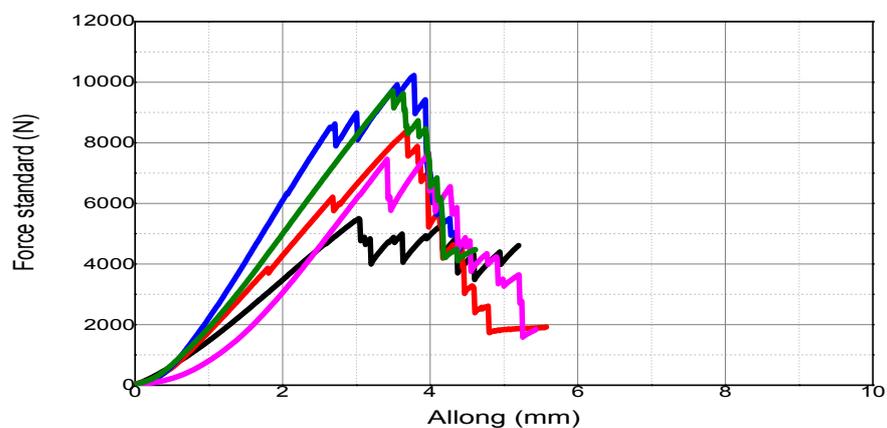


Figure 3.8: courbe en traction d'un faisceau de mèche

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

La figure 3.7 représente le comportement mécanique en traction de '5' fibres élémentaires et la figure 3.8 représente le comportement mécanique en traction de 5 faisceau de mèches de fibre de sisal. On remarque que dans la première figure, un contraste entre le comportement des fibres élémentaires par contre dans la deuxième figure on remarque presque une similarité dans le comportement des fibres.

La différence de comportement revient à l'influence des conditions : i) culturales de la plante pendant sa croissance (variété de semis, terrain, traitements phytosanitaires, engrais, maturité), ii) climatiques (saison, température.....) et les étapes de l'élaboration (séchage, rouissage, teillage, filature, traitements). Par ailleurs, la géométrie des fibres testées a une influence sur les propriétés

Le tableau 3.4 : résultats de comportement en traction des fibres élémentaires et une mèche de fibre de sisal

Eprouvettes	Paramètres des fibres unitaires			Paramètres des mèches		
	$\epsilon_{rup}(\%)$	$\sigma_{max}(\text{MPa})$	E(MPa)	$\epsilon_{rup}(\%)$	max(MPa)	E(MPa)
Eprouvette1	3,22	1.13	13.8	4.5	5.5	38.91
Eprouvette2	3,46	0.8	63.23	4.23	8.4	70.23
Eprouvette3	2,38	0.4	12.78	4,41	10.22	121.53
Eprouvette4	3,34	0.8	7.44	4.33	7.66	73.29
Eprouvette5	2,84	1.05	17.63	4,62	9.72	61.85
Moy	3.05	0.83	11.6	4.41	8.3	73.16

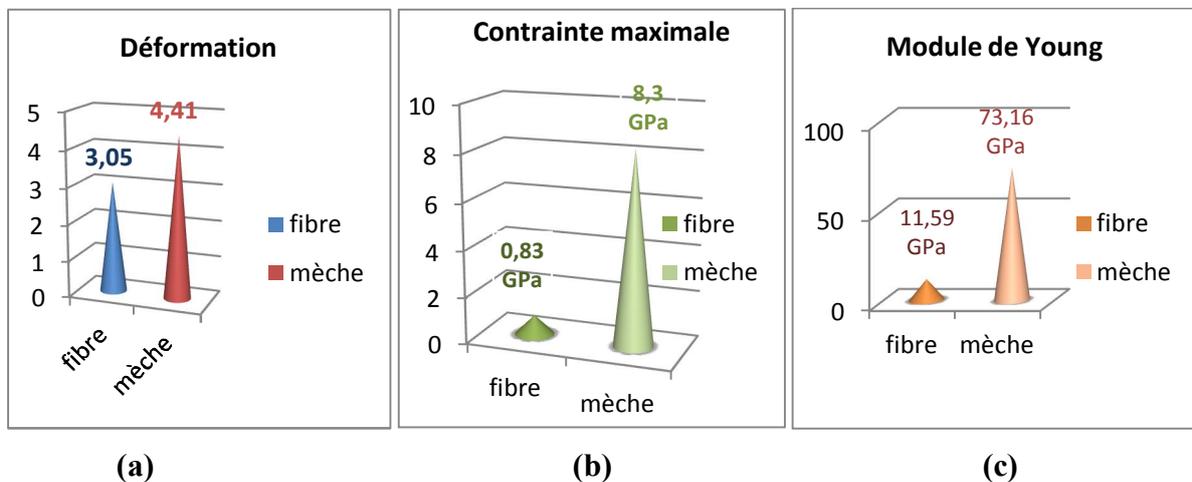


Figure 3.9 : Histogramme de : a) déformation, b) contrainte max et c) le module de young.

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.1.2.2. Comportement en traction des fibres de lin, sisal et jute:

De même principe en continue avec les fibres de lin et de jute :

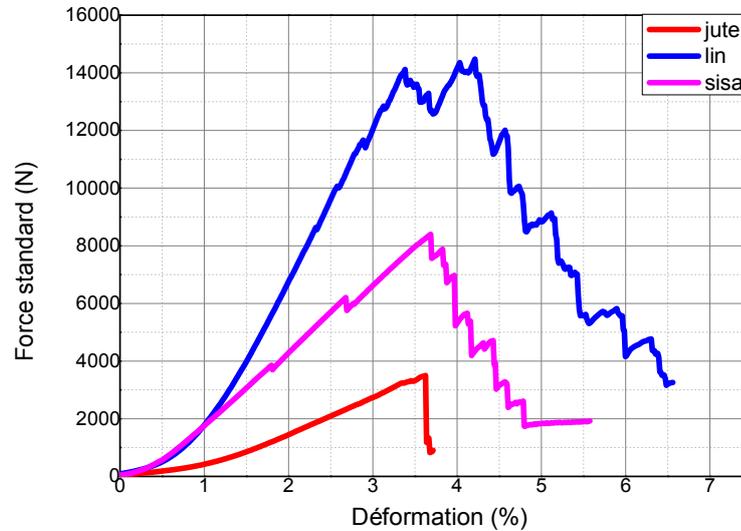


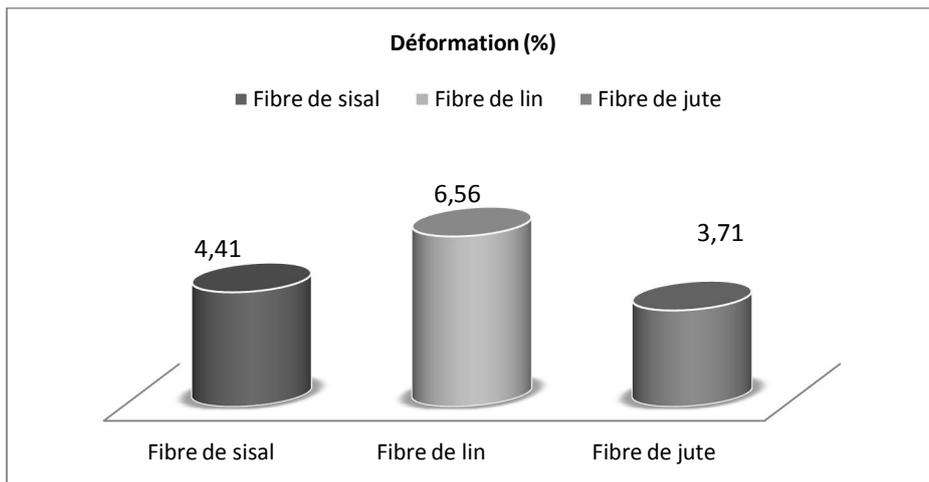
Figure 3.10 : Comportement mécanique en traction des fibres de lin, jute et sisal

On remarque que ces fibres ont un comportement non linéaire et se compose de trois parties. La première est linéaire élastique, puis la courbe contrainte-déformation rentre dans une phase non-linéaire, due selon les auteurs, au réarrangement des microfibrilles. Enfin la dernière partie consiste en un plateau au cours duquel la contrainte n'augmente plus jusqu'à la rupture. On note que le lin a un module de young le plus élevé que le sisal qui est deux fois plus élevé que la valeur de jute.

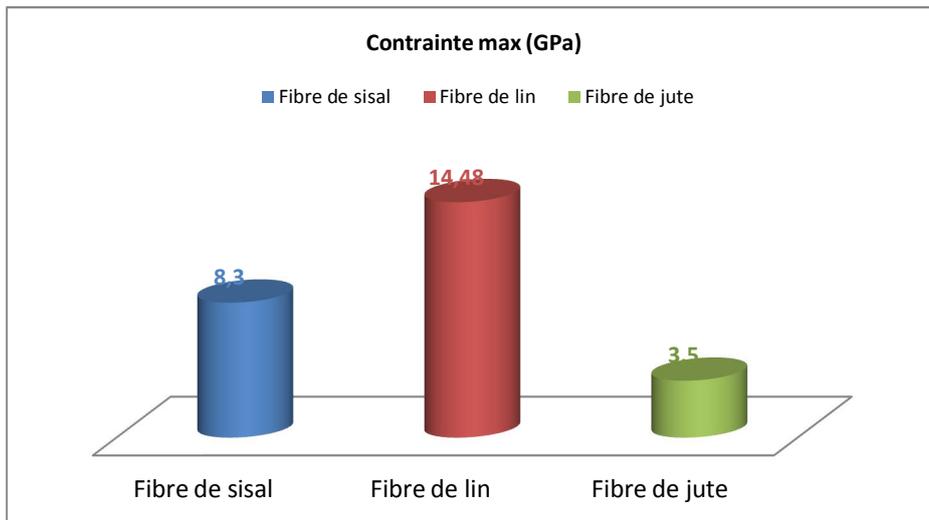
Le graphique est résumé dans le **tableau 3.5**

Caractéristiques fibres	ϵ_{rup} (%)	σ_{max} (GPa)	E (GPa)
Fibre de sisal	4.41	8.3	73.2
Fibre de lin	6,56	14.5	89.72
Fibre de jute	3,71	3.5	36.14

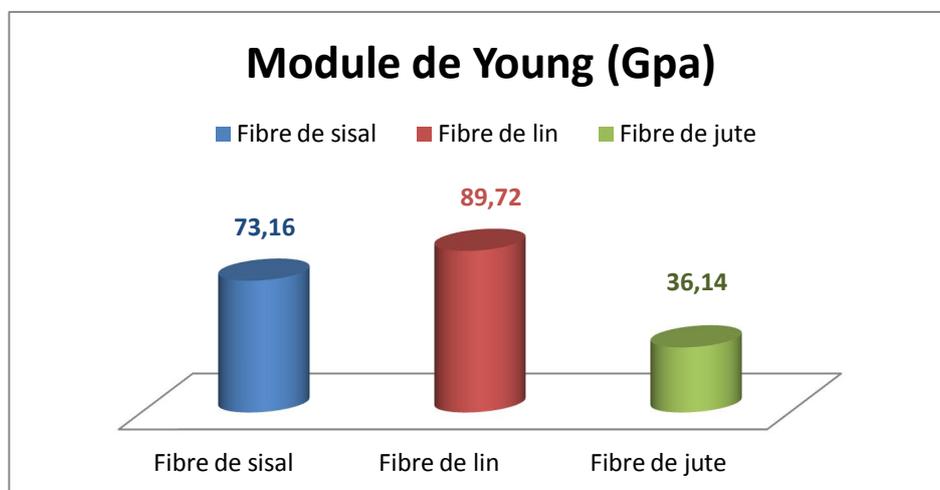
Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés



(a)



(b)



(c)

Figure.3.11 : Histogramme : a) de déformations, b) de module de young et c) de la contrainte max

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.2. Préparation des tissus :

Le tissu de jute se trouve sur le marcher tissé artisanalement, mais le sisal et le lin se trouvent sous forme des fibres. Ces fibres se sont tissées par nos soies même afin d'obtenir des nappes unidirectionnelles. La figure montre le tissu de lin, et le tissu de sisal.



Figure.3.12: le tissu de : (a)sisal, (b) lin

On a considéré ces nappes unidirectionnelles.



3.3. Elaboration des plaques de stratifiés

L'élaboration du stratifié jute/époxy est réalisée par la méthode dite « par infusion », le tissu est préparé et découpé aux dimensions 350x350 mm, les séquences d'empilements étudiées sont de type $[0^\circ]_3S$. Les nappes de jute, sisal et lin tissés sont placées de façon à éviter le phénomène de « vrille » du stratifié réalisé. Le principe de la méthode par infusion est simple, le renfort est disposé sur une plaque métallique, l'ensemble plaque métallique – renfort sont mis à l'intérieur d'un sac à vide, une fois le vide créé d'un côté, la résine se trouvant de l'autre côté du renfort traverse celui-ci suivant un front visible. L'ensemble reste sous vide pendant 24 heures. Une fois la plaque réalisée, elle est mise dans une étuve à 80 °C pendant une durée

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

de 8 heures pour permettre sa polymérisation. Le principe de la méthode est donné en annexe A.

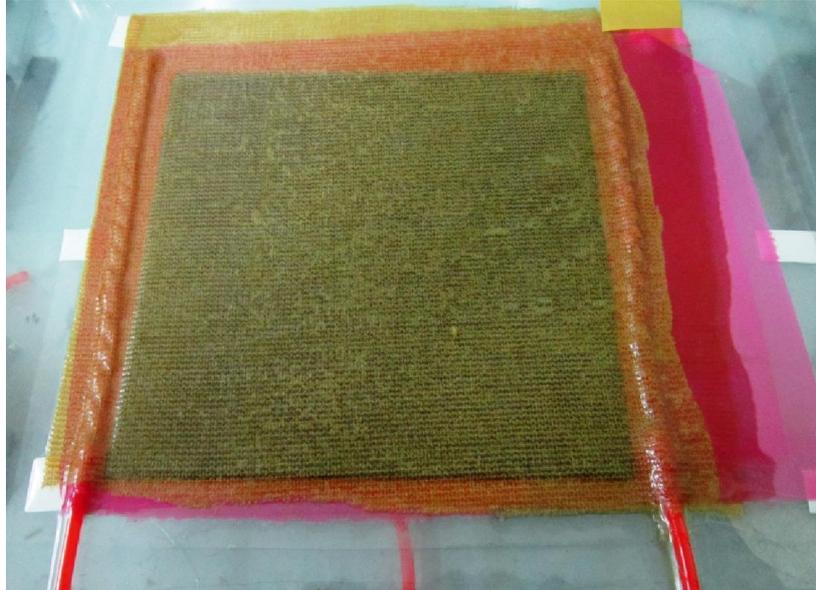


Figure 4.13: Elaboration de stratifié par la méthode dite « par infusion ».

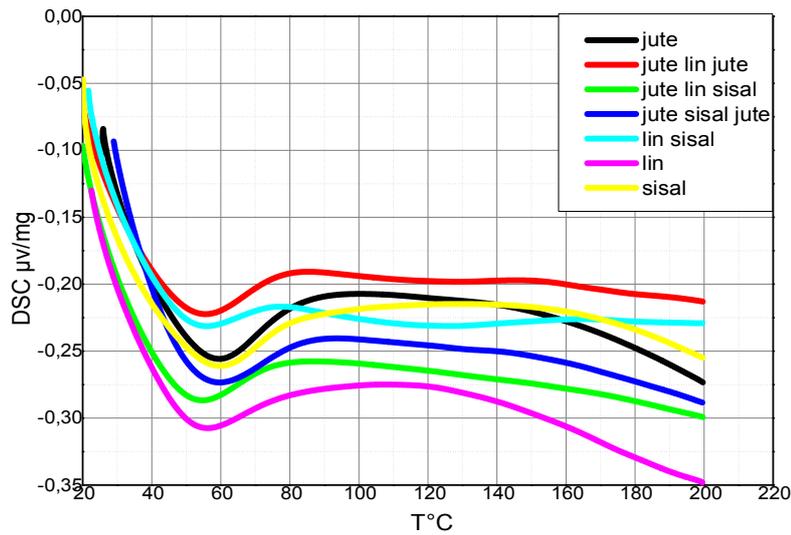
III.4.Caractérisation des stratifiés :

III.4.1.Analyse thermique :

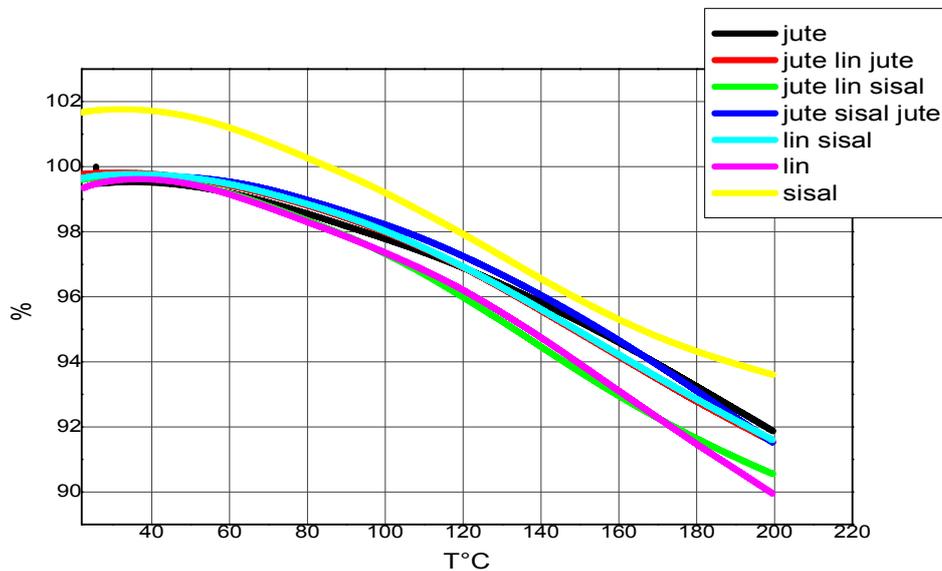
III.4.1.1. Analyse thermique différentielle: (ATD, ATG)

Les échantillons de nos stratifiés ont subi une analyse thermique de même principe qu'avant, les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés



(a)



(b)

Figure.3.14 : Comportement thermique :a) analyse thermique différentielle, b) analyse gravimétrique

Dans la figure (a) on remarque des pics endothermiques et un pic exothermique malgré que le pic de transition vitreuse est légèrement remarquable. Ces pics expliquent les changements physico-chimiques des stratifiés

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Tableau.3.6 : Résultats de l'analyse thermique différentielle et l'analyse gravimétrique

éprouvette	Jute	Lin	Sisal	Jute lin sisal	Jute lin jute	Jute sisal jute	Lin sisal
$\Delta m/m$	-8.28	-8.18	-9.66	-9.11	-8.23	-8.17	-9.05
T_g	128	127.9	129.5	129	128	130	127.8

D'après ces résultats, on remarque que la température de transition vitreuse varie légèrement, ce qu'on conclut que les fibres naturels n'influent pas sur la T_g . Par contre, on remarque une grande perte de masse à cause du dégagement de l'humidité ainsi qu'à la dégradation partielle des constituants des fibres naturelles. La température élevée dégrade les fibres naturelles.

3.4.1.2. Etude de la stabilité dimensionnelle par dilatométrie :

Afin de pouvoir introduire les matrices dans le porte échantillon de l'appareil, les éprouvettes sont élaborées sous forme cylindrique de diamètre 6 mm et de longueur 24,40 mm. La vitesse de chauffage a été fixée à 2 °C/min selon la norme *NF-EN31357-2*.

Les résultats obtenus sont présentés par la figure 3. 15.

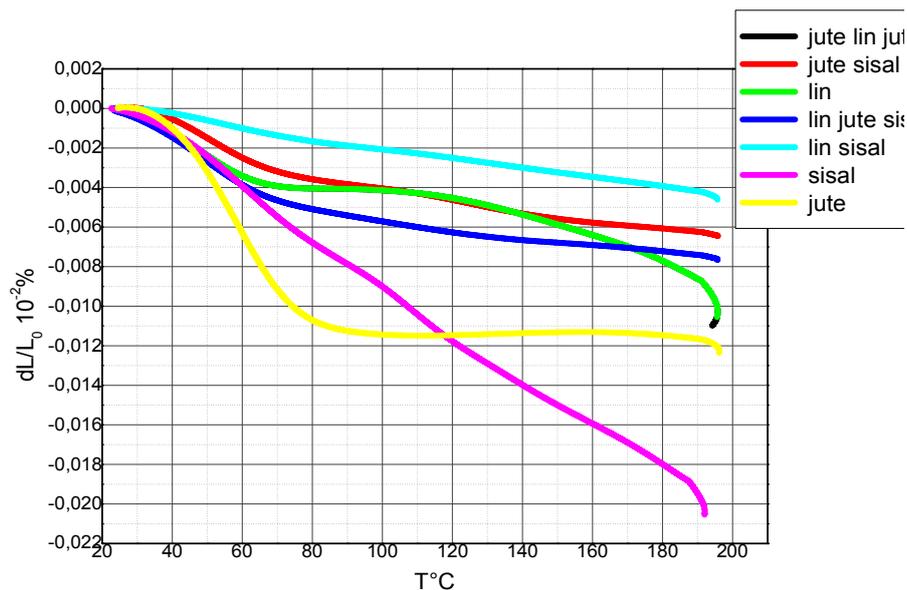


Figure.3.15 : Comportement dilatométrique

Cette figure représente la courbe dilatométrie des stratifiés étudiés, on remarque un raccourcissement des dimensions avec un contraste de comportement de chaque échantillon sauf le comportement des stratifiés lin et jute lin jute qui ont un comportement identique.

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.4.2. Analyse hygrothermique

L'analyse hygrothermique des stratifiés est effectuée suivant deux volets distincts. Le premier volet concerne l'analyse de l'influence de la température et du temps de chauffe sur la masse. Et le second volet concerne l'analyse du pouvoir d'absorption d'eau de nos échantillons de différents types de stratifiés

3.4.2.1. L'analyse de la variation de la masse :

Pour cette essai, on a mis des échantillons de nos stratifiés dans un étuve à une température de 80°C. Ces échantillons sont pesés avant l'essai, par la suite, des pesées sont effectuées durant le séchage pour quantifier la perte de masse.

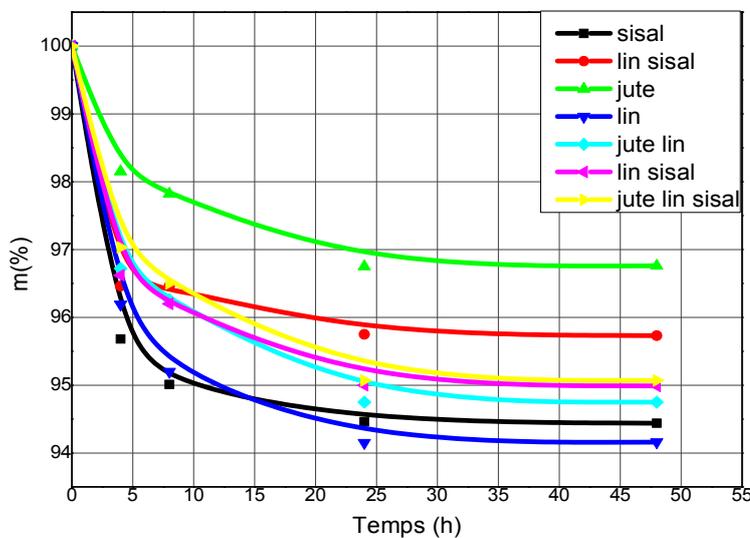


Figure 3.16 : courbe de la perte de masse

La figure montre la variation des masses des échantillons étudiés en fonction de temps de séchage. On remarque qu'il y a une différence dans le comportement de chaque variété, malgré qu'ils ont même allure. On note que ces stratifiés perdent une grande masse de les premiers heurs jusqu'à 24 heures ou on remarque que la masse devient constante. Cela revient au taux d'humidité à l'intérieur des fibres dont leur structure contient des cavités et des pores capillaires qui varie d'une fibre à l'autre

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.4.2.2. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau du stratifiés :

L'analyse du pouvoir d'absorption d'eau est effectuée sur les différents types de stratifiés, séchés, en les immergeant dans l'eau potable à température ambiante. Ces échantillons sont pesés avant et pendant l'immersion jusqu'à avoir une masse constante.

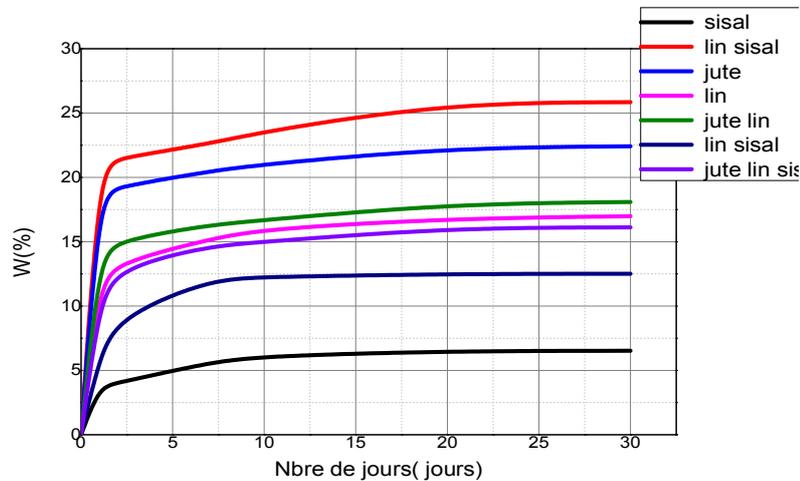


Figure 3.17 : Courbe de pouvoir d'absorption d'eau

Cette figure représente le pouvoir des stratifiés étudiés d'absorber l'eau. On note qu'il y a une forte absorption d'eau dans les deux premiers jours mais au bout de septième jours, on remarque une légère stabilité de masse. Cela revient à la composition chimique des fibres qui contient la cellulose, ce dernier contient les groupements ($-OH$) qui ont la capacité de relier avec l'eau en plus la structure des fibres qui contient les pores capillaires.

Les fibres naturelles ont une forte aptitude à absorber l'humidité, avec différente intensité, contenue dans leur environnement. Ce qui est expliqué par Cette hydrophile peut être nocive à la santé de la matière du composite si l'hygrométrie environnante n'est pas contrôlée.

3.4.3. Caractérisation mécanique des stratifiés :

3.4.3.1. Essai de traction :

La caractérisation mécanique que nous allons réaliser dans cette partie est basée dans un premier temps sur des essais statiques de type traction avec mesures de champs pour déterminer le module de Young, la contrainte maxi. Ensuite, des essais de flexion trois points sont réalisés pour déterminer le module de flexion.

Pour subir des essais statiques, la plaque de stratifié est découpé suivant la norme NF EN

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

ISO 527-1 relative aux tests de traction. Cette découpe est réalisée avec une scie en diamant. Les échantillons de dimensions 250 x 50 x 2,5 mm sont représentés sur **la figure 3.18** après avoir subis un polissage



Figure 3.18 : échantillon des éprouvettes coupées et étalonnées

- **Principe de l'essai de traction**

Le principe de l'essai est de placer l'éprouvette normalisée entre les mors d'une machine universelle **Zwick** de type **Z250**, et puis nous fixons les extensomètres au centre de l'éprouvette ; une force est appliquée sur l'éprouvette avec une vitesse de 2 mm/mn. La machine est pilotée par un ordinateur équipé du logiciel testXpert V9.0, munie d'un capteur de force de 250kN et elle est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la contrainte et de l'allongement.

Les figures suivantes montrent une image d'éprouvette avant et après l'essai de traction.

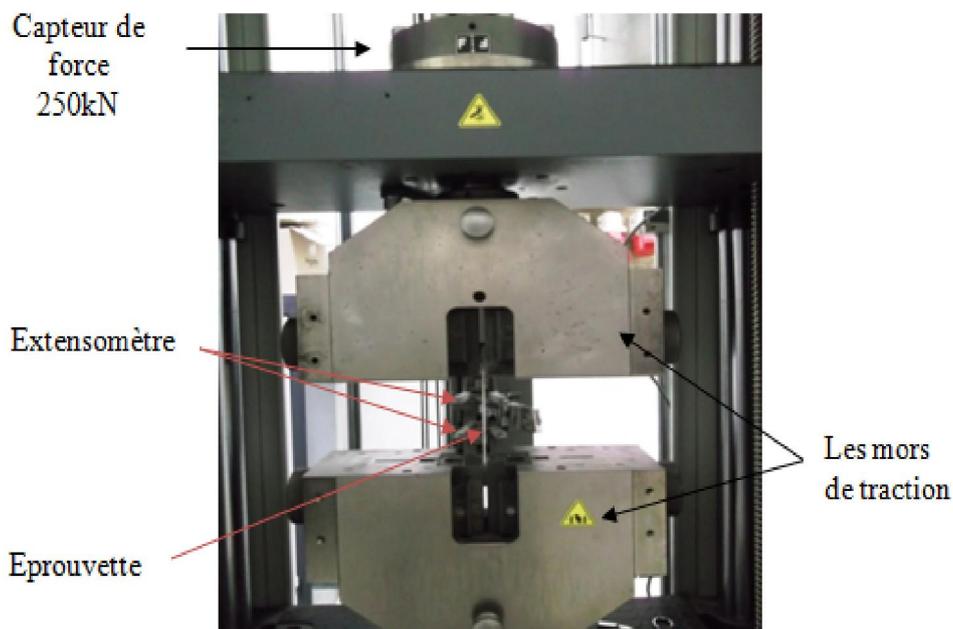


Figure 3.19 : Machine de traction universelle Zwick de type Z250

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Les Résultats expérimentaux pour les éprouvettes :

Les résultats enregistrés par la machine universelle sont illustré sur le graphe suivant :

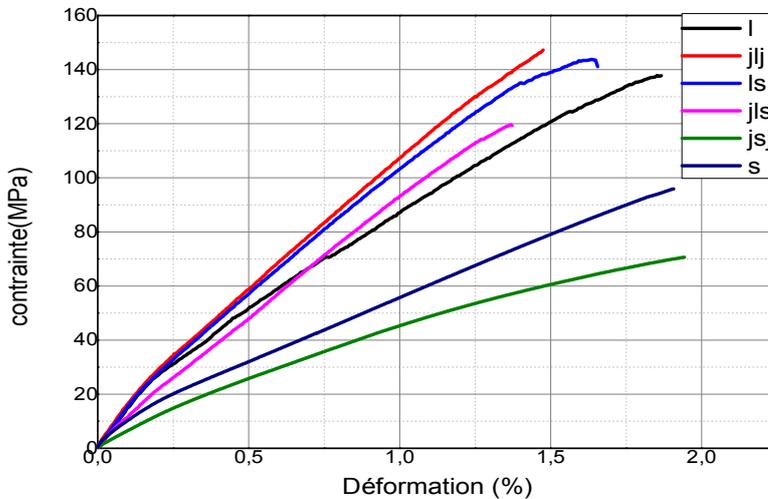


Figure 3.20 : Comportement mécanique en traction des stratifiés

D'après la figure 3.20, on remarque que le comportement en traction de ces stratifié est identique avec un contraste de contrainte à la rupture et aussi le module de Young. Le couplage matrice($E=10.3\text{MPa}$), fibre($E=37.2\text{MPa}$, 89.72MPa , 36.14MPa) améliore le module de Young de produit obtenu.

On remarque que le comportement mécanique de stratifiés étudiés présente un comportement non-linéaire. En effet, il est possible de distinguer deux étapes linéaires dans la courbe de réponse. Une première partie linéaire et purement élastique, puis la deuxième qui représente 70 % de la courbe. La jonction de ces deux parties se produit au niveau d'un point caractéristique appelé « genou » qui se situe générale autour de 0,3% de déformation

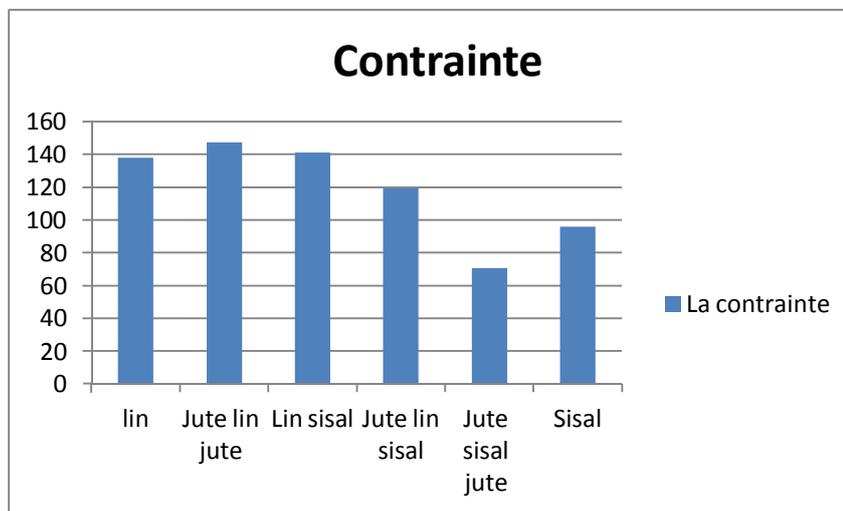


Figure.3. 21: mode de rupture de stratifié jute lin sisal et le stratifié jute

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

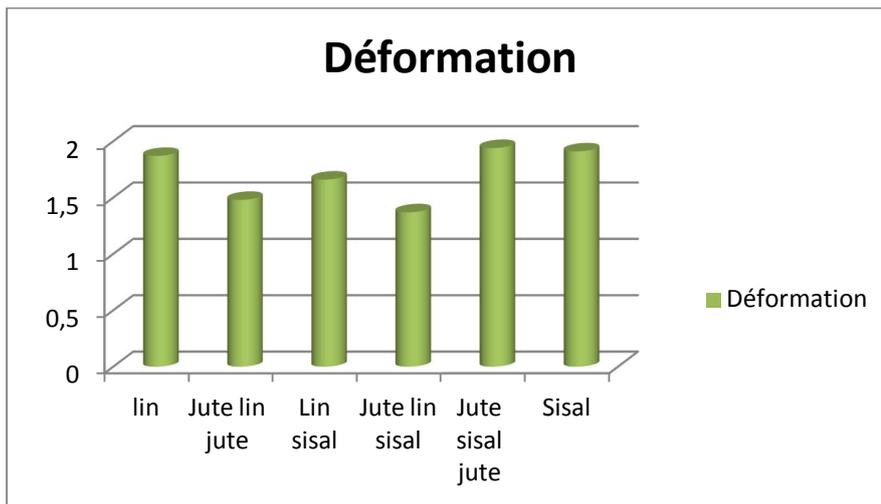
Tableau 3.7 : Résultats du comportement mécanique en traction des différents stratifiés

Type D'échantillon	ϵ_{rep} (%)	σ_{rep} (Mpa)	E (Gpa)
Stratifié lin	1.87	137.75	14.6
Stratifié jute lin jute	1.48	147.22	14.74
Stratifié lin sisal	1.66	141.09	14.63
Stratifié jute lin sisal	1.37	119.30	10.6
Stratifié jute sisal jute	1.94	70.62	5.6
Stratifié sisal	1.91	95.88	8.90

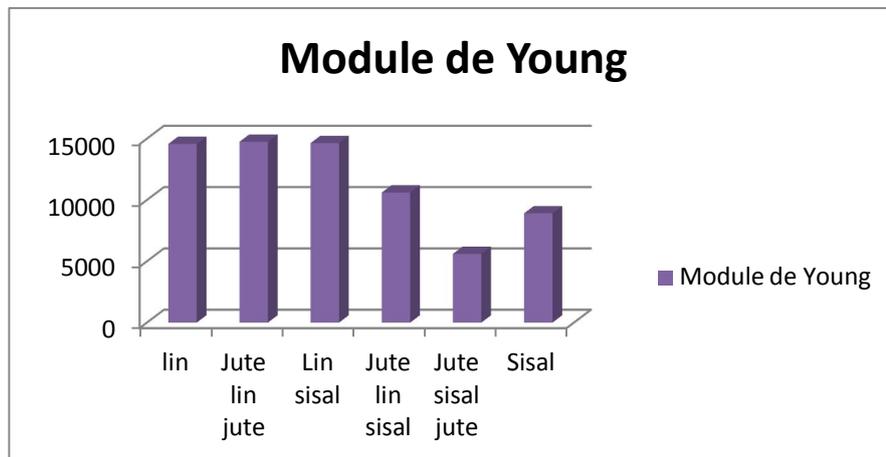


(a)

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés



(b)



(c)

Figure 3.22 : Histogrammes de : a) la contrainte, b) déformation et c) Module de young

3.4.3.2. Essai de flexion :

Les essais de flexion trois points sont effectués à température ambiante sur des échantillons élaborés suivant la norme ISO 178 qui précise les dimensions de l'éprouvette, la distance L entre les appuis et la vitesse d'essai

Le principe de cet essai est de mesurer un déplacement (flèche « y ») à partir d'un effort (F) placé au milieu de deux appuis. Des relations issues de la résistance des matériaux permettent de faire le lien entre ces deux grandeurs (y et F), la géométrie de la pièce (L , h et b) et les caractéristiques du matériau (σ , ε et E). L'éprouvette parallélépipédique, supportée comme une poutre, est soumise à une flexion, au milieu de la portée (flexion 3 trois points), à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les appuis de flexiomètre sont de forme hémisphérique de diamètre 36 mm pour les deux appuis inférieurs et 10 mm pour le poinçon.

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Les essais sont effectués à la température ambiante³³¹ sur une machine de type Zwick équipée d'un capteur de force de 2 kN et piloté par le logiciel testexpert 9.11.



Figure 3.23 : Essai de flexion sur machine de flexion de type Zwick

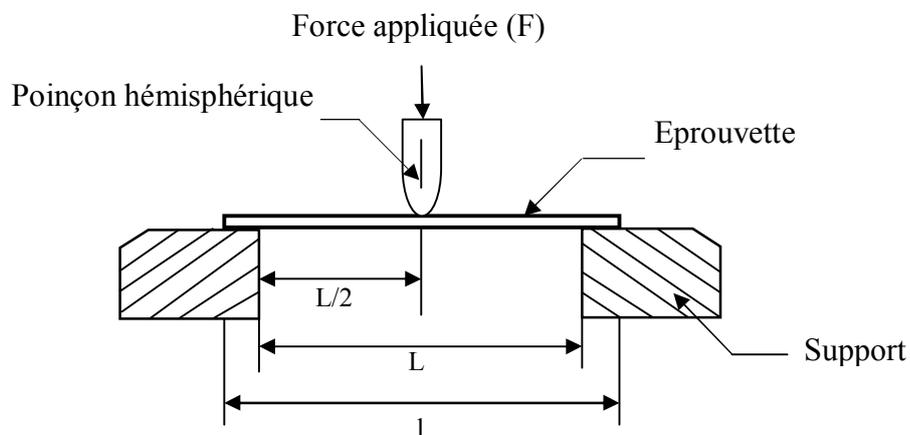


Figure 3.24 : Principe de l'essai de flexion 3 points.

Les différentes caractéristiques peuvent être estimées grâce aux relations ci-dessous, selon la norme **ISO 14125** :

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \times F_{rup} \times L}{2 \times b \times h^2} \quad ; \quad \varepsilon_{rup} = \frac{6 \times h \times y}{L^2} \quad ; \quad E = \frac{L^3}{4 \times b \times h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta y} \right)$$

Ou : σ_{\max} : est la contrainte maximale en (N/mm²) ;

ε_{rup} : est la déformation à la rupture sans unité ;

E : est le module de YOUNG en (MPa) ;

F_{rup} : est l'effort à la rupture de l'éprouvette en (N) ;

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

y : est la flèche en (mm) ;

b : largeur de l'éprouvette en (mm) ;

h : épaisseur de l'éprouvette en (mm) ;

L : est la distance entre appuis en (mm).

Résultats expérimentaux pour les éprouvettes :

Les résultats enregistrés par la machine de flexion sont données au graphe suivant :

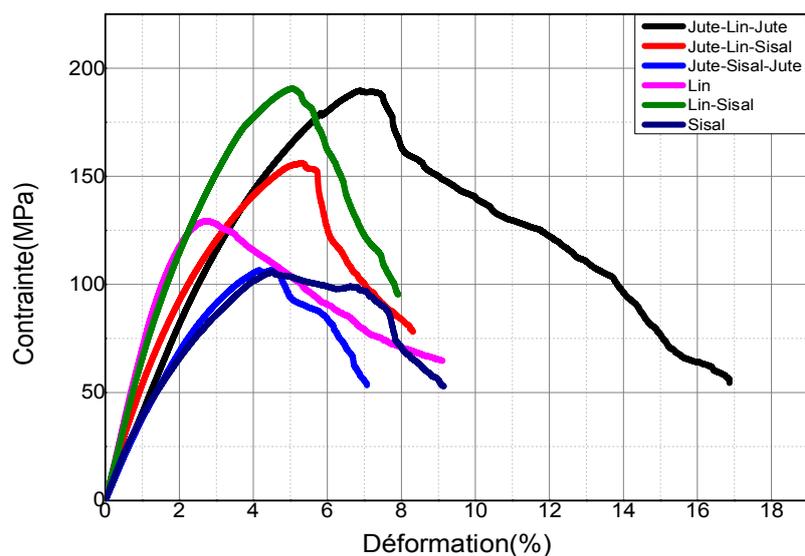


Figure 3.25 : Courbe moyen de comportement mécanique en flexion 3points de différents stratifiés

D'après la courbe, on remarque que le stratifié lin a un bon comportement en flexion (2.84 GPa) et (174GPa) pour le stratifié jute sisal jute/époxy et (1.29GPa) pour le stratifié lin sisal/époxy.

On distingue que le comportement mécanique en flexion n'est plus linéaire, il représente trois étapes. Le premier est linéaire élastique, puis la courbe contrainte-déformation rentre dans une phase non-linéaire, due selon les auteurs, au réarrangement des microfibrilles. Enfin la dernière partie consiste en un plateau au cours duquel la contrainte n'augmente plus jusqu'à la rupture

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Tableau 3.8 : Résultats des essais sur différents éprouvettes

Paramètres Eprouvettes	Hauteur b(mm)	Epaisseur a ₀ (mm)	Flèche Y (mm)	Force F (N)	$\bar{\sigma}_f$ (N/mm ²)	E _f (N/mm ²)
Stratifié lin	2.76	11.52	9.11	64.65	57.5	2.84
Stratifié sisal	2.84	11.29	9.15	52.9	41.83	0.62
Stratifié jute lin jute	4.47	13.46	16.87	54.37	22.44	0.54
Stratifié jute sisal jute	3.56	11.43	7.07	53.35	41	1.74
Stratifié lin sisal	4.59	10.9	7.92	95.28	47.8	1.29
Stratifié jute lin sisal	4.45	11.12	8.32	78.2	37.93	0.87

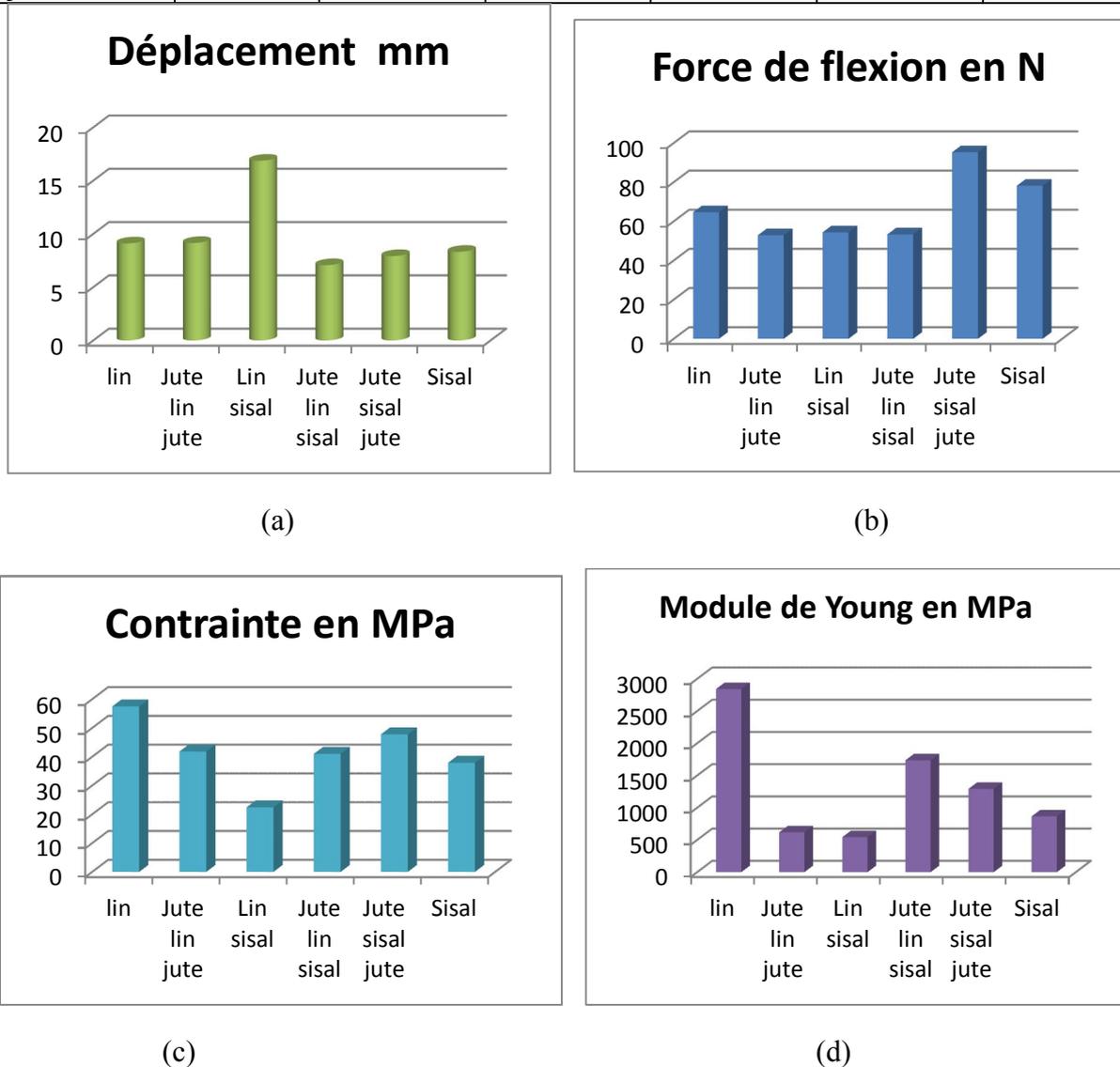


Figure 3.26 : Histogrammes de :a) la déformation, b) force en flexion, c) contrainte et d) le Module de young

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

3.4.3.3. Comportement en fatigue :

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés des matériaux du à l'application de cycle d'effort dont la répétition peut conduire à la rupture.

L'étude de ce phénomène est d'une grande importance car la contrainte de rupture en fatigue est très inférieure a celle de la rupture en traction, pour certains matériaux cette contrainte peut même être inférieure a leur limite élastique

- **Traction cyclique**

Les essais de traction cyclique consistent à imposer une succession de cycles charge-décharge avec un incrément de contrainte à chaque nouveau cycle.

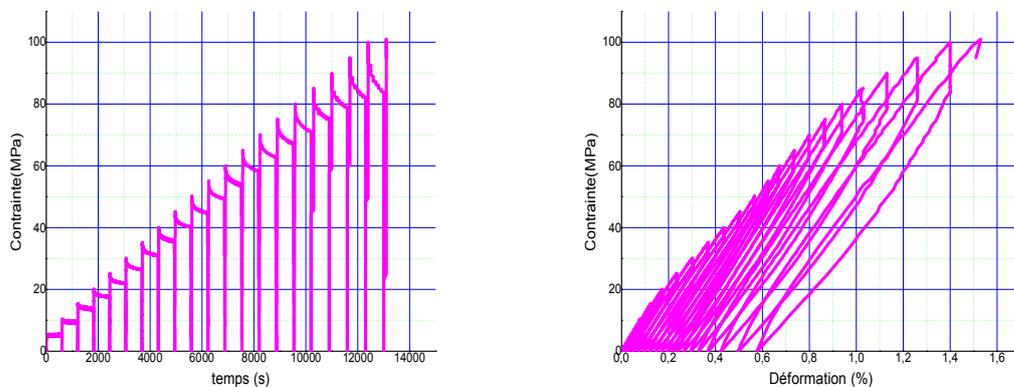


Figure.3.27 : Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/lin/jute/époxy'

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

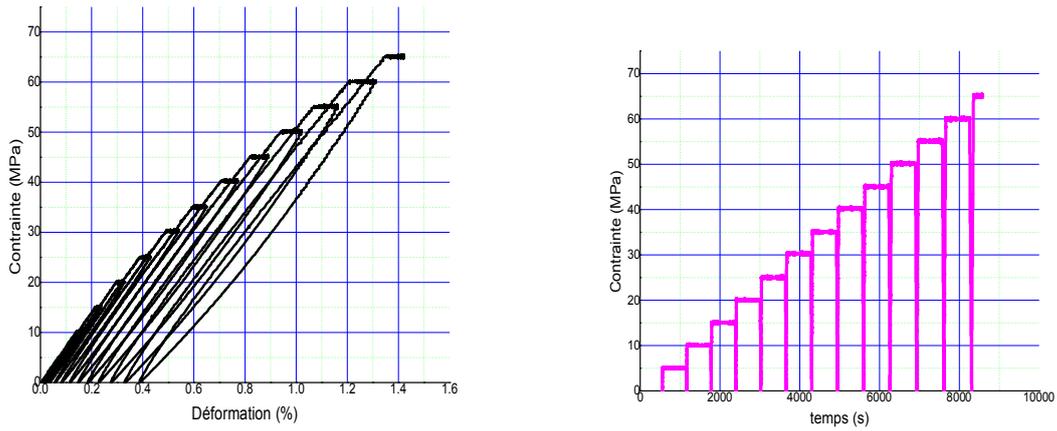


Figure 3.28 : Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/sisal/jute/époxy'

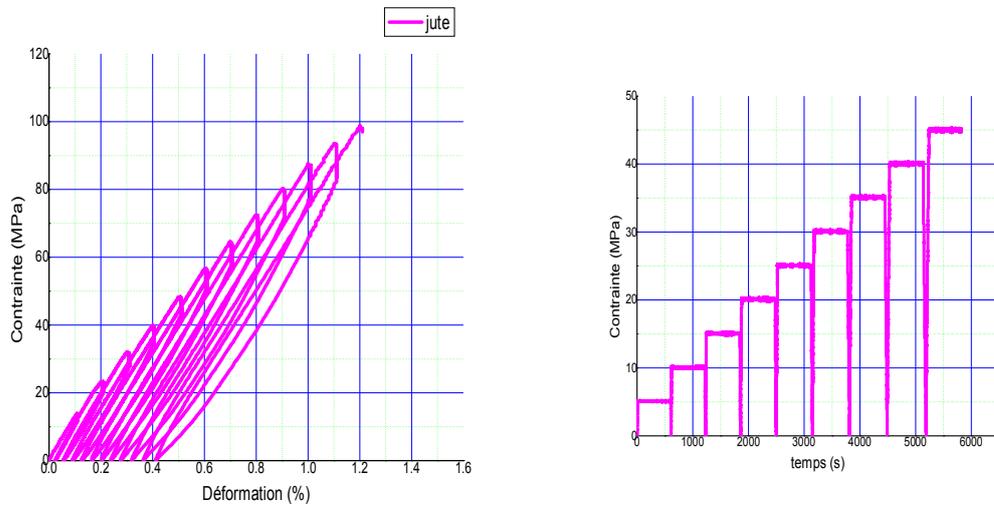
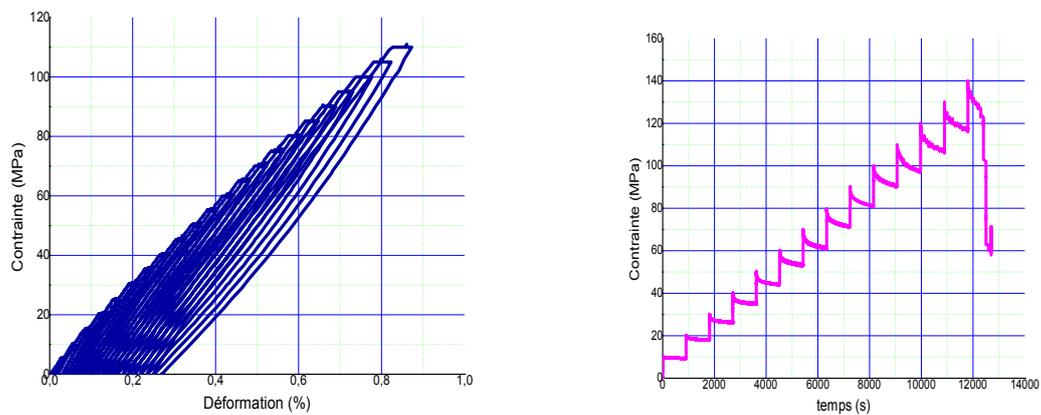


Figure 3.29: Courbe de l'essai de la fatigue 'jute/époxy'



Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Figure 3.30 : Courbe de l'essai de la fatigue 'lin/ époxy'

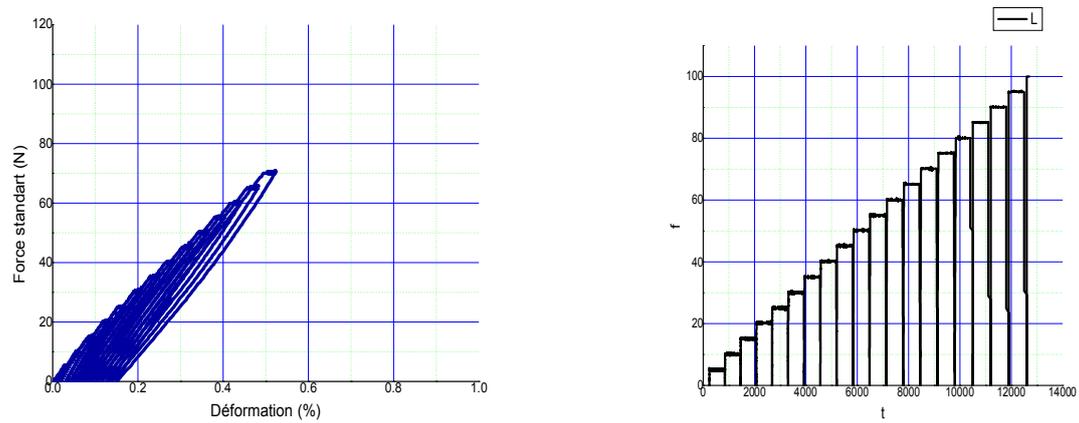


Figure 3.31 : Courbe de l'essai de la fatigue lin/sisal/époxy

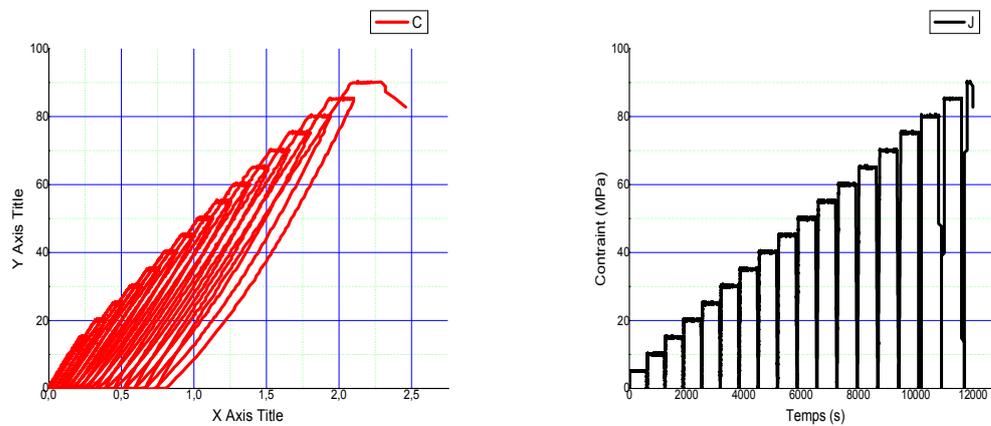


Figure 3.32 : Courbe de l'essai de la fatigue 'sisal/époxy'

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

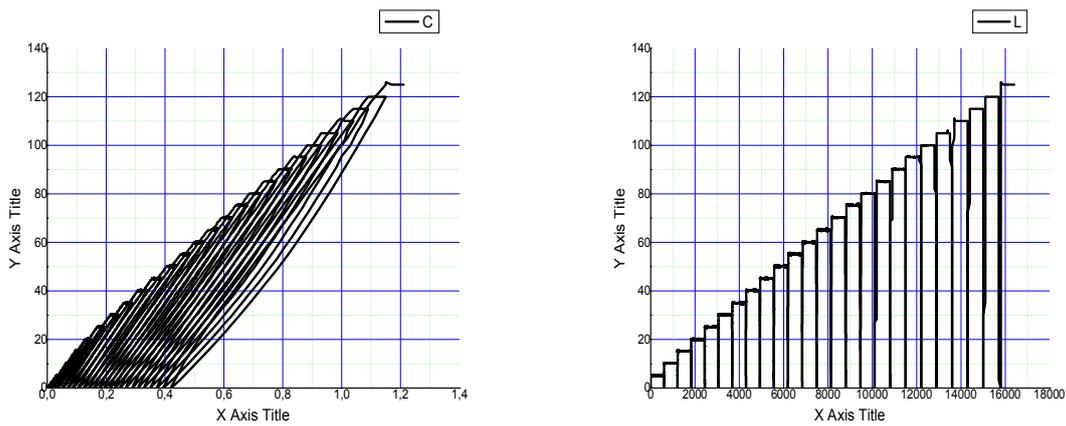


Figure 3. 33: Courbe de l'essai de la fatigue 'Lin/jute/sisal/époxy'.

Au cours d'un cycle de fatigue, on observe un phénomène d'hystérésis lié à retard de la réponse du matériau sur le chargement. Le trajet de chargement ne se confond pas avec celui de la décharge, formant ainsi une boucle d'hystérésis. L'aire enfermée dans la courbe contrainte-déformation d'un cycle n correspond à l'énergie dissipée.

D'après ces graphes, on note que le comportement des échantillons se diffère d'une variété à l'autre avec une diminution de la rigidité. Ainsi que le module de Young diminue avec l'augmentation de nombre de cycles.

On constate que le stratifié lin/ époxy représente le meilleur comportement et résiste mieux que les autres stratifiés. Malgré que la contrainte à la rupture est inférieures à celle obtenues par les essais statiques.

Chapitre III : Elaboration et caractérisation mécanique des stratifiés

Conclusion :

L'enjeu de ce travail était de proposer un outil de prédiction du comportement de composite à matrice thermodurcissable renforcée par des fibres naturelles afin d'optimiser les performances. L'époxyde est un thermodurcissable de grande diffusion couramment employé dans l'industrie et souvent utilisé comme matrice de matériaux composites. De plus, le lin, jute et le sisal sont des plantes dont la culture est possible et existe en abondance. Un époxy renforcé de ces fibres a donc été sélectionné comme support de cette étude.

Les caractéristiques en traction des composites montrent que l'incorporation des fibres naturels dans la résine époxy augmente le module d'Young, mais l'allongement à la rupture devient peu inférieur, ce qui permet un bon transfert des contraintes de la matrice aux fibres. Ces renforts végétaux se caractérisent des fibres synthétiques par leur forte aptitude à absorber l'humidité contenue dans leur environnement. Cette hydrophilie peut être nocive à la santé matière du composite si l'hygrométrie environnante n'est pas contrôlée. En vue de maîtriser la dégradation des matériaux, certaines études se sont portées sur la cinétique de l'absorption d'eau et le vieillissement.

Plusieurs facteurs peuvent influencer les propriétés des fibres qui peut influencer et différencier les caractéristiques des stratifiés. On peut notamment distinguer l'influence des conditions : i) culturelles de la plante pendant sa croissance (variété de semis, terrain, traitements phytosanitaires, engrais, maturité), ii) climatiques (saison, température, pluviométrie) et les étapes de l'élaboration (séchage, rouissage, teillage, filature, traitements). Par ailleurs, la géométrie des fibres testées a une influence sur les propriétés. Les paramètres extrinsèques, tels que les techniques d'extraction des fibres, les traitements chimiques mécaniques ou biologiques ainsi que les réglages des paramètres des procédés, les conditions d'essai (humidité, température vitesse de sollicitation), ou encore les méthodes d'analyses (déformation, section), sont autant de facteurs pouvant avoir une influence importante sur les résultats

L'obtention d'un composite à renforts végétaux nécessite une parfaite maîtrise du procédé de mise en forme (obtention et production), et comme pour les fibres synthétiques, une préparation chimique ou physique des fibres végétales est nécessaire afin de permettre l'adhésion fibres/matrice. En effet, sans précaution préalable l'utilisation de ces fibres en qualité de renforts risque de créer un composite dont les caractéristiques mécaniques sont inférieures aux attentes avec une stabilité dimensionnelle médiocre. Le développement d'un

composite à matrice polymère renforcé par des fibres végétales est complexe et de nombreuses contraintes doivent être prises en considération :

_ La nature hydrophile des groupes hydroxydes (OH) des fibres de lignocelluloses les rend incompatibles avec la plupart des thermodurcissables engendrant un phénomène d'agrégation réduisant l'efficacité du renforcement.

_ Le choix de la matrice est limité. En effet la température de mise en œuvre ne doit pas dépasser 200°C. Les fibres naturelles se dégradent vite à haute température.

Bibliographie

1. MIR. Abdallah, Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy, Thèse de doctorat. M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algérie.2010.
2. Khalafa. Amar, Etude de comportement mécanique d'un matériau composite stratifié. Mémoire de magister, M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algérie. 2010.
3. F. Dalmaso et J. Mézières, Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites, Institut Français du Pétrole. 1998.
4. CHOUAIB. Aribi, Etude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices). Mémoire de magister, université de M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algérie.
5. 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 Supérieure d'Art et Métiers, 2001.
6. A. AL-Maghribi, Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008
7. J.M. Berthelot. Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis, New York ,1999.
8. K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, "Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin" revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.
9. Y. Jamal, Sheikh-Ahmad. Machining of Polymer Composites, I SBN978-0-387-35539-9. 2009.
10. R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems," Polymer Engineering and Science, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
11. Guerra, D., Movva, S., Cai, Z-Q., Hioe, Y., Cabrera, E., Castro, J. M. and Lee, L. J., "Novel Methods of Incorporating Nanoparticles into Fiber Preforms," Proceedings of the 67th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, Chicago, Illinois, USA 2009.

12. O. Gallot-lavallee , Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension , thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 2006.
13. Irékti.amar, Synthèse des matériaux composites à matrice et charge minérales, mémoire de magister, Université de M'hamad Bouguera, Boumerdes, Algerie.
14. D.Platel, "impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimiques des coulis de ciment " , thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Physique et Chimie des Matériaux, 2004.
15. Hadadi. Manel, Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère. mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas, setif, Algerie.
16. A. R. Blythe, Electrical resistivity measurements of polymer materials, Poly Test,4 195-209, 1984.
17. Y. Li, Y. W. Mai, L. Ye, Sisal fibre an dits composites: a review of recent developments, Comp. Science. Tech. 60, 2037-2055, 2000.
18. P. V. Joeseeph, G. Mathew, K. Joeseeph, G. Groeninckx, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, Comp. Part A. 34, 275-290, (2003).
19. A. Y. Nenonene, 'Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage'', thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
20. F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse de doctorat, université Laval, 2003.
21. S. Zauscher and PE. Humphrey. Orienting lignocellulosic fibers and particles by means of a magnetic field. Wood and Fiber Science .35–46,1997.
22. Thuault A. Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse Normandie, 2011.
23. Pickering KL, Beckermann GW, Alam SN, Foreman NJ. Optimising industrial hemp fibre for composites. Composites: Part A, Vol. 38, pp. 461–468, 2007.
24. Charlet K, Jernot JP, Gomina M, Bréard J, Morvan C, Baley C. Influence of an Agatha flax fibre location in a stem on its mechanical, chemical and morphological properties, Composites Science and Technology. Vol. 69, N° 9, pp. 1399-1403, 2009.

25. Baley C, Morvan C, Grohens Y. Influence of the absorbed water on the tensile strength of flax fibers. *Macromol symp.* N° 222, pp. 195-201, 2005.
26. Bos HL, Donald AM. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres. *Journal of Materials Science.* pp. 221-274, 1999.
27. Sarén MP, Serimaa R. Determination of microfibril angle distribution by X-ray diffraction. *Wood Science and Technology.* Vol. 40, N°6, pp. 445-460, 2005.
28. Baley C. *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites.* Vol. 5. Techniques de l'ingénieur, 2008
29. Bos H. The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials. Thèse de doctorat, Eindhoven, 2004.
30. Wang HH, Drummond JG, Reath SM, Hunt K, Watson PA. An improved fibril angle measurement method for wood fibres. *Wood Science and Technology.* Vol.34, N° 6, pp. 493-503, 2001.
31. Thiery JP. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fines en microscopie électronique. *Vol. 6,* pp. 987.1967.
32. Jean-Louis Pariente, Pierre. Histoire des Matériaux ou de l'âge de pierre aux matières plastiques. *Progrès en Urologie,* 15. 863-864. 2005.
33. Hearle J, "The fine structure of fibers and crystalline polymers. III. Interpretation of the mechanical properties of fibers"; *Journal of Applied Polymer Science,* 7: p.1207-23
34. A, Davies P, and Baley C, (2011), "Environmental impact analysis of the production of flax fibres to be used as composite material reinforcement"; *Journal of biobased materials and bioenergy,* 5: p.1-13
35. Berthelot J.M. *Matériaux Composites. Comportement mécanique et analyse des structures.* 4eme édition 2005. Ed. Lavoisier. ISBN : 2-7430-0771-0.
36. A. Mir, Hachemane B, Bezzazi B. Eco conception & matériaux composites à base de renforts naturels. *International Symposium on Composites and Aircraft Materials: damage and fatigue diagnostics.* ACMA2007 May 22-24, 2007 Agadir, Morocco.
37. Mohanty A.K., Missa M., Drazil L.T., *Natural fibres, biopolymers and bio composites,* 2005.
38. Ademe/Alcimed - *Marché actuel des produits industriels et des biocarburants & évolutions prévisibles à échéances 2015 / 2030.*
39. Baley C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites;* 2002. vol. 33, pp. 939-948.
40. Charlet K, Jernot JP, Bréard J, Gomina M. Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres. *Industrial Crops and Products.* 2010. Vol. 32, Issue 3, pp. 220-224.

41. Bourmaud A, Baley C. Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling. *Polymer Degradation and Stability*,2009. Vol. 94, pp. 297-305.
42. Pickering KL, Beckermann GW, Alam SN, Foreman NJ. Optimising industrial hemp fibre for composites. *Composites* 2007. Vol. 38, pp. 461–468, 2007.
43. Nakra BC. Vibration control with viscoelastic material. *The Shock and Vibration Digest* 1984; 16:17-22.
44. Vaswani J, Asnani NT et Nakra BC. "Vibration and damping analysis of curved sandwich beams with a viscoelastic core". *Composites Structures* 1988, 10:231-245.
45. Moser K, Lumassegger M. "Increasing the damping of flexural vibrations of laminate FPC structures by incorporation of soft intermediate plies with minimum reduction of stiffness". *Composites Structures* 1988; 10:321-333.
46. Meunier M et Shenoï. Dynamic analysis of composites plates with damping modelled using high-order shear deformation theory. *Composites Structures* 2001; 54:367-374.
47. Yim J-H, Cho S-Y, Seo Y-J et. Jang B-Z. "A study on material damping of 0° laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer". *Composites structures* 2003; 60:367-374.
48. Adams RD. "Damping properties analysis of composites". *Engineering Materials Handbook*, Composites 1987, 206 ASM.
49. Berthelot J.-M et Sefrani Y. Damping analysis of orthotropic composites with interleaved viscoelastic layers. Experimental investigation and discussion. *Journal of Composite Materials*. 2006; 74:186-201.
50. Berthelot J.-M "Damping analysis of orthotropic composites with interleaved viscoelastic layers". *Modelling*. *Journal of composite materials*. 2006; 40:186-1889-1909.
51. Berthelot J.-M. "Dynamics of Composites Materials and Structures". 1994.
52. Craveur J-C. "Modélisation des structures Calcul par éléments finis". Masson 2ème édition.1996
53. Gérardin M. et Rixen D. "Théorie et vibration, application à la dynamique des structures". Masson 2ème édition.1996.
54. Rao D.K. "Vibration of short sandwich beams". *Journal of sound and vibration*.1996. 52:253-263.
55. Sadek E.A. "Dynamic optimisation of a sandwich beam". *Computers and Structures*; 19.605-615.1984
56. Ungar E.E. et Kerwin E.M. 1962"Loss factor of Vicoelastic systems in terms energy concepts". *Journal of Acoustical Society of America*. 34 954-957.

57. Ricards R. "Finite element analysis of vibration and damping of laminated composites".
Composites Structures, 1993; 24; 193-204.

Annexe A : PRINCIPE DE LA METHODE INFUSION SOUS VIDE.

