

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Mr. ALIOUANE Smail.

Mr. TERFANI Mohamed Farouk

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

Mise en forme d'une éco-structure composite

Devant le jury composé de :

KENNOUCHE Salim	MCB	UAMOB	Président
ARBAOUI Ahcan	MCB	UAMOB	Encadreur
BOUAMRA Youcef	MCB	UAMOB	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021



Remerciement

Tous d'abord, nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier et à exprimer nos profondes reconnaissances à notre promoteur **Mr arbaoui** qui nous a précieusement aidés et si judicieusement suivi durant la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous tenons aussi à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance à notre chef de département **M^{eme} mohamadi**, et tous nos professeurs de génie civil pour leur expérience enrichissante et pleine d'intérêts qu'ils nous ont fait partager durant ces 5 ans .*

*Nos remerciements vont aussi aux **Mr Aribi chouaib** qui nous a précieusement aidés*

Qui n'a jamais hésité de nous faire en profiter de leurs grandes expériences.

Nous remercions aussi les membres du jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici nos sincères reconnaissances.



Dédicace

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts rien que pour me voir réussir, et voilà l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

A mon père abd elhamid

A ma très chère mère saliha

A mon frère abd elrahim

A mes sœurs fatima zahra et aya bouchra

A tous mes amis qui m'ont soutenu

A mon très chère binôme Smail

Je dédie ce modeste travail

Farouk



Dédicace

*J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents
en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts rien que
pour me voir réussir, et voila l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse
et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui
je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

A mon père mohamed

A ma très chère mère djamila

A mes frères zakaria ,lamin

A ma sœur halla

A tous mes amis qui m'ont soutenu

A mon très chère binôme farouk

Je dédie ce modeste travail

smail

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1. Constituants des matériaux composites.	5
Figure I. 2. Représentation d'une monocouche [4]	6
Figure I. 3. Les constituants d'un stratifié	6
Figure I. 4. Représentation des plans d'orientation des monocouches	7
Figure I. 5. Exemple d'un stratifier symétrique	7
Figure I. 6. Les composantes d'un sandwich [5]	8
Figure I. 7. Eléments constituant d'un matériau [6]	8
Figure I. 8. Principaux matériaux de renfort [8].	9
Figure I. 9. Les unidirectionnels	9
Figure I. 10. les taffetas	10
Figure I. 11. le Serge	10
Figure I. 12. le Satin	10
Figure I. 13. Représentation des fibres de verre	11
Figure I. 14. Procédé d'étirage des fibres de verre	12
Figure I. 15. Représentation des fibres de Carbone	13
Figure I. 16. Représentation des fibres d'aramide	14
Figure I. 17. Les différentes familles de matrice	15
Figure I. 18. moulage par contact	22
Figure I. 19. Moulage par projection simultanée	23
Figure I. 20. Compression thermodurcissable SMC	23
Figure I. 21. Enroulement filamentaire (ou bobinage)	24

Chapitre II

Figure II. 1. Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales.	25
Figure II. 2. Structure des fibres de bois	27
Figure II. 3. Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale	28
Figure II. 4. carrosserie polymère a fibre de lin pour porche	30
Figure II. 5. Distribution des contraintes en flexion : (a) dans un panneau monolithique et (b) dans une structure sandwich.	34

Figure II. 6.Comparaison des performances mécaniques en flexion entre un panneau de référence et deux structures sandwiches d'épaisseurs différentes pour une même masse[21]	34
Figure II. 7.Les différents types d'âme : (a) mousse PVC, (b) nid d'abeilles en aramide et (c) balsa	35
Figure II. 8. Panneaux réalisés par collage à partir de divers profiles	38
Figure II. 9.Pliage des panneaux sandwiches	39

Chapitre III

Figure III. 1. fleur de lins.....	44
Figure III. 2. rideaux à œillets en lin	46
Figure III. 3. Dimensions de l'éprouvette haltère	52
Figure III. 4. Essai de traction sur la machine Zwick	52

Chapitre IV

Figure IV. 1.Les fibres utilisées dans notre materieu composite.....	53
Figure IV. 2..Fibres de lins dans NaoH (0.5% - 1%).....	54
Figure IV. 3. Traitement thermique l'étuvage	55
Figure IV. 4.préparation de la résine	56
Figure IV. 5.: Principe d'un essai de traction.....	59
Figure IV. 6.Courbe type de traction	59
Figure IV. 7.Signification des courbes de traction.....	60
Figure IV. 8. La machine de traction Zwick /Roell/Z050.....	61
Figure IV. 9. Test de traction des fibres végétales	61
Figure IV. 10.courbe de traction des fibres (0.5%).....	62
Figure IV. 11.courbe de traction des fibres (1%).....	63
Figure IV. 12.courbe de traction des fibres (témoin).....	64
Figure IV. 13. courbe de traction de résine	65
Figure IV. 14.courbe de traction des matériaux composites (0.5%).	67
Figure IV. 15.courbe de traction des matériaux composites (01%).	68
Figure IV. 16.courbe de traction des matériaux composites (témoin).	69

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1. Caractéristiques mécaniques des fibres de verre[9].....	12
Tableau I. 2. Principales différences entre matrices TP et TD	16
Tableau I. 3. Avantages et Inconvénients des résines TD.....	17
Tableau I. 4. Avantages et Inconvénients des résines époxydes	17
Tableau I. 5. Avantages et Inconvénients des Polyuréthanes et polyuréés	18
Tableau I. 6. Principales caractéristiques mécaniques des résines TD [1] ..	19

Chapitre II

Tableau II. 1. Composition chimique de fibres végétales, d'après Baley [56]	29
Tableau II. 2. Exemples de pièces en composite à renfort naturel utilisées par certains constructeurs automobiles[14].....	30

Chapitre III

Tableau III. 1. composition et propriétés des quelques fibres végétales [28]	47
Tableau III. 2. Propriétés mécaniques des résines	51

Chapitre IV

Tableau IV. 1. Caractéristique technique de résine epoxy.....	56
Tableau IV. 2. Propriétés de la matrice époxy utilisée	57
Tableau IV. 3. caractéristiques et contraintes a la rupture des fibres 0.5% en traction.....	62
Tableau IV. 4. caractéristiques et contraintes a la rupture des fibres 1% en traction.....	63
Tableau IV. 5. caractéristiques et contraintes a la rupture des fibres témoin en traction.....	64
Tableau IV. 6. caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction de la résine.....	66
Tableau IV. 7. caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction des matériaux composites (0.5%)	67

Tableau IV. 8.caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction des matérieaux composites (1%)	68
Tableau IV. 9.: caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction des matérieaux composites témoin	69

Table des matières

Chapitre I. généralités sur les matériaux composite

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition d'un matériau composite	3
I.3. Caractéristiques générales	3
I.4. Classification des matériaux composites	5
I.4.1. Forme des constituants.....	5
I.4.1.2. Composites à particules	5
I.4.2. Selon la nature des constituants	6
I.5. Les matériaux composites structuraux.....	6
I.6. Structure des composites.....	8
I.6.1. Le renfort (les fibres).....	8
I.6.2. Architecture des renforts	9
I.6.3. La matrice.....	14
I.6.3.1. Les thermodurcissables.....	16
I.6.3.2. Les thermoplastiques	19
I.6.4. Les charges et les additifs.....	20
I.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites	20
I.8. Domaine d'utilisation des matériaux composites	21
I.9.Méthode de moulage.....	21
I.9.1.Moulage au contact	22
I.9.2.Moulage par projection simultanée	22
I.9.3. Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound)	23
I.9.4. Enroulement filamentaire (ou bobinage)	23
I.10. Conclusion	24

Chapitre II.

II.1.Fibres naturelles	25
II.1.1. Définition de la fibre végétale	26

II.1.2. Classification des fibres végétales.....	26
II.1.3. Structure et morphologie des fibres lignocellulosiques	26
II.1.4. Structure et composition des fibres végétales.....	29
II.2. Application des composites a base des fibres végétal	29
II.2.1.En automobile.....	29
II.2.2. En construction	30
II.2.3. Autres applications	31
II.3. Historique des matériaux composites.....	31
II.4. La méthode de calcul des matériaux composites	31
II.5. Essai mécanique (essai de traction) [20]	32
II.6. Généralités sur les panneaux sandwich	33
II.6.1. Les peaux	35
II.6.2. L'âme.....	35
II.7. Historique sur les panneaux sandwich.....	36
II.8. Le rôle des constituants des panneaux sandwich	38
II.9. Les techniques d'assemblage des panneaux sandwich [35]	38
II.9.1. Le collage de peau sur l'âme	38
II.9.2. Technique de pliage	39
II.10.Domains d'application des structures sandwiches.....	39

Chapitre III. Caractérisation mécanique et physique des fibres de lin et de la résine

III.1.Définition de lins	41
III.2.La culture du lin	41
III.3.Le marché et les quantités produites.....	42
III.4. De la fibre lin au textile de lin	44
III.4.1.La plante de lin.....	44
III.4.2.Le rouissage	44
III.4.3.Le teillage	44
III.4.4.Le peignage et la filature	45
III.5.L'utilisation de lin	45

III5.1. En habillement.....	45
III5.2.En textile d'ameublement.....	45
III5.3.En tissus techniques	46
III5.4.En matériaux composites	46
III6.Caractiristiques physique des fibres de lins	47
III6.1. La masse volumique et la densité	47
III6.2.Exemple.....	48
III7. Caractérisations mécaniques des matrices	51

Chapitre IV. Étude expérimentale et résultats

IV.1.Introduction	53
IV.2. Matériaux utilisés	53
IV.2.1. Fibres utilisées pour la fabrication des échantillons.....	53
IV.2.2.traitement des fibres par NaOH	54
IV.2.3.Matrice utilisé	55
IV.2.4.preparation de la matrice.....	55
IV.3.Préparation des éprouvettes.....	57
IV.4: Essai de traction	58
IV.4.1.Objectif.....	58
IV.4.2.Introduction.....	58
IV.4.3. La machine de traction.....	60
IV.4.4.Essais de traction sur les fibres.....	61
IV.4.4.1.courbe de comportement en traction des fibres (0.5%)	62
IV.4.4.2.courbe de comportement en traction des fibres (1%)	63
IV.4.4.3.courbe de comportement en traction des fibres (témoin)	64
IV.4.5.Essais de traction sur la matrice.....	65
IV.4.5.1.a courbe de comportement en traction de la matrice.....	65
IV.4.6.Essais de traction sur les matériaux composite.....	66
IV.4.6.1.courbe de comportement en traction des matériauxx composites (0.5%)	67

IV.4.6.2.courbe de comportement en traction des matériaux composites (01%)	68
IV.4.6.3.courbe de comportement en traction des matériaux composites (témoin)	69

INTRODUCTION

Introduction :

Un projet ambitieux que de remplacer les différents composants des matériaux composites à savoir les renforts, la matrice polymère et additifs par des matériaux d'origine renouvelable.

L'après pétrole se rapproche et la substitution à ces produits dérivés est un objectif qui commence à se matérialiser dans beaucoup de domaines.

Les effets induits par le réchauffement climatique qui est une incidence directe de la hausse de la consommation de l'énergie d'origine polluante a incité les laboratoires de recherche du moins à diminuer à moyen terme l'incidence polluante due à la consommation des produits dérivés du pétrole et à trouver à long terme des solutions durable avec des matériaux propres respectant l'environnement.

Les études sur les " biocomposites" sont là avec des résultats probants et se consolident de d'année en année [36].

Les fibres naturelles sont introduites dans des matrices de synthèse, ce qui diminue leur durée de vie et efficacité. L'utilisation de produits chimiques tel NaOH pour augmenter leur résistance à la traction sont des problèmes qu'il faut résoudre pour atteindre un emploi de matériaux et produits durables appréciables. Les résines de synthèse et les fibres naturelles sont incompatibles et pour remédier à ce problème, il serait intéressant de substituer un pourcentage en volume de la résine de synthèse par des fibres naturelles comme renforts qui sont à moindre coût.

A partir de 1930 [37] et durant la décennie qui suivit les matériaux composites renforcés par de fibres ont connu un développement soutenu.

L'utilisation des résines époxydes dans la composition des matériaux composites à haute performance a pris un essor considérable vu leurs qualités intrinsèques tel que le retrait relativement bas par rapport aux polyesters. Une résistance chimique et mécanique ainsi qu'une adhérence appréciable.

Ces matériaux composites à matrice organique sont présents dans de nombreux secteurs industriels tel que le transport, électronique, bâtiment, sport et loisirs.

Leur croissance rapide et régulière due à la diversité de leur propriété et de leur procédé de transformation , ces matériaux apportent de nombreux avantages fonctionnels tels que la légèreté , la résistance mécanique et chimique , la liberté de forme et un entretien réduit.

Un développement dû à la diversité et à l'innovation des systèmes de renforts qui présentent une gamme de propriétés de plus en plus étendues.

Les fibres naturelles telles que le lin, le coton, le chanvre ou le sisal sont de plus en plus utilisés comme fibres de renfort dans les composites. Le secteur automobile est le premier

à utiliser à grande échelle les composites à renforts naturels. Aux U.S.A la Chevrolet Impala est équipé dans sa plage arrière d'un composite à 50% renforcé par des fibres de lin [38]. Les constructeurs Français recourent également aux fibres naturelles dans la conception et production d'éléments et parements de voitures tels que la tablette arrière de la Mégane ou les panneaux de portes de la Xantia . Une utilisation accrue aussi en Allemagne des composites à fibres naturelles [39] dans le domaine automobiles à tel point que le volume a augmenté de 100% en six ans . Le composite est obtenu avec des mats de fibres naturelles tel que les fibres de lin , chanvre ou jute et un thermoformage de la matrice à base de polyuréthane ou résines phénoliques.

Les fibres végétales pourraient constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison notamment de leur légèreté et leur faible impact environnemental [40] . Les fibres de lin ou de chanvre sont , avec leur densité proche de $1,5 \text{ g/cm}^3$ plus légères d'environ 40% que les fibres de verre ($2,5 \text{ g/cm}^3$). Elles présentent les propriétés mécaniques pouvant atteindre celles du verre en terme de résistance à la traction et résilience et nécessite 80% moins d'énergie à leur fabrication .

CHAPITRE I :

Généralités sur les

matériaux

composites

I.1. Introduction

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [1].

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes.

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés [1].

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. [2]

I.2. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles avec une forte capacité d'adhésion. Le nouveau matériau ainsi élaboré possède des performances supérieures à celles des éléments pris séparément. A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des additifs qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau.

I.3. 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.

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 :

- 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

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 :

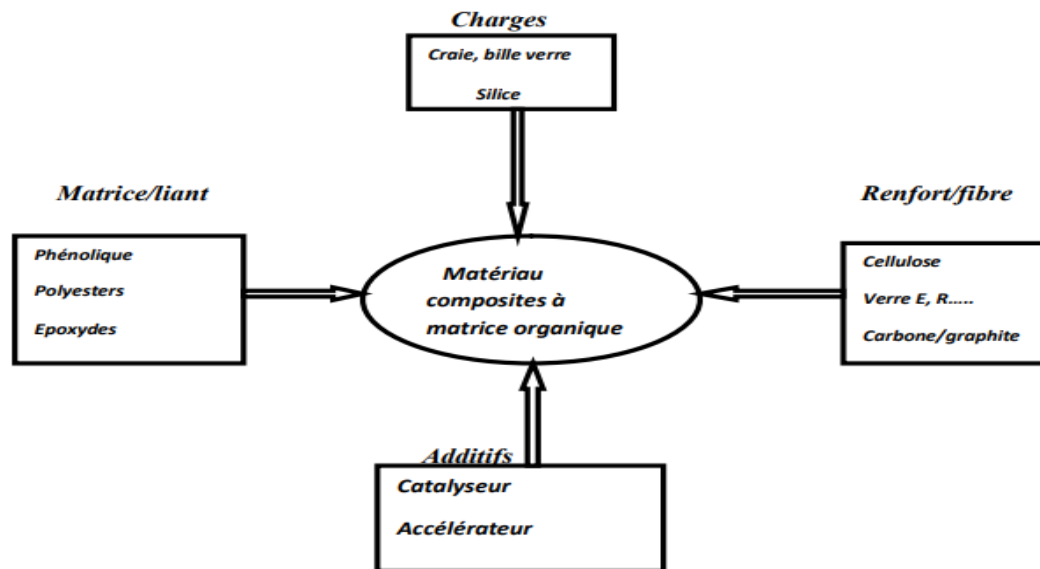


Figure I. 1. Constituants des matériaux composites.

I.4. Classification des matériaux composites

I.4.1. 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

1.4.1.1. 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

1.4.1.2. 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.

I.4.2. 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 renforts 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.

I.5. Les matériaux composites structuraux

a) Monocouches

Les 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.

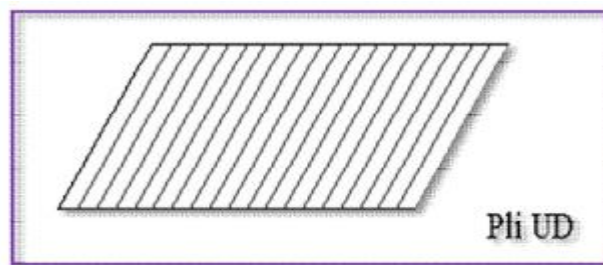


Figure I. 2.Représentation d'une monocouche [4]

b) 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. [4]

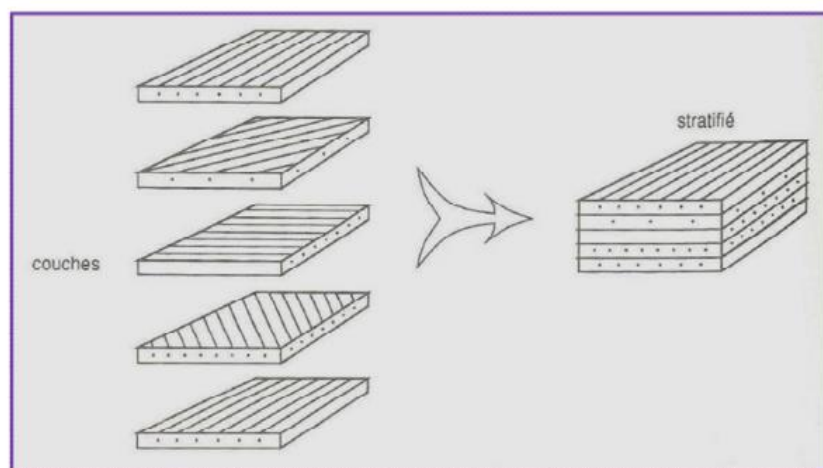


Figure I. 3.Les constituants d'un stratifié

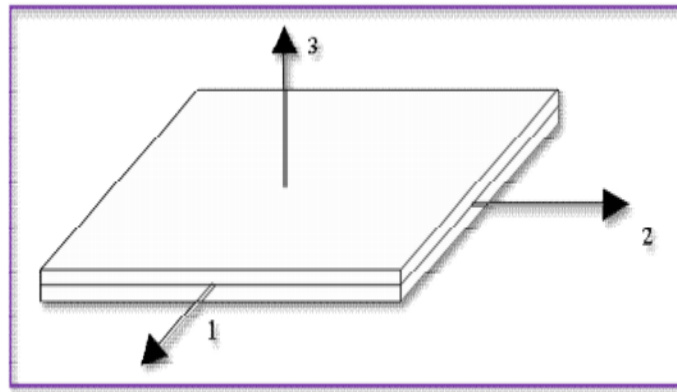


Figure I. 4. Représentation des plans d'orientation des monocouches

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec 4 couches dans les directions 0° , -45° , 90° et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

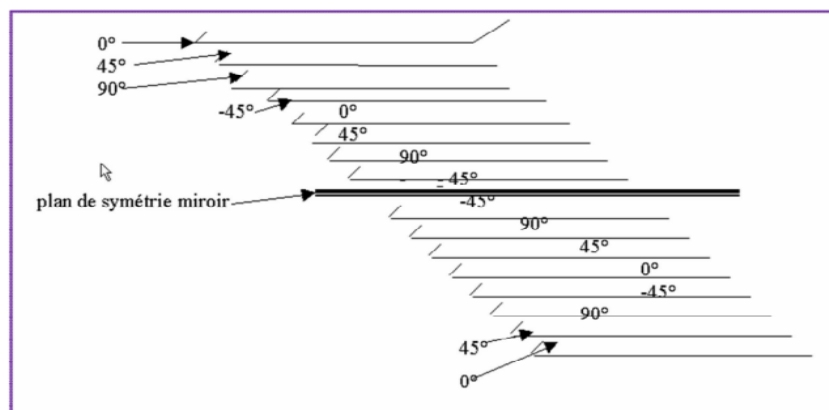


Figure I. 5. Exemple d'un stratifier symétrique

On pourra avoir des stratifiés de type :

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

c) Sandwichs

C'est un matériau composé 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.

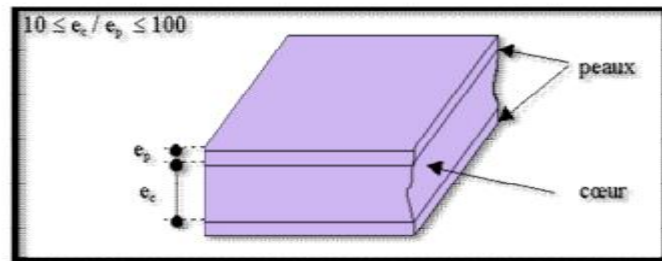


Figure I. 6. Les composantes d'un sandwich [5]

I.6. Structure des composites

Un matériau composite est composé d'une matrice et un renfort généralement des fibres. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde...etc.) et dont le but est d'améliorer ces caractéristiques tout en diminuant le coût de production.

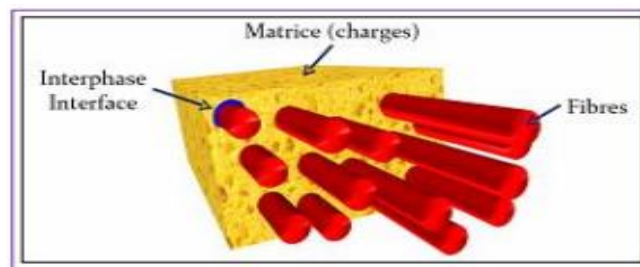


Figure I. 7. Eléments constituant d'un matériau [6]

I.6.1. Le renfort (les fibres)

Une fibre est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive. Sous la forme d'un filament fin, les propriétés d'un matériau sont beaucoup plus proches des valeurs théoriquement possibles que tout autre forme de matière, surtout en résistance de la rupture. En effet, la résistance à la rupture d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque mais dépend des défauts présents à la surface ou dans le volume du matériau, qui engendrent des concentrations de contrainte.

Les fibres de renforcement des matériaux composites modernes ont deux origines :

- **Minérale** : Fibres de verre, Fibres de carbone, Fibres de bore, Fibres céramiques (alumine, carbure de silicium)
- **Organique** : fibre d'aramide [7]

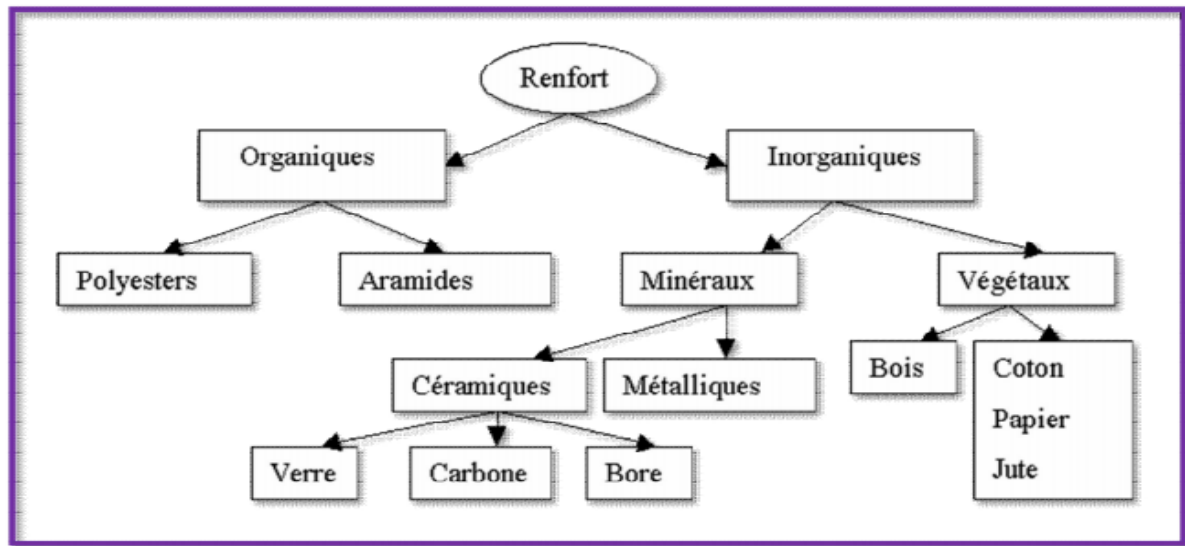


Figure I. 8. Principaux matériaux de renfort[8].

I.6.2. Architecture des renforts [9].

Il existe différentes géométries et textures de renforts.

❖ Les unidirectionnels (UD)

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

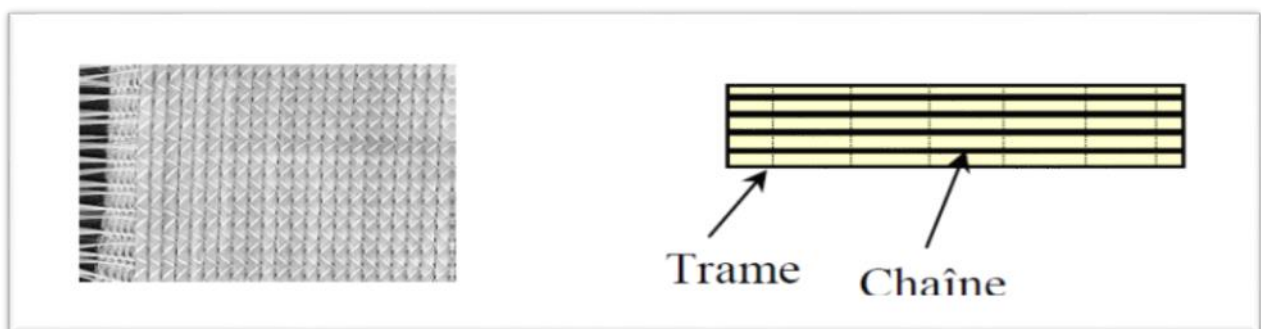


Figure I. 9. Les unidirectionnels

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

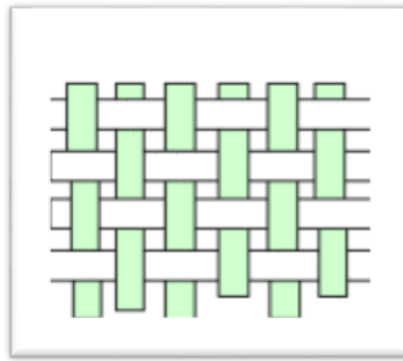


Figure I. 10.. les taffetas

- ❖ **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-contre, un sergé 2/2.

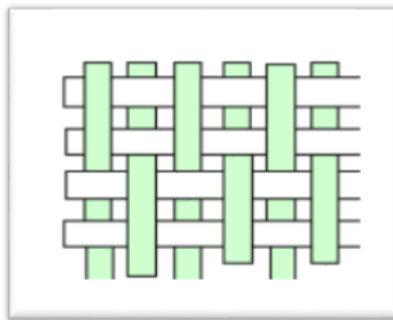


Figure I. 11. le Serge

- ❖ **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.

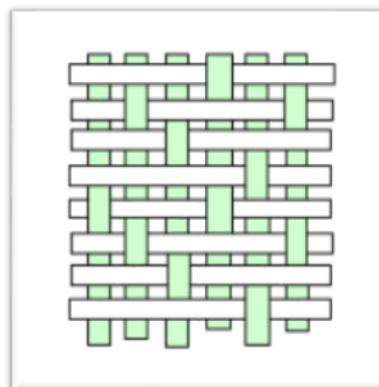


Figure I. 12. le Satin

a) Les Fibres de verre

Elle constitue actuellement le renfort le plus utilisé dans la réalisation des composites essentiel des composites. Composée essentiellement de silice associée à divers oxydes (alumine, alcalins, alcalineux-terreux), le verre textile est obtenu par fusion directe du mélange des matières premières à travers une filière en platine, suivie d'un étirage

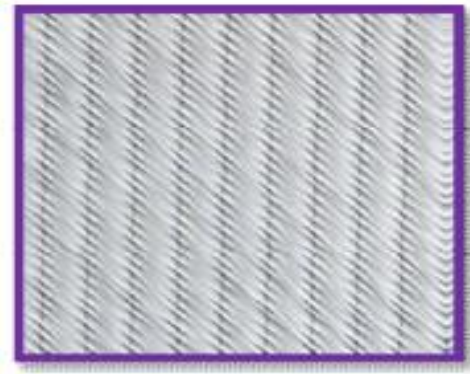


Figure I. 13. Représentation des fibres de verre

On distingue trois principaux types de fibres : [9]

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Le verre E, le plus employé, constitue l'essentiel des applications des composites de grande diffusion.

Le verre textile est disponible sous des présentations très variées :

- Fibres broyées
- Fibres coupées
- Fibres continues (roving, stratifils)
- Mats (de fibres coupées ou continues)
- Tissus (croisés, unidirectionnels).

➤ **Caractéristiques distinctives**

- Excellente adhérence, grâce aux ensimages appropriés, à la plupart des matrices organiques
- Bonnes propriétés diélectriques
- Rapport caractéristiques mécaniques/prix très intéressant

➤ Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre

Tableau I. 1. Caractéristiques mécaniques des fibres de verre[9]

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module d'Young (Gpa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4	5.3	5.3

➤ Fabrication des fibres de verre

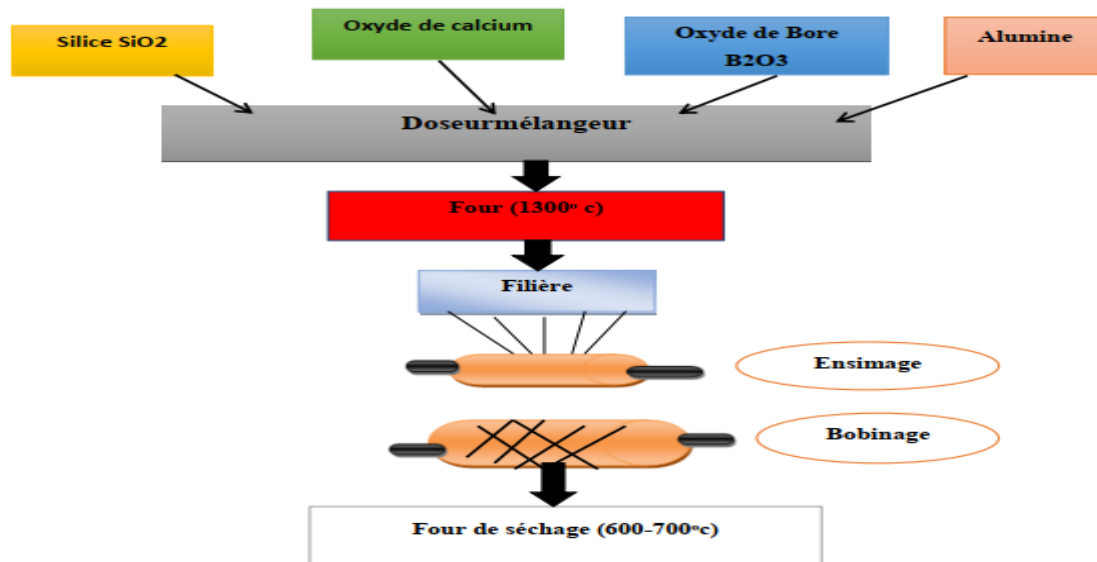


Figure I. 14. Procédé d'étirage des fibres de verre

b) Les Fibres de carbone

L'essentiel de la production des fibres de carbone est obtenu à partir d'une fibre « précurseur » Polyacrylonitrile (PAN). En jouant sur les paramètres de fabrication et, en particulier, sur les températures de mise en œuvre (carbonisation [1.100°C] ou graphitisation [2.500°C]), on obtient deux types de fibres.



Figure I. 15. Représentation des fibres de Carbone

- **Fibres haute résistance (HR)** : pour une combustion de 1000 à 1500 °C, (2.500 à 3.000 MPa)
- **Fibres haut module (HM)** : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C, (400.000 MPa)

Les fibres de carbone sont disponibles sous diverses formes :

- Mèches regroupant de 3.000 à 12.000 filaments
- Fibres coupées de quelques millimètres de longueurs
- Rubans et tissus unis ou multidirectionnels.

➤ **Caractéristiques distinctives**

- Les fibres de carbone se distinguent par des caractéristiques spécifiques élevées.
- Les fibres HM, en particulier, ont un module spécifique 70 fois supérieur à ceux des alliages d'aluminium

Elles présentent également un coefficient de dilatation très faible permettant une grande stabilité dimensionnelle des structures et une conductibilité thermique élevée.

Les principaux inconvénients sont la résistance limitée aux chocs et les différences du potentiel engendré au contact des métaux peuvent favoriser des corrosions de type galvaniques

c) **Les Fibres d'aramide**

Les fibres d'aramide sont obtenues par filage de polyamides aromatiques du type polytéraphtalate de p. phényllène diamine.

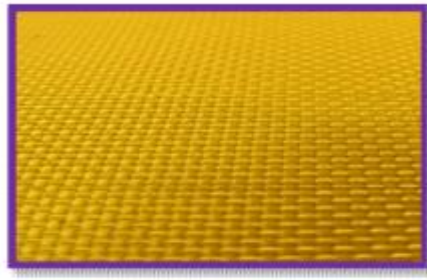


Figure I. 16. Représentation des fibres d'aramide

Selon le procédé de fabrication, on distingue deux types de fibres :

- Les fibres bas module : $E = 70\,000$ MPa, utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- Les fibres hauts module : $E = 130\,000$ MPa, employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

Elles sont disponibles commercialement sous forme de :

- Mèches
- Rubans et tissus divers.

➤ **Caractéristiques distinctives**

Ces fibres se caractérisent par une très grande résistance en traction spécifique. En contrepartie, leur comportement en compression est faible et leur adhérence médiocre avec certains matrices (thermoplastiques en particulier).

d) Les Fibres de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène. [10]

e) Les Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée. [10]

f) Les Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

I.6.3. La matrice

Les matrices ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du

matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumiques faibles. Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Une nouvelle classe de résines, ayant les propriétés des deux précédentes familles, a vu le jour, il s'agit des thermostables. Les résines bismaléimides (classe 200°C) et les résines polyamides (classe 300°C) utilisées dans les industries aérospatiales en font partie.

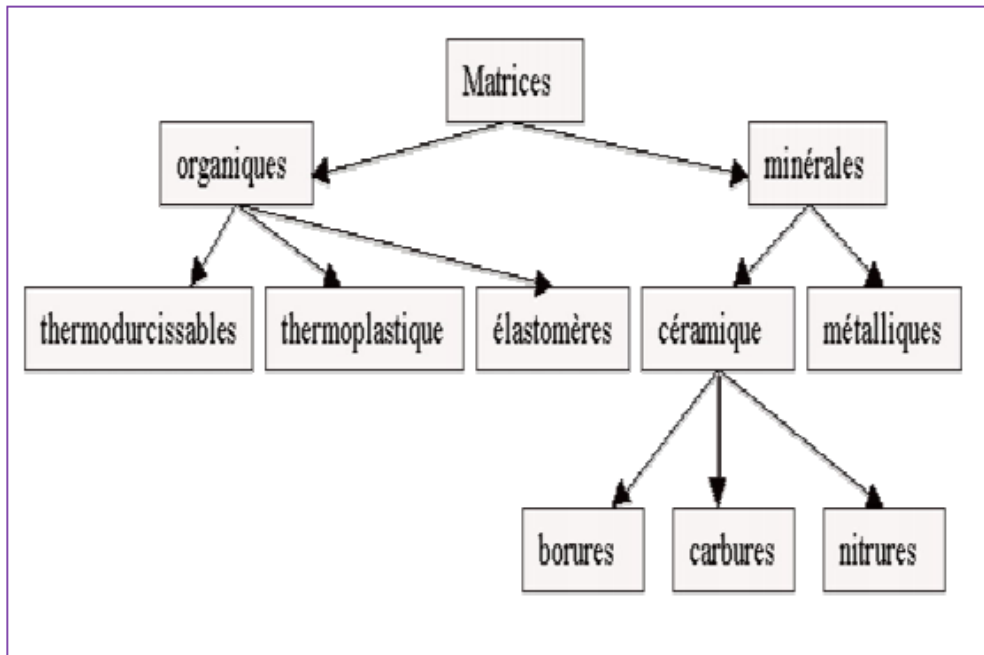


Figure I. 17. Les différentes familles de matrice

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices

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

Tableau I. 2. Principales différences entre matrices TP et TD

<i>Matrices</i>	<i>Thermoplastiques TP</i>	<i>Thermodurcissables TD</i>
<i>Etat de base</i>	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
<i>Stockage</i>	illimité	réduit
<i>Mouillabilité renforts</i>	difficile	aisée
<i>Moulage</i>	chauffage + refroidissement	chauffage continu
<i>Cycle</i>	court	long
<i>Tenue au choc</i>	assez bonne	limitée
<i>Tenue thermique</i>	réduite	bonne
<i>Chutes et déchets</i>	recyclables	perdus ou recyclés en charges
<i>Conditions de travail</i>	propreté	émanation pour "méthode humide"

I.6.3.1. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques. On retrouve dans cette famille les polyesters insaturés (vinyle ester, les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes, les furaniques, etc.).

• **Polyesters insaturés** : C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique

Il existe différents types de résines :

- Ortho phtalique : la plus courante
- Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Tableau I. 3. Avantages et Inconvénients des résines TD

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Bonne accroche sur fibres de verre	Inflammabilité (sauf résines chlorées)
Translucidité	Tenue vapeur et eau bouillante
Bonne résistance chimique	Retrait important (6 à 15 %)
Mise en œuvre facile	Durée de conservation en pot limitée
Tenue en température (> 150 °C)	Emission de styrène
Prix réduit	

• **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

• **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

• **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP.

On distingue deux classes de résines en fonction :

- Du durcissement à chaud ou à froid
- De la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200)

Tableau I. 4. Avantages et Inconvénients des résines époxydes

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue	Prix élevé
Faible retrait (1 à 2 %)	Sensibilité à l'humidité et aux UV
Excellente adhérence sur fibres	Vieillessement sous température
Auto-extinguibilité	Sensibilité aux chocs
Mise en oeuvre facile, sans solvant	Temps de polymérisation

• **Polyuréthannes et polyurées** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :

- Polyols + polyisocyanates = polyuréthannes
- Polyéthers + polyamines = polyurées

Tableau I. 5. Avantages et Inconvénients des Polyuréthannes et polyurées

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Facilité de moulage in situ	Résistance mécanique réduite
Tenue chimique	Combustibilité
Vieillissement	Coloration en masse difficile : foncée

- **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures ($> 250\text{ °C}$). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre

Tableau I. 6. Principales caractéristiques mécaniques des résines TD [1]

<i>Matrice TD</i>	<i>Masse volumique (kg.m⁻³)</i>	<i>Module d'élasticité longitudinal (MPa)</i>	<i>Module de cisaillement (MPa)</i>	<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>Contrainte de rupture (traction) MPa</i>	<i>Allongement à rupture %</i>	<i>Coefficient de dilatation thermique °C⁻¹</i>
	Mv	E	G	k	Cr	A	α
<i>Epoxyde</i>	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	$11 \cdot 10^{-5}$
<i>Phénolique</i>	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$
<i>Polyester</i>	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	$8 \cdot 10^{-5}$
<i>Polycarbonate</i>	1 200	2 400		0,35	60		$6 \cdot 10^{-5}$
<i>Vinylester</i>	1 150	3 300			75	4	$5 \cdot 10^{-5}$

<i>silicone</i>	1 100	2 200		0,5	35		
<i>Uréthane</i>	1 100	700 à 7 000			30	100	
<i>Polyimide</i>	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	$8 \cdot 10^{-5}$

I.6.3.2. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.). Leur recyclabilité et leur thermo réversibilité constituent des avantages très importants.

Il existe aussi des thermoplastiques à usage spécifique qui peuvent résister à des températures de l'ordre de 200°C.

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C, or POM) sont les suivantes :

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures
- Polytéréphtalate éthylnique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;

- Polysulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI)
- Polyéther-imide (PEI)
- Polyéther-sulfone (PES)
- Polyéther-éther-cétone (PEEK)

I.6.4. Les charges et les additifs

Les charges et les additifs : sont utilisés pour améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques et pour faciliter la mise en œuvre.

a. Charges renforçantes

- Des sphères pleines ou creuses généralement en verre, en carbone ou en époxydes.
- Non sphériques ou des écailles de dimension transversal 100 à 500 µm et d'épaisseur de 10 à 20µm. Généralement elles sont ajoutées à des résines dans des applications électriques ou électroniques..

b. Charges non renforçantes

- Permettent de diminuer le coût des résines tout en gardant les performances. Les principales charges sont en carbonates et silicates (les silices). On a aussi les charges ignifugeantes qui ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. Par exemples l'hydrate d'alumine, l'oxyde d'antimoine.

c. Charges conductrices et antistatiques

- Poudre ou paillettes métalliques en cuivre, fer, aluminium
- Des microbilles de verre métallisées (cuivre argent)
- Des particules de carbone (noir de carbone)
- Des filaments métalliques

d. Les additifs

Les additifs, se trouvent en faible quantité et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage
- Pigments et colorants
- Agents anti-retraits
- Agents anti-ultraviolets

I.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites

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

- 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.8. Domaine 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.

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.9.Méthode de moulage

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.

- Durcissement du système :

- soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
- soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

I.9.1.Moulage au contact

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

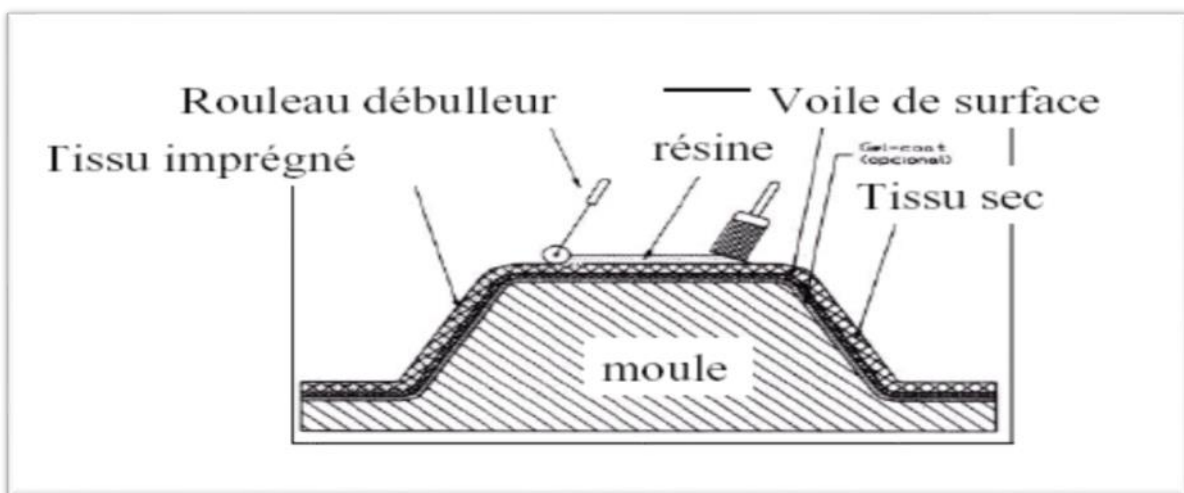


Figure I. 18. moulage par contact

I.9.2.Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et ébullée au rouleau cannelé. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.

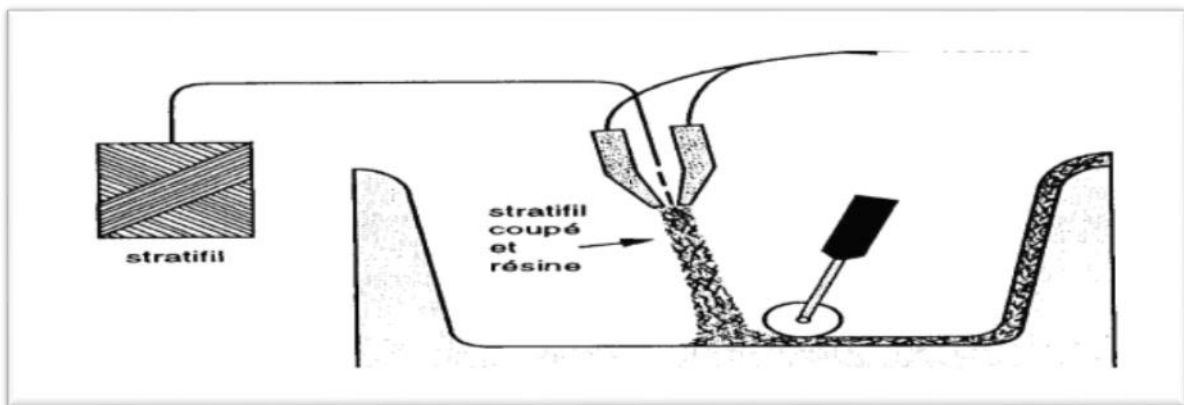


Figure I. 19. Moulage par projection simultanée

I.9.3. Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound)

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.

Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

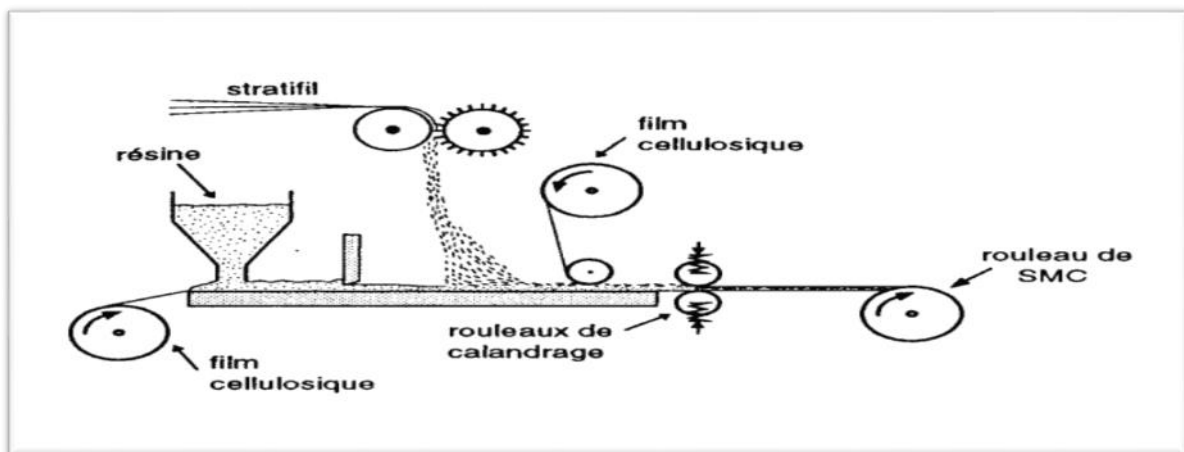


Figure I. 20. Compression thermodurcissable SMC

I.9.4. 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.

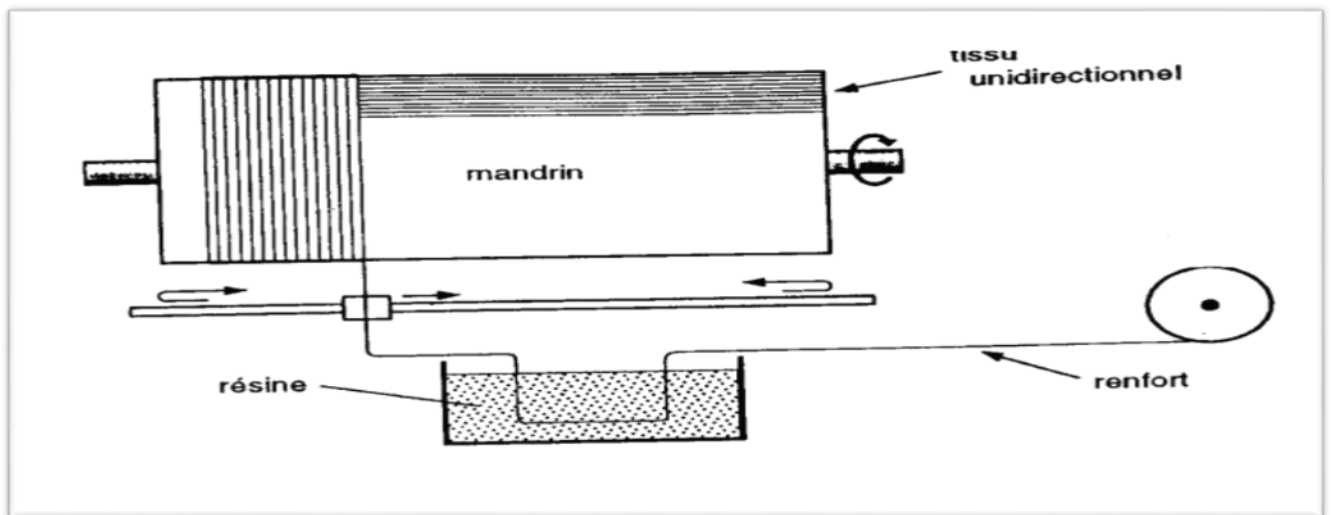


Figure I. 21. Enroulement filamentaire (ou bobinage).

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

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.

Chapitre II :

**Méthode de calcul et
comportement mécanique des
matériaux composites a base des
fibre végétales et panneaux
sandwich**

II.1. 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.

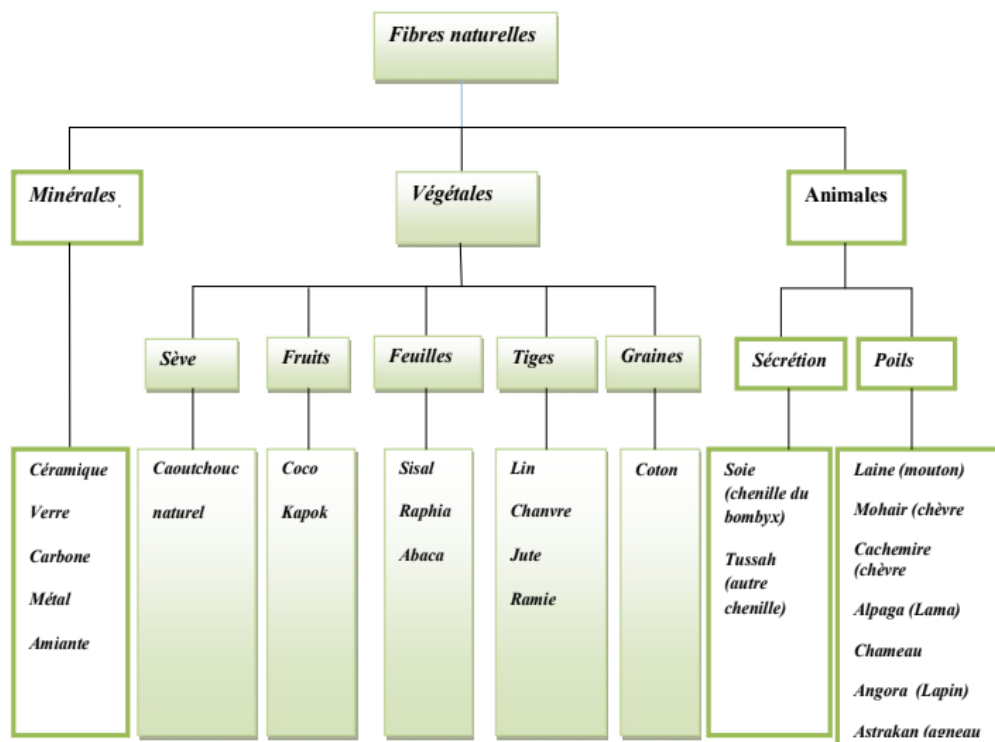


Figure II. 1. Différentes matières naturelles animales, végétales et minérales.

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.

II.1.1. 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 azotés, 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 [41,42]. 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.

II.1.2. 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) [41].
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériaux 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) [42].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libériennes, 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 [41].

II.1.3. 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 donne la composition

Une fibre présente les parties suivantes (cf. une vue en coupe **Figure II.2**) :

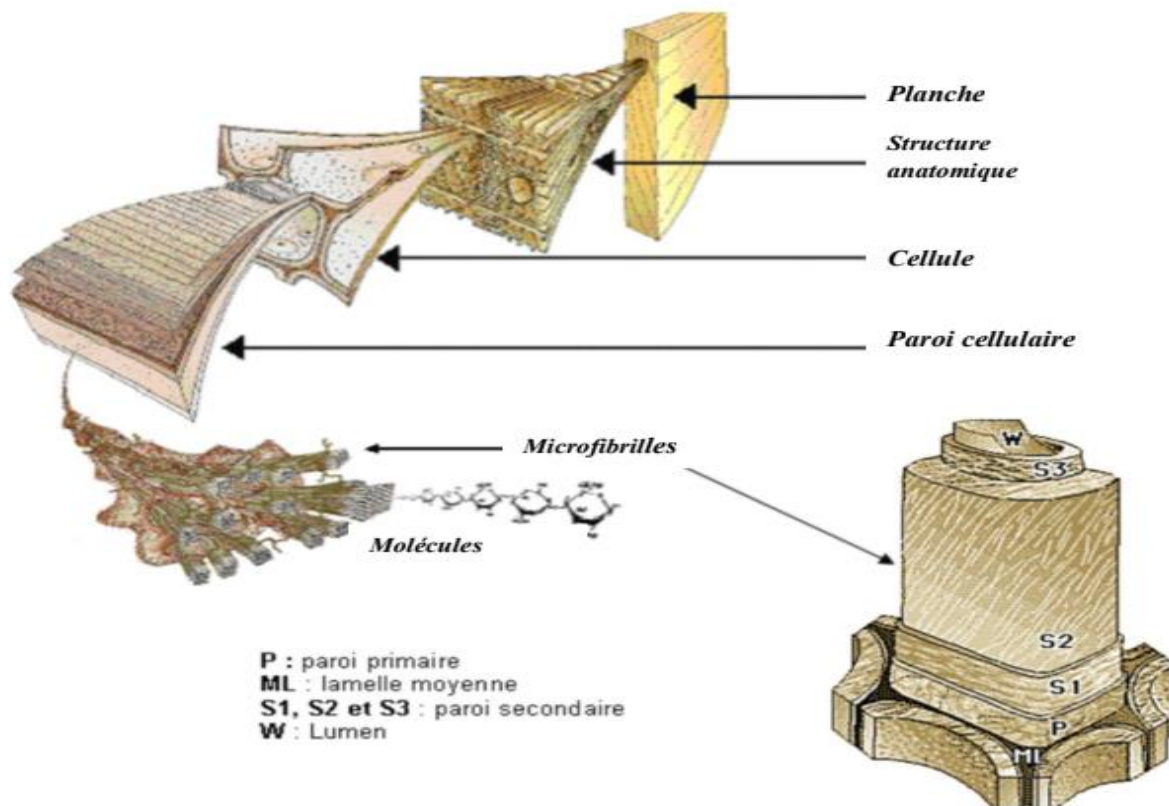


Figure II. 2. Structure des fibres de bois

- 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.
 - 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 [43] [44]). 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 [45] [46]. 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 [47] [48]. Plus l'angle d'inclinaison est faible et meilleures sont les caractéristiques mécaniques car les microfibrilles de cellulose tendent à être sollicitées suivant leur axe. À 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 **Figure II.3**. 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 [49] [50] [51] [52][53]

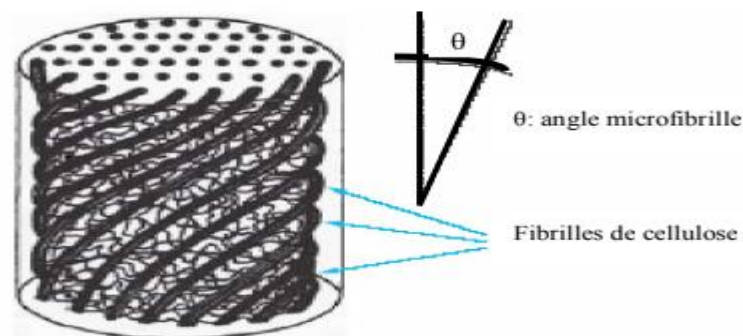


Figure II. 3.Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale

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 [54] [55]

II.1.4. Structure et composition des fibres végétales

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 II. 1. Composition chimique de fibres végétales, d'après Baley [56]

<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

II.2. Application des composites à base des fibres végétales

La diversité de propriétés des matériaux à fibres végétales promet une large gamme d'applications, notamment dans l'automobile et dans le domaine de la construction et d'autres secteurs de niches.

II.2.1. En automobile

Mercedes-Benz, utilise pour son modèle « Classe A », un composite renforcé par des fibres de lin et de sisal afin de réaliser les garnitures intérieures de portières, dossiers de sièges, support de moquette, habillage de coffre, etc. [11]

Les constructeurs français présentent également de belles avancées, comme la tablette arrière de la Mégane, les panneaux de portes de la 406, l'habillage du coffre de la Xantia...

La plupart de ces produits sont réalisés par thermoformage de mélanges intimes fibres de PP/mat de fibres naturelles (lin, chanvre, jute ou mixtes) ou par compression de résines phénoliques ou polyuréthane/mat de fibres naturelles [12]

Opel AG utilise des composites en polypropylène renforcé par fibres de lin pour les garnitures intérieures des portières de la modèle « Astra ».

Audi : Les panneaux intérieurs de la modèle A2 sont faits en polyuréthane renforcées par des fibres naturelles (lin, le sisal ou de chanvre) [13]



Figure II. 4. carrosserie polymère à fibre de lin pour porche

Tableau II. 2. Exemples de pièces en composite à renfort naturel utilisées par certains constructeurs automobiles[14]

Constructeur auto/modèle	Pièces	Fibre végétale utilisée
Brazilian trucks	Garniture, coussins de sièges	Jute, Coco
Mercedes Benz (Classe E)	Panneaux intérieurs de portes	Sisal/lin
Mercedes Benz (Classe C)	Panneaux de lunette arrière	Sisal, Coton
Mercedes Benz (Classe S)	Panneaux intérieurs de portes	Chanvre
Chevrolet Impala	Garniture de panneaux	Lin
Daimler Chrysler (MB Travego Coach)	Couverture du moteur et de la transmission	Sisal, Lin, Coco, Chanvre, Coton
General Motors (Opel Astra/Vectra)	Panneaux intérieurs de portes, dossier de sièges	Chanvre, Kénaf, Lin
Toyota	Tablette de coffre	Kénaf

II.2.2. En construction

Les composites à charges naturelles servent de profilés de portes et de fenêtres, planchés, clôtures, bardages, panneaux décoratifs etc. Les fibres végétales sont utilisées aussi comme renfort de matériaux d'infrastructure, notamment d'isolation phoniques, trottoirs, digues de produits en ciment [15].

Aux États-Unis, les composites thermoplastiques / bois ont récemment connu une croissance importante. On prévoit que la demande des composites à fibres naturelles se développera de 60% par an pour des produits de construction civile (bâtiment) [16].

II.2.3. Autres applications

La diversité de propriétés des matériaux à fibres végétales promet une large gamme d'applications dans différents secteurs tels que : l'emballage (palettes, boîtes...), le flaconnage, l'ameublement, la décoration, équipements de jeux publics, et d'autres secteurs de niches [17].

II.3. Historique des matériaux composites

Les matériaux composites ont une longue histoire. Leurs origines sont inconnues mais tous les écrits historiques contiennent des références à certaines formes des matériaux composites. Par exemple, la paille a été utilisée par les Israélites pour renforcer les briques, le contreplaqué a été utilisé par les anciens Egyptiens afin d'obtenir une meilleure résistance tant aux chargements mécaniques qu'à l'environnement, les épées et les armures médiévales ont été fabriquées par des couches des différents matériaux[18]. Aujourd'hui, les matériaux composites font partie courante de notre vie que cela soit des objets très excitants et à la mode comme la canne de golf et le kayak, ou beaucoup plus usuels tels que le contreplaqué et le béton. Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents à l'échelle macroscopique[18].

[19] Les composites utilisés pour leurs propriétés structurales se limitent à ceux qui contiennent des renforts réunis en une seule masse par une matrice. Typiquement, un matériau composite contient une phase discontinue de renfort plus rigide et plus résistante que la phase continue de la matrice.

Un composite est formé de deux constituants, un renfort plongé dans une matrice. Ces matériaux ont un poids léger comparé aux autres matériaux, on de très bonnes propriétés mécaniques, ne sont pas corrosifs. Récemment, ces matériaux sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, tels que de l'automobile, construction civile, aéronautique, etc.

II.4. La méthode de calcul des matériaux composites

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont complexes car directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

a) loi des mélanges

La loi des mélanges permet sous certaines conditions de déterminer certaines caractéristiques du composite en fonction de la fraction volumique du renfort. Par exemple si on prend :

- P_M : Propriétés de la matrice
- P_R : Propriétés du renfort
- P_C : Propriétés du composite
- V_C : Fraction volumique (%) du renfort

La propriété du composite est :

$$P_C = V_R P_R + (1-V_R) P_M$$

b) la densité du composite

À partir de la loi énoncée ci-dessus on peut calculer la densité moyenne du composite.

Si : ρ_M densité de la matrice et ρ_R densité du renfort, alors la densité du composite ρ_C est :

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M$$

c) Le module de Young du composite E_C , R_{ec} et R_{mc}

Lorsqu'on mélange deux matériaux au comportement élastique linéaire et de module de Young différent, le produit est encore élastique et linéaire.

Le calcul de module de Young est possible à partir de la loi des mélanges si la force est parallèle aux fibres. Dans ce cas sous l'effet d'une force F , la matrice, les fibres et le composite subissent une déformation unitaire identique, ce qui se traduit par :

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_R$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

- Pour le module de Young :

$$E_C = V_R E_R + (1-V_R) E_M$$

De la même manière on peut déterminer :

- La limite d'élasticité du composite

$$R_{ec} = V_R R_{eR} + (1-V_R) R_{eM}$$

- La résistance maximale à la traction du composite :

$$R_{mc} = V_R R_{mR} + (1-V_R) R_{mM}$$

Pour une force perpendiculaire au sens des fibres, les contraintes dans la matrice, dans les renforts et dans le composite sont identiques. Cela se traduit par :

$$\sigma_R = \sigma_M$$

II.5. Essai mécanique (essai de traction) [20]

Le principe de l'essai consiste à étirer une éprouvette le long de son axe principal à une vitesse constante à la température ambiante jusqu'à sa rupture ou jusqu'à ce que la contrainte

(charge) ou la déformation (allongement). La charge supportée par l'éprouvette et son allongement sont mesurés pendant l'essai.

Les éprouvettes sont découpées au niveau du laboratoire des matériaux polymériques multiphasiques (LMPMP) (UFA), et les essais de traction ont été effectués selon la norme ISO 527-1 sur une machine de la marque Zwick-Roell-1KN au niveau du laboratoire de l'université de boumerdes

Les propriétés en traction (module d'élasticité E , contrainte à la rupture σ_r , déformation à la rupture ϵ_r) sont évaluées à partir des courbes contrainte-déformation.

Le module d'élasticité s'exprime comme suit :

$$E = \sigma / \epsilon \text{ (N /m}^2\text{)}$$

E : Module d'élasticité

σ : Contrainte (N/m²)

ϵ : Allongement.

La contrainte à la rupture est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma_r = F/S \text{ (N /m}^2\text{)}$$

F : Charge de traction supportée par l'éprouvette (N)

S : Section initiale (m²)

L'allongement à la rupture est indiqué en pourcentage sous la forme suivante :

$$\epsilon_r = \Delta l / l_0 \text{ (\%)}$$

$\Delta l = l - l_0$: Déformation à la rupture

l_0 : Longueur initiale de l'éprouvette

l : Longueur finale de l'éprouvette.

II.6. Généralités sur les panneaux sandwich

Une structure sandwich représente une forme particulière de matériaux composites multicouches, distinguée par ses constituants et sa géométrie par rapport aux structures monolithiques et poutres en I. Le concept d'une structure sandwich est de relier d'une manière efficace des peaux rigides et résistantes en traction et en compression, par une âme légère et épaisse qui transmet l'effort. L'âme doit résister aux contraintes de cisaillement

générées par le mouvement de glissement des peaux sous charge et doit maintenir les peaux équidistantes.

Selon la théorie de la résistance des matériaux, cette adjonction permet d'optimiser les fonctions de chaque constituant de la structure et d'accroître la rigidité du stratifié à travers l'augmentation de son moment d'inertie. Par conséquent, la rigidité en flexion de toute la structure est significativement augmentée pour un accroissement faible de masse. Les **Figure II.5** et **Figure II.6** mettent en comparaison respectivement la distribution des contraintes et les performances mécaniques en flexion des structures sandwiches par rapport aux structures monolithiques. Cette comparaison met ainsi en relief l'intérêt de ces structures par rapport aux autres monocouches.

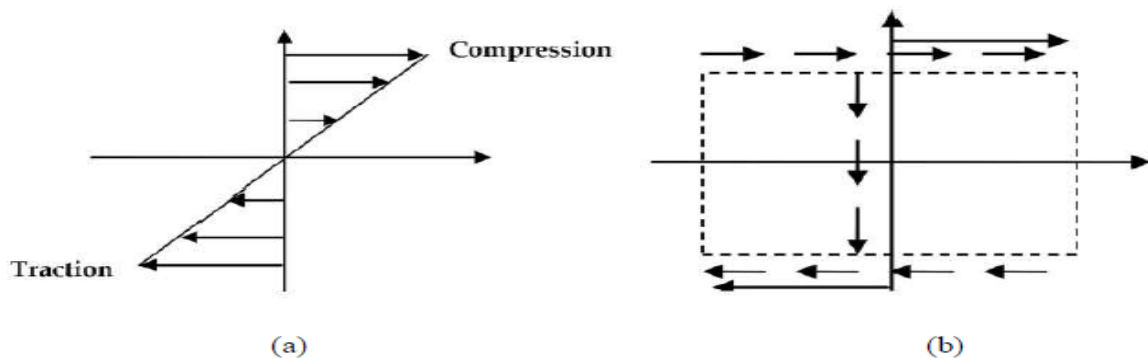


Figure II. 5. Distribution des contraintes en flexion : (a) dans un panneau monolithique et (b) dans une structure sandwich.

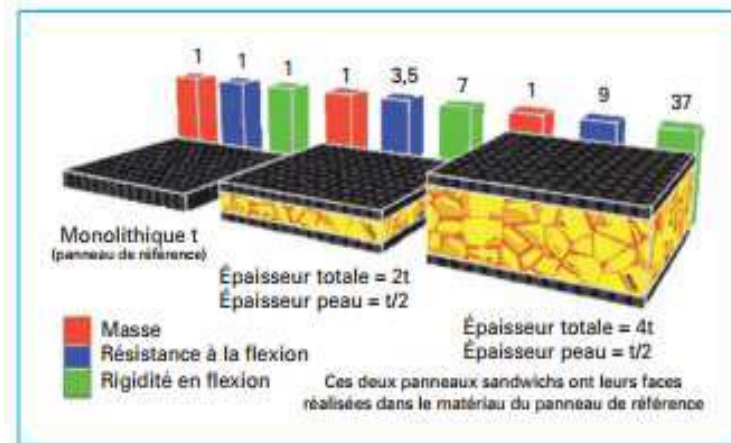


Figure II. 6. Comparaison des performances mécaniques en flexion entre un panneau de référence et deux structures sandwiches d'épaisseurs différentes pour une même masse[21]

Une des premières utilisations moderne remarquable de panneaux sandwichs date de la deuxième guerre mondiale avec la fabrication d'un avion militaire britannique, le Mosquito [22]. Ce recours à ce genre de structure vient suite à une pénurie des matériaux métalliques en

Angleterre pendant cette période. Les peaux ont été fabriquées en placage bois et l'âme en balsa, ce qui a amené légèreté et donc une vitesse plus élevée.

Au début, les structures en nid d'abeilles ont été développées pour servir d'âme aux panneaux sandwichs utilisés en aéronautique. Ensuite vers la fin des années cinquante et durant les années soixante, d'autres types d'âme en plastiques alvéolaires tels que le polystyrène et le polyuréthane ont été inventés pour pallier la corrosion des âmes en nid d'abeilles et ajouter d'autres qualités telles que l'isolation thermique et phonique, la résistance au feu, etc.

Aujourd'hui, les structures sandwichs sont devenues un concept très utile et flexible, utilisées dans des domaines assez variés et stratégiques, notamment l'aérospatiale le transport et la construction navale.

II.6.1. Les peaux

La rigidité équivalente en flexion d'une structure sandwich est gouvernée par les peaux, qui doivent résister à la traction et compression pour éviter la rupture. Les peaux sont de faibles épaisseurs par rapport à l'âme. Le choix adéquat de leur composition dépend essentiellement des performances souhaitées des structures sandwichs. Pour les structures portantes, les peaux sont généralement des feuilles métalliques (Aluminium, acier, etc.) ou des empilements de couches de renfort imprégnées de résines thermodurcissables ou thermoplastiques. Sinon pour des applications semi-structurelles, du bois ou contre-plaqué sont aussi utilisés pour la fabrication des peaux.

II.6.2. L'âme

L'incorporation d'une âme épaisse entre deux peaux accroît le moment d'inertie de toute la structure ainsi que sa rigidité équivalente au cisaillement pour un accroissement faible de la masse. Plusieurs types d'âme ont été développés : en nid d'abeilles, en mousse et en bois (**Figure II.7**).

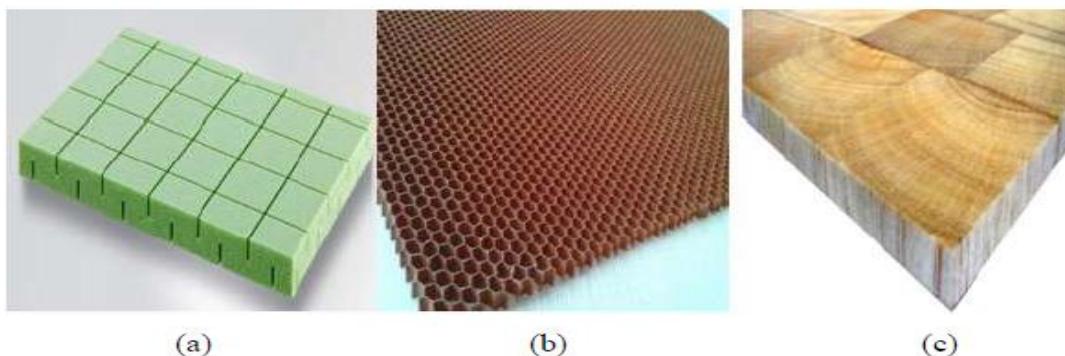


Figure II. 7. Les différents types d'âme : (a) mousse PVC, (b) nid d'abeilles en aramide et (c) balsa

Le choix d'un type d'âme par rapport à l'autre dépend à la fois des performances exigées et du procédé de mise en œuvre de toute la structure sandwich. L'âme en nid d'abeilles possède une structure hexagonale, triangulaire, etc. réalisée en divers matériaux (aluminium, papier carton ou matière plastique) et caractérisée par la taille de ses cellules. Elle présente une surface de collage très limitée avec les peaux. Pour cela, il est impérativement recommandé d'utiliser une résine ou colle à hautes performances tel que l'époxy qui favorise une bonne adhésion avec les peaux. Ce type d'âme ne peut être associé qu'avec un procédé de mise en œuvre par assemblage afin d'éviter le remplissage des alvéoles du nid d'abeilles.

Concernant les mousses, elles peuvent être organiques, naturelles, métalliques ou céramiques, à cellules ouvertes et/ou fermées. Leurs propriétés dépendent essentiellement des matières premières choisies et de leur densité.

II.7. Historique sur les panneaux sandwich

Les panneaux sandwichs composites sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique. Ces panneaux sont généralement constitués de deux couches externes (Énergie de déformation des peaux) minces en composites et un noyau composite de cisaillement constitué d'un matériau moins rigide que celui de deux Énergie de déformation des peaux. Les panneaux sandwichs sont d'une rigidité importante et d'un faible poids. La modélisation vibro-acoustique des panneaux sandwichs est étudiée dans un grand nombre de documents.

En 1953, Courant et al[23] ont proposé une expression de la densité modale pour une plaque isotrope. Ensuite, en 1962, Heckel[24] a exprimé le même paramètre pour une coque cylindrique. Six ans plus tard, Wilkinson[25] a proposé la première expression de la densité modale pour les panneaux sandwichs isotropes. Ensuite Erickson [26] a étudié l'effet des propriétés anisotropes du cœur dans la densité modale. L'auteur décrit l'énergie de déformation des peaux par le mouvement en flexion tandis que le cœur est décrit par un module de cisaillement équivalent qui est calculé comme la moyenne géométrique du module de cisaillement le long de deux directions x et y . La rigidité de flexion du cœur est négligée dans son modèle.

Renji et al[27] ont proposé un modèle de la densité modale des panneaux sandwichs orthotropes, le noyau est caractérisé par un cisaillement transversal équivalent et les termes d'inertie de rotation sont négligés. Les auteurs[25] [26] [27] Wilkinson et Erickson et Renji et al montrent que diverses hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour résoudre analytiquement le problème de la dispersion, pour trouver le nombre d'onde et l'amortissement équivalent de la plaque. Il est conclu dans une étude récente[28] que le problème de la dispersion générale des panneaux composites stratifiés plats ne possède pas une solution analytique.

Berthelot[29] a pris en considération la variation des propriétés physique le long de l'épaisseur du panneau en composites. Batoz et Dhatt[30] ont utilisé un système d'équations

d'équilibre dynamique décrit par un vecteur hybride composé par le champ de déplacements en rotation, ainsi avec les forces et les moments résultants du panneau. Les auteurs ont calculé explicitement l'inertie de rotation et les facteurs de correction de cisaillement. Les solutions ont été utilisées pour calculer la vitesse de groupe, la densité modale et le rendement de rayonnement.

En 2002, Ghinet et Atalla[28] ont proposé une relation de dispersion de sixième ordre pour les poutres sandwich orthotropes, en tenant compte de la force de rotation de l'inertie, de flexion et de cisaillement transversal du cœur. Pour la modélisation de la poutre sandwich, ils ont appliqué le principe d'Hamilton, où l'énergie de déformation de la poutre est définie comme la somme de l'énergie élastique due à la flexion pure du panneau, la flexion des peaux et le cisaillement transversal du cœur. Ils ont aussi montré que différentes hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour résoudre analytiquement le problème de la dispersion.

En 2006, Ghinet et Atalla[31] ont présenté une approche théorique pour modéliser les comportements vibro-acoustiques des panneaux sandwichs. Dans cette perspective, ils ont présenté deux modèles : le premier est celui du composite stratifié symétrique et le second est celui du panneau sandwich composite non symétrique. Dans les deux modèles, les auteurs utilisent un champ de déplacement discret pour chaque couche séparément. Ce champ est défini par le modèle Reissner-Mindlin qui conduit à une relation de dispersion de sixième ordre et il est ensuite modifié pour tenir compte de l'influence de rotation du cisaillement transversal dans le noyau. Les mêmes auteurs [31] Ghinet et Atalla ont développé un modèle du panneau sandwich qui permet une description correcte des comportements vibro-acoustiques sur toute la plage des fréquences auditifs. Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- L'épaisseur du cœur est supérieure à celle des peaux, l'énergie de déformation des peaux, l'énergie de déformation des peaux et le cœur sont supposés incompressibles le long de l'épaisseur
- Le noyau ne contribue que par les contraintes de cisaillement transversal, qui sont négligées dans la peau.

Ghinet et Atalla [28] ont aussi proposé une nouvelle modélisation vibro-acoustique des panneaux sandwichs en composites de dimensions finies et de propriétés orthotropes. Ce modèle est basé sur une relation de dispersion et est conçu pour des applications telles que la conception acoustique et l'optimisation, ainsi que les méthodes de caractérisation inverse pour évaluer les propriétés physiques du panneau. Le modèle est basé sur deux approches. La première concerne la modélisation des panneaux sandwichs épais en composites. Cette approche utilise un champ de déplacement discret pour chaque couche et permet de décrire les déplacements et les rotations de cisaillement. La seconde approche concerne la modélisation des structures stratifiées épaisses. Chaque couche est décrite par un champ de déplacement de Reissner-Mindlin. Notons que ce champ de déplacement est lié à des phénomènes physiques qui apparaissent en hautes fréquences, où la différence de rigidité entre la peau et le noyau permet de séparer le mouvement de flexion de la peau. Chaque couche est considérée comme

discrète et stratifiée (composite), tandis que les propriétés physiques sont liées à travers l'épaisseur de chaque couche, de sorte que la dimension du problème reste inchangée. Les solutions de la relation de dispersion sont utilisées pour calculer la vitesse du panneau, des densités modales et la perte par transmission. En outre, un type de modélisation d'un composite stratifié symétrique est présenté et utilisé pour valider et démontrer l'exactitude de la modélisation de ce type de sandwich.

Par conséquent, les solutions des panneaux stratifiés isotropes sont symboliquement mises au point et utilisées pour analyser les comportements vibro-acoustiques asymptotiques.

En 2009, Tongan et al [32] ont étudié la propriété intrinsèque d'isolation sonore du panneau sandwich indépendamment des effets des conditions d'installation externe, telles que les conditions aux limites encastrees ou simplement appuyées. Le panneau sandwich est alors censé être infiniment grand pour éliminer l'influence des conditions aux limites. Selon ces formulations, les auteurs ont décrit un nouveau modèle acoustique basé sur la théorie de poutre sandwich d'ordre supérieur et ils ont développé une optimisation de la conception acoustique et des propriétés mécaniques pour un poids minimal.

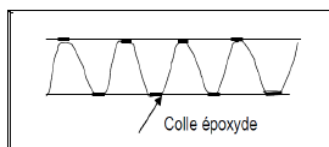
II.8. Le rôle des constituants des panneaux sandwich

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. [35]

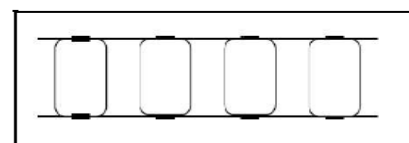
II.9. Les techniques d'assemblage des panneaux sandwich [35]

II.9.1. Le collage de peau sur l'âme

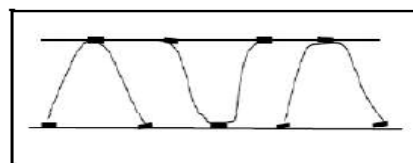
Pour que les structures sandwich jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme – peaux de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé selon la (**Figure II.8**) par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.



(a) : collage de tôle ondulée ou raidisseurs ω sur tôle



(b) : panneaux avec tubes carrés



(c) : panneaux avec ω inverses

Figure II. 8. Panneaux réalisés par collage à partir de divers profils

II.9.2. Technique de pliage

Après mise en œuvre les panneaux sandwichs peuvent être formés par pliage comme il est indiqué sur la (**Figure II.9**).

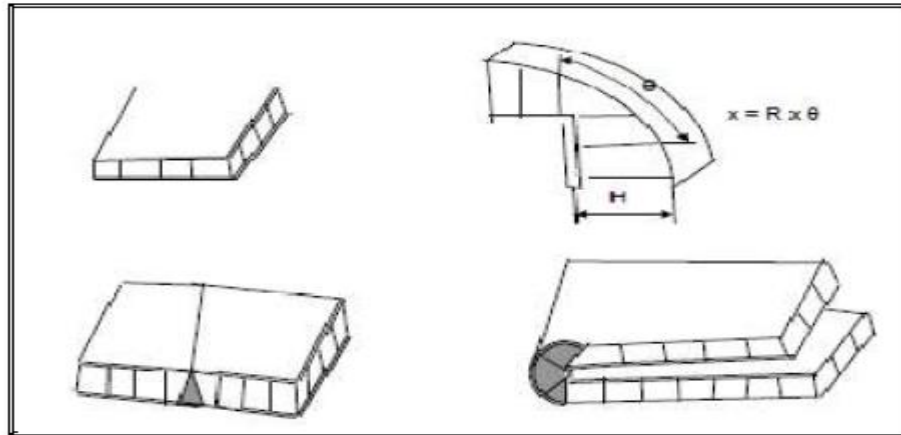


Figure II. 9.Pliage des panneaux sandwichs

On commence par dégarnir une bande de l'un des revêtements en suivant l'axe de la pliure et sur une largeur qui est fonction de l'épaisseur de la plaque et l'angle de pliage souhaité, ensuite on plie et on maintient l'angle dans la position choisie.

II10.Domains d'application des structures sandwichs

A l'égard de leurs bons comportements vis-à-vis de différentes sollicitations, les structures sandwichs envahissent plusieurs domaines, notamment le transport. Quelques technologies récentes basées sur des structures sandwichs sont citées ci-dessous.

En industrie automobile, Volkswagen fabrique les planchers de chargement du Tiguan en peaux renforcées en mats de fibres de verre et en âme à nid d'abeilles en carton, le tout pour moins de 3 kg/m². Telle structure a favorisé une baisse de poids allant jusqu'à 80% par rapport aux planchers fabriqués en matériaux conventionnels tels que le bois et les tôles métalliques. Également, BMW a développé un concept de module de toit avec la même structure qui a permis de réduire la masse de 25% par rapport aux modules de toit conventionnels en acier [33].

Des parois de remorques frigorifiques constituées d'âme en mousse à haute efficacité et des

peaux en composites sont développées comme alternative aux parois métalliques classiques. Elles offrent un gain de poids allant jusqu'à 20% et une performance thermique améliorée de 20%.

En aéronautique, des conteneurs de fret aérien et de bagages, dont les peaux sont constituées de plis croisés de fibres de verre unidirectionnelles imprégnées de polypropylène et d'âme en nid d'abeilles en PP sont développés afin de surmonter le poids lourd et les inconvénients des conteneurs métalliques classiques [33]. Des chariots légers pour avion constitués de structures sandwiches en lin avec des propriétés ignifuges améliorées sont développés pour des raisons d'allègement et de réduction de la consommation de carburant [34].

Ces concepts offrent une robustesse accrue, une réparabilité améliorée et des coûts de cycle de vie réduits.

En construction, des systèmes de façade modulaires en matériau sandwich à âme en mousse sont développés pour contenir le verre et le marbre à la place de treillis conventionnel en acier. Ces structures permettent une installation rapide car elles sont conçues pour être installées directement sur les sols en béton du bâtiment. Elles sont quatre fois plus légères qu'une structure métallique conventionnelle, une bonne résistance à la corrosion et des propriétés d'isolation intéressantes [33].

Chapitre III :
caractérisation
mécanique et physique
des fibres de lins et de la
résine

III.1. Définition de lins

Le lin est une plante annuelle herbacée pouvant atteindre 60 à 80 cm. Sa tige dressée et fibreuse se ramifie en forme de corymbe. Elle porte des feuilles alternes épaisses, simples, entières, linéaires à lancéolées. L'inflorescence est une cyme ou une grappe terminale lâche qui se manifeste entre juin et août. Les fleurs bleues sont hermaphrodites, solitaires, portées par un pédoncule dressé et allongé. Les fruits sont des capsules à cinq loges contenant une dizaine de graines au maximum. Les graines, d'un brun plus ou moins intense, sont ovales, lenticulaires, longues de 4 à 6 mm, pointues à une des extrémités, lisses et luisantes. Elles sont récoltées avant leur chute qui a lieu, sinon en fin d'été, en début d'automne.

III.2. La culture du lin

Dans les tombeaux de l'Egypte ancienne, on a découvert des linceuls de lin qui remontent à l'âge de pierre, jusqu'à l'an 6,000 avant Jésus-Christ. Ces linceuls très raffinés nous démontrent que les Egyptiens de cette époque avaient déjà atteint un haut degré de perfection dans l'art de cultiver, de filer et de tisser le lin. Les pièces de lin retrouvées ne cessent d'émerveiller par la variété et le raffinement de leurs textures et de leurs grosseurs de fil. Ces tissus comptent un nombre insurpassable de fils. Certains dépassent 220 fils au centimètre. La machinerie moderne n'arrive même pas à reproduire l'extrême finesse de ce filage. Certaines tuniques égyptiennes pouvaient s'insérer dans l'anneau d'une bague. On disait qu'elles étaient tissées d'air.

Pour être parvenue à un tel état de perfection, la culture du lin a nécessairement fait son apparition à une époque antérieure. Les découvertes archéologiques les plus récentes, basées sur la localisation et la transformation d'un isotope de carbone, ont daté, à l'heure actuelle, l'origine du lin à 10,000 ou 15,000 ans avant Jésus-Christ. Tous affirment que la fibre de lin fut la première matière naturelle à être filée et tissée.

Cette culture a joué un rôle si important au niveau de la civilisation égyptienne que le dieu Isis fut proclamé le dieu du lin. Tous les peuples anciens ont attribué une origine divine au lin et partout cet hommage fut rendu à des femmes. Comme nous le révèle l'Ancien testament, la dévastation d'une récolte de lin est perçue comme une véritable calamité. C'est ainsi qu'elle figure parmi les dix plaies d'Egypte.

Par sa grande finesse et sa grande blancheur, le lin a symbolisé la pureté et la lumière divine. Les prêtres ne devaient revêtir que du lin pour rester purs. Tous les objets sacrés étaient recouverts de lin. Tous les morts, qu'ils soient riches ou pauvres, maîtres ou esclaves, étaient drapés dans des suaires de lin. Les nobles se distinguaient des plus humbles par le raffinement du tissu. Un décret rendit obligatoire l'usage des suaires de lin pour envelopper les momies parce que, contrairement à la laine, cette fibre n'attire pas les insectes et dure indéfiniment. Elle correspondait ainsi à la notion d'immortalité de l'âme et pouvait conserver la forme du corps, enveloppe physique de l'âme. On a trouvé jusqu'à 1,000 mètres de lin enroulé autour

des momies des pharaons. Les chats sacrés ont aussi été embaumés dans ces bandelettes funéraires.

Le caractère sacré et religieux du lin se répandit dans de nombreux pays. Les Hébreux écrivaient souvent leurs textes sacrés sur des rouleaux de lin. Les prêtres grecs, israéliens et romains portaient des vêtements de lin pour les diverses célébrations du culte. Les premiers prêtres chrétiens ont perpétué la tradition. Lorsqu'ils endossaient l'amict et l'aube tissés en lin, ils récitaient en même temps une prière de purification. Au Moyen-Age, en Europe, on embaumait tous les morts dans des linceuls de lin.

La belle fleur bleue du lin rappelait aux Egyptiens le bleu éthéré qui enveloppe le monde et dans lequel circule l'énergie divine omniprésente qui, par magnétisme, pénètre la terre et insuffle à l'homme la connaissance et la perfection. L'homme, en se vêtant de lin pur, s'harmonise avec cette énergie supérieure, entre en communication avec elle et en reçoit les bienfaits. Il n'est pas étonnant que, après avoir chargé le lin de significations si élevées, les Egyptiens aient cultivé et traité cette plante textile avec un art si parfait, jamais égalé, malgré les progrès de la technologie moderne.

Même si plusieurs pays de l'Orient, en particulier la Babylonie et l'Assyrie[^] ont excellé dans la culture et le tissage du lin, l'Egypte a toujours surpassé toutes les civilisations dans cet art textile. Elle a exporté des tissus luxueux dans plusieurs pays de la Méditerranée dont la Grèce, la Palestine et l'Italie. Les Phéniciens, grands maîtres de la navigation, transportaient ces produits par bateaux à voile. Ils furent remarquables dans l'art de tresser des cordages de lin extrêmement robustes.

Les tissus légers et transparents étaient destinés aux nobles, les tissus plus grossiers habillaient les gens du peuple. Avec les fibres les plus épaisses, on fabriquait des mèches à lampe, des tentes, des armures, des filets, des cordages et des voiles de bateaux. L'armure orientale, faite en fils de lin tissés et tressés très serré, laissait de la mobilité à celui qui la revêtait. En l'an 343, les Grecs abandonnèrent l'armure métallique qui gênait les mouvements pour la remplacer par l'armure de lin qui protégeait efficacement contre les flèches et les lances.

Chez les Grecs et les Romains, les graines de lin entraient dans la préparation des aliments. Les soldats athéniens se nourrissaient de délicieux carrés au miel et aux graines de lin, de sésame et de pavot. Cet aliment de base très nutritif soutenait l'armée entière.

III.B. Le marché et les quantités produites

Le marché économique du lin se divise en deux sous-catégories, soit le marché de la graine de lin et le marché de la fibre de lin. Le Canada se qualifie au rang de premier producteur mondial de graine de lin avec une production annuelle de 489k tonnes suivi de la Russie (369k tonnes) et de la Chine (350k tonnes) [6]. Pour ce qui est de la fibre, le

portrait en est tout autre. Le premier producteur mondial, la France, produit annuellement 52.4k tonnes de fibres suivi de près par la Biélorussie (51.6k tonnes) et de la Russie (46.1 k tonnes) [6]. Le Canada ne figure même pas sur la liste des producteurs de fibres de lin selon la « Food and Agriculture Organisation}} des Nations Unies. Cette situation, aussi incroyable qu'elle puisse paraître compte tenu de l'immensité du volume de production de graine de lin au Canada, pourrait être en partie causée par des facteurs climatiques et une échelle d'opération déséquilibrée [10]. En effet, la météo joue un rôle majeur dans l'extraction des fibres de la tige de lin car elle influence grandement le développement et la multiplication des microbes et microorganismes qui dégradent la pectine lors du processus de teillage. Une météo plus sèche et froide, souvent retrouvée dans l'ouest du Canada vers l'automne et l'hiver, limite souvent l'efficacité du teillage nécessitant parfois la prolongation de cette opération jusqu'à la fin de l'automne ou même au printemps. Cette incertitude sur les conditions de culture et traitement des fibres affecte la qualité des fibres et leurs propriétés [8]. Une connaissance accrue des méthodes et procédés permettrait de réduire cette variation à la source tandis qu'une gestion plus globale des lots de fibres permettrait l'entreposage, la sélection et le mélange des fibres afin d'uniformiser la qualité et les propriétés [11]. Cependant, ces deux options sont difficilement envisageables compte tenu de la très faible production de fibres. Ainsi, les clients potentiels les plus importants appartenant au secteur automobile et de la construction demeurent inaccessibles compte tenu de l'incertitude sur la matière première et de son volume, limitant ainsi pour l'instant le développement du marché Canadien

III.4. De la fibre lin au textile de lin

III.4.1. La plante de lin

Le lin possède une croissance rapide avec cent vingt jours nécessaires à ce que la plante atteigne sa hauteur maximale d'un mètre environ. Au sommet de la tige éclot autour du quinze juin une fragile fleur mauve, bleue, blanche ou rose pâle. La récolte du lin a lieu un mois plus tard, après la floraison, lorsque le lin vire au jaune. On procède alors à l'arrachage. Viendront alors le rouissage, le teillage, le peignage et la filature.



Figure III. 1. fleur de lins

III.4.2. Le rouissage

Une fois le lin arraché (on parle de « pailles » de lin), il est étalé sur le sol du champ, où les bactéries et l'humidité désagrègent la partie externe des tiges qui entourent les fibres, ce qui favorise l'extraction des fibres à l'étape suivante dite du teillage. Le lin est retourné en cours de rouissage, pour que le rouissage soit homogène. Une alternance d'humidité, pour attaquer les tiges, et de vent, pour les sécher, est idéale pour un bon rouissage. Avant, le rouissage se faisait directement dans un bain d'eau, mais le procédé a changé pour des raisons écologiques et économiques.

III.4.3. Le teillage

Les pailles de lin rouies (ayant subi un rouissage réussi) sont broyées et battues pour éliminer les résidus tels que le bois (appelé anas) et l'épiderme des tiges. Les fibres se trouvent ainsi séparées et récupérées. On distingue des fibres longues, soit les fibres les plus qualitatives du lin, que l'on appelle aussi « lin teillé », et des fibres courtes appelées étoupes, que l'on valorise comme un produit mineur mais complémentaire des fibres longues. Les fibres sont ensuite répandues en nappe chez l'agriculteur puis lavées. Notons au passage que les graines de lin ont également été soigneusement mises de côté.

III.4.4. Le peignage et la filature

Afin d'être utilisables par l'industrie du textile, les fibres de lin doivent être filées. Pour préparer la filature, on peigne d'abord les fibres, c'est à dire qu'on les rend plus parallèles. Le lin n'est pas filé de la même manière que le coton, aux fibres plus élastiques, globalement plus longues, et plus homogènes. On a recours pour le lin à des techniques de filature spécifiques, que l'on applique selon le type de fibres à filer, et en particulier selon la longueur des fibres. Pour les fibres de lin longues c'est à dire le lin teillé, on utilise la filature au mouillé. Les fibres longues sont réunies en mèche légèrement torsionnée et étirée sous l'eau pour ramollir les « ciments » naturels. On obtient des fils précisément dissociés, donc fins, lisses, réguliers, hautement qualitatifs. La filature au sec convient essentiellement aux étoupes.

Les fibres courtes sont étirées sans eau, et filées avec approximativement le même matériel que pour de la laine. Les fils obtenus sont plus grossiers que les fils issus de la filature au mouillé, car on n'a pas pu diviser aussi bien les fibres en fibres unitaires. Enfin, la filature dite « du circuit des mélanges » s'applique lorsqu'on veut mélanger intimement le lin à une autre matière (lin/soie, lin/laine, lin/coton...) et obtenir un fil qui ne sera pas 100% lin mais trouvera d'autres atouts : plus chaud pour l'hiver avec la laine, adapté aux tenues de soirées avec la soie, moins froissable avec de la viscose.

III.5. L'utilisation de lin

III.5.1. En habillement

L'habillement vient très largement en tête de l'utilisation du lin en textile. Le lin a depuis longtemps fait ses preuves en tant que matière représentant un bien être au porter incomparable : il absorbe l'humidité, reste frais l'été, est intrinsèquement antibactérien et hypoallergénique.

De plus, sa résistance est immense : un vêtement en lin dure deux fois plus longtemps qu'un vêtement en coton : il ne peluche pas, ne se déforme pas. On peut aussi bien le tisser pour en faire des chemises que le tricoter pour en faire des T-shirts, ce qui dans ce dernier cas lui confère une souplesse et une élasticité parfois insoupçonnées des consommateurs qui le voient souvent comme un textile raide.

III.5.2. En textile d'ameublement

Dans le domaine du textile d'ameublement, c'est à dire le textile que l'on dédie à la décoration d'intérieurs, le lin représente le naturel qui nous apaise et dont on aime s'entourer. [Rideaux](#), coussins, [linge de lit](#), linge de table et linge d'office (torchons...) utilisent le lin pour son image de noblesse, sa simplicité intemporelle, son élégance, sa résistance, sa durabilité. On dit que des draps en lin favorisent un bon sommeil.

Depuis quelques années, le lin lavé (qui subit des prélavages avec adoucissants, pour une usure de surface maîtrisée donnant « une patine ») a la côte : il valorise le « froissé » du lin en une matière cabossée, irrégulière, d'autant plus vivante et sensorielle ; il renouvelle l'aspect

visuel et le toucher. Enfin, le lin confère aux couleurs une vivacité et une profondeur exceptionnelles : on parle d'une bonne affinité tinctoriale pour apprécier le fait qu'avec peu de teinture, le lin absorbe très bien la couleur et la magnifie.



Figure III. 2. rideaux à œillets en lin

III.5.3. En tissus techniques

Le lin sert enfin à réaliser ce qu'on appelle des tissus techniques et trouve des usages pointus souvent liés à l'éco-conception et l'éco-construction (qui privilégient un faible impact écologique et un recyclage aisé) : composites lin pour l'automobile ou les bateaux, renforts lin pour le matériel sportif (raquettes de tennis, skis...) limitant les traumatismes musculaires et les irritations, en dalles de sols, isolation thermique, sous couche de parquet pour l'aménagement de la maison, en matériel de musique comme les enceintes pour la bonne absorption des vibrations... Les composites lin sont une alternative d'avenir à l'usage du carbone et de la fibre de verre.

III.5.4. En matériaux composites

Le lin est une plante annuelle cultivée pour ses fibres ainsi que pour ses grains. La France est le premier producteur dans le monde de la fibre de lin sachant que le Canada est le premier producteur des grains issus de la plante de lin. L'Amérique du Nord et l'Europe représentent les premiers consommateurs de fibre dans le monde respectivement dans le domaine de la construction et de l'automobile.

Les fibres de lin sont extraites de la tige de la plante [28]. Ils ont une longueur qui peut varier de 4 mm à 77 mm et un diamètre de 5 à 76 μm . Pour avoir une fibre technique, il faut

rassemble presque 40 fibres élémentaires[39] . Le tableau représente les compositions et propriétés de quelques fibres végétales

Tableau III. 1.composition et propriétés des quelques fibres végétales [28]

fibres	cellulose (%)	Angle micro fibrillaire(degré)	Diamètre (μ /m)	Longueur (mm)	rapport
Lin	64-71	10	5-76	4-77	1687
Ramie	83	7.5	16-126	40-255	3500
Chanvre	78	6.2	10-51	5-55	690
Jute	61-71	82	25-200	-	110
Sisal	67-78	45	7-47	0.8-8	100
Noix de coco	43	-	12-24	0.3-1	35

Plusieurs chercheurs ont étudié et abordé la compétitivité de la fibre de lin et son adéquation pour le renforcement de la matrice polymère [6, 7, 40-44]. Les fibres de lin comme renfort se présentent sous des formes et configurations différentes (telles que des fibres de mono filaments, des tapis, des mèches, des tissus, etc.) avec diverses techniques de fabrication pour produire des composites (empilage de film, infusion sous vide, moulage par compression, moulage par transfert de résine (RTM), etc.) [43, 45-48]

III.6.Caractéristiques physique des fibres de lins

III.6.1. La masse volumique et la densité

a)Définitions

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. C'est donc le rapport entre la masse totale de la matière considérée et son volume. Elle dépend du système d'unités utilisé. La notion de masse volumique s'applique aux corps homogènes. La masse volumique s'exprime dans le système international (SI) en gramme par centimètre cube (**g/cm³**) suivant la relation [23] :

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

La masse comme le volume sont des quantités extensives ; elles traduisent la présence physique de la substance. Au contraire, la masse volumique est une quantité intensive liée directement à la nature de la matière. Ainsi, la masse volumique d'un petit volume de matière peut, en principe, être déterminée avec une précision fonction des méthodes utilisées pour mesurer la masse et le volume. La densité d'un corps solide ou liquide est le rapport de sa masse volumique à celle de l'eau à 4°C. C'est donc un nombre sans dimension, indépendant du système d'unités . On distingue [24]

- **La masse volumique absolue ou vraie et la densité absolue ou vraie** : quand le volume considéré ne prend en compte ni la porosité fermée ni la porosité ouverte.
- **La masse volumique effective et la densité effective** : quand le volume considéré inclut les porosités ouverte et fermée
- **La masse volumique apparente et la densité apparente** : quand le volume considéré inclut la porosité fermée. Pour les poudres et les fibres, elles dépendent de la densité de la matière solide, de la taille des particules et de leur distribution, ainsi que de la forme des particules et de leur rugosité.
- **La masse volumique tassée et la densité tassée (poudres, fibres)** : ce sont les mêmes que les précédentes, sauf que le volume considéré est celui après que la poudre ou les fibres ont été tassée soit par vibration soit par tapotement. La densité relative est une autre notion utile. Si ρ_1 et ρ_2 désignent les masses volumiques de deux substances différentes, leur densité relative est :

$$\rho_{12} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

C'est également une grandeur sans unité. Puisque c'est une grandeur relative [23]

III.6.2.Exemple

Des fibres de lin [25], c'est une fibre libérienne la plus souvent utilisée dans le développement de fibres naturelles composites renforcées. Avant l'essai, l'échantillon de fibres de lin a été conditionné dans un four à 60° C jusqu'à ce que la teneur en humidité a été réduite à moins de 5%. Fibre a été séchée pour s'assurer que tous les échantillons à tester ont été à un niveau d'humidité uniforme. Les fibres de lin ont été ensuite maintenues dans des sacs d'échantillons scellés afin qu'ils restent à un niveau d'humidité constant pendant l'essai [25].

On utilisant des différentes méthodes [25]

Méthode 1 : densité linéaire et calcul du diamètre

Le spécimen, un long-fibre unique, a été découpé en petits épissures, placés sur une lame de microscope, et projetées sur un écran à travers le microscope. Son diamètre a été mesuré en utilisant une règle en millimètres. La densité linéaire a été calculée par la mesure des masses et des longueurs des spécimens testés. A savoir, 100 fibres ont été testées pour déterminer un diamètre moyen de fibres et 10 pour déterminer la densité linéaire moyenne.

La densité moyenne linéaire et de diamètre ont été utilisés pour calculer la densité volumique de la fibre ρ_f .

$$\rho_f = \frac{M}{\frac{\pi d^2 l}{4}}$$

Où (M) est la masse d'un échantillon de fibres, (d) la moyenne de diamètre, et (l) la longueur d'un spécimen de fibre [25]

Méthode 2 : Archimède (flottabilité)

L'échantillon, un faisceau de fibres, a été pesé dans l'air et puis dans un liquide qui a été utilisée pour mouiller l'échantillon et était densité inférieure à celle de l'échantillon. La différence des deux médias était la force de flottabilité.

Le processus de pesée a été effectué sur une balance analytique avec une résolution de 0,0001g, et a été adapté pour la suspension de pesage par un acier inoxydable suspension fil d'environ 0,4 mm de diamètre. La force de flottabilité a été converti en déguster volume en divisant la densité du liquide. La densité de l'échantillon a été acquise en divisant le poids de l'échantillon dans l'air avec volume de

$$\rho_f = \frac{(M_3 - M_1)}{((M_3 - M_1) / (\rho_l (M_4 - M_2)))} \rho_l$$

l'échantillon

Où (ρ_l) est la densité du liquide, (M_1) poids de suspension fil dans l'air, (M_2) le poids de fil de suspension dans un liquide (à point d'immersion),

(M_3) le poids de fil de

suspension, plus article dont la densité devait être déterminée dans l'air et

(M_4) poids

de fil de suspension, plus article dont la densité était de déterminer dans le liquide. Les liquides d'immersion essayé dans cette étude étaient canola huile, l'eau, l'éthanol, le éthanol, l'acétone et le glycérol. Sept échantillons de fibres ont été testés pour chaque liquide d'immersion [24]

Méthode 3 : pycnomètre à l'hélium

Spécimen pour ce test est également un faisceau de fibres, et 10 échantillons ont été testés pour donner une valeur moyenne. Ce test procédé était similaire à la méthode d'Archimède, mais était appliqué en utilisant un milieu gazeux plutôt qu'un liquide. Hélium gaz a été utilisé pour tester le volume de fibres à travers ce a été appelé le pycnomètre d'hélium gazeux. Un volume connu d'hélium a été contenu dans la cellule de référence du pycnomètre. Lors d'un essai, le gaz a été libéré lentement la cellule de référence dans la cellule d'échantillon où les fibres étaient situés. La pression du gaz d'hélium qui restait dans le récipient de référence a été utilisée pour déterminer le volume de l'échantillon de fibres. Masse de l'échantillon a été mesurée sur un équilibre, et la densité de la fibre a été déterminée par divisant la masse par le volume [25]

Méthode 4 : pycnomètre liquide

Cette méthode d'essai est similaire à l'hélium et Archimède méthodes de pycnomètre, et les spécimens utilisés est également une fibre bundle. Il y a une chose en particulier, cependant, le test spécimen doit être moins dense que le fluide d'essai. Depuis l'échantillon de fibres est pondéré à l'air puis placé dans un liquide pycnomètre, cette méthode permet une mesure directe du volume de l'échantillon de fibre (à savoir, le liquide qui s'affiche placé dans le pycnomètre donne une lecture de l'échantillon volume). Ensuite, la densité de la fibre est calculée par la masse et le volume. Cette méthode d'essai n'a pas été choisie dans la présente étude parce que le choix de fluides d'essai est limitée par la densité des fibres de lin, et il est similaire aux autres sélectionnée méthodes [25].

$$\text{Densité } (d) = \frac{\rho (m_1 - m_2)}{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)}$$

Avec

ρ : densité de éthanol qui vaut **0,8051 g/cm³**.

m0 : masse du pycnomètre de **50 ml** vide.

m1: masse du pycnomètre contenant **1 g** de la fibre

m2: masse du pycnomètre contenant **1 g** de la fibre et rempli jusqu'au trait de jauge par éthanol.

m3: masse du pycnomètre rempli seulement avec de éthanol jusqu'au trait de jauge.

En conséquence de leur travail, les auteurs sont en mesure de favoriser la méthode d'Archimède (avec l'huile de canola comme liquide d'immersion) et le procédé du pycnomètre hélium, du fait de leur mieux, une précision comparable, et au fait qu'il n'y a pas de produits chimiques nocifs sont impliqués dans eux. Lorsque respectabilité est considérée, le test de pycnomètre à l'hélium est encore plus préférable car il fournit une variation nettement plus faible entre les résultats. Cependant, le test d'Archimède est moins cher en termes de frais de

démarrage, comme indiqué par les exigences de capital l'équipement et la formation des travailleurs. Dans l'ensemble, tandis que l'huile de canola test d'Archimède est une méthode

simple, rapide et peu coûteux pour une utilisation générale dans la mesure de la densité de fibres naturelles, le Procédé de pycnomètre à hélium est capable de fournir plus élevée des résultats de qualité. Cette méthode serait préférable où il existe des facteurs tels que les exigences strictes en matière de précision ou d'un volume élevé de tests pour justifier le coût supplémentaire [25]

III.7. Caractérisations mécaniques des matrices

Dans cette partie on s'intéresse par l'effet de dilution sur les propriétés mécaniques des matrices, pour cela nous avons élaborés des éprouvettes de traction sous forme haltère **figure III.3**

Selon la modalité de la norme NF EN ISO 527-4 type B. Les essais sont effectués sur une machine universelle Zwick/Z010 piloté par le logiciel testXpert version 12.0

Tableau III. 2. Propriétés mécaniques des résines

-----	polystère	Epoxyde	phénolique	Polyamide	alumine
ϵ_r en traction (%)	2 - 5	2-5	2.5	-	-
ρ (Kg/m³)	1200	1100-1500	1200	1130	2630
σ_r en traction (MPa)	50-80	60-80	40	70	358
E en traction (GPa)	2.8-3.5	3-5	-	3	69

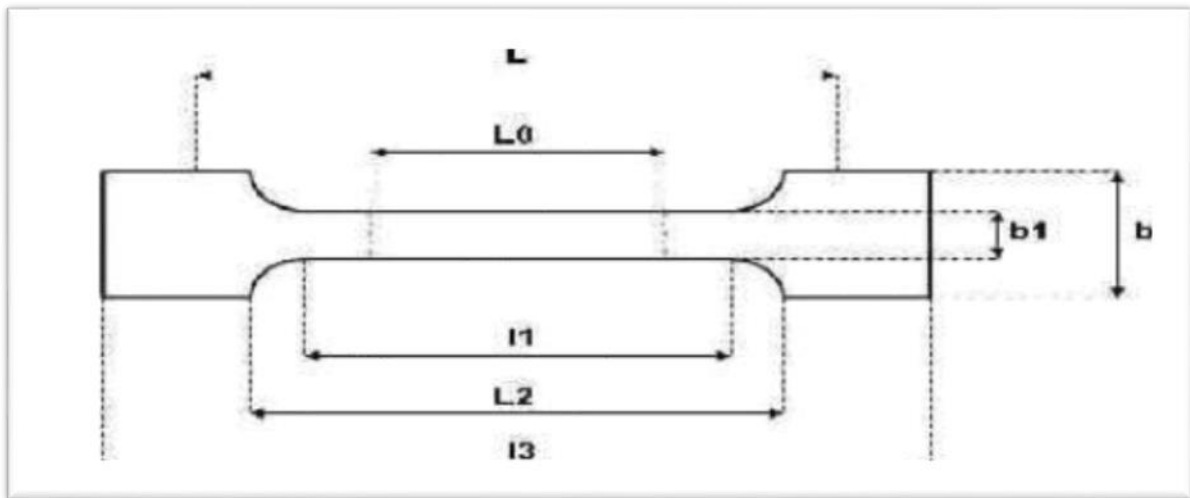


Figure III. 3. Dimensions de l'éprouvette haltère

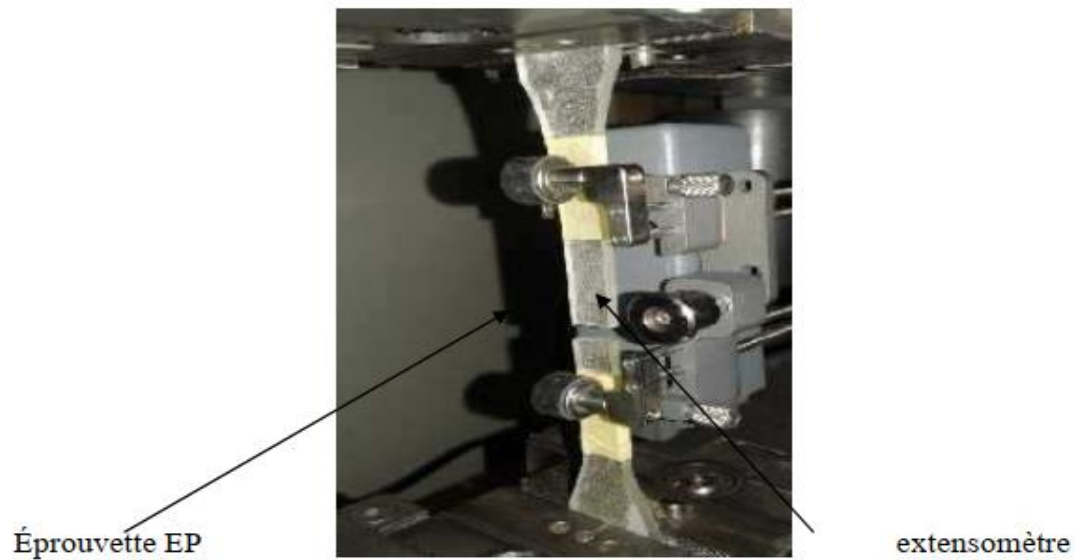


Figure III. 4. Essai de traction sur la machine Zwick

Chapitre IV :

étude

expérimentale et

résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les travaux expérimentaux effectués dans le cadre de ce projet. Des essais de traction ont été réalisés pour déterminer la résistance à la traction des matériaux composites à base des fibres de lins.

Le chapitre commence par la présentation des matériaux composites utilisés pour les essais. La fibre et la matrice et leurs propriétés sont présentées. La préparation des éprouvettes est décrite dans la partie suivante. Ensuite, les moyens et la procédure d'essai sont présentés et à la fin du chapitre on a présenté les résultats obtenus dans des tableaux.

IV.2. Matériaux utilisés

Les fibres aramides (Kevlar) présentent les meilleures caractéristiques de résistance aux impacts, mais malheureusement ce n'est pas facile de les trouver sous forme de matières premières, cela nous a obligé de choisir les fibres de lins qui ont aussi de bonnes propriétés de résistance à l'impact.

Les échantillons sont des éprouvettes en matériaux composites à base de fibres de lins de dimensions L_0 (150 mm), D_0 entre (23mm à 27mm) et une épaisseur de (1.4mm à 2.2mm).

IV.2.1. Fibres utilisées pour la fabrication des échantillons

Fibre végétale extraite de la tige linum. Solide et brillante, elle donne des tissus frais et absorbants qui se froissent facilement.

De culture facile, elle permet la fabrication de textiles et produits dérivés, notamment des isolants pour le bâtiment.

Les graines donnent de l'huile de lin, produit de base de la plupart des peintures naturelles



Figure IV. 1. Les fibres utilisées dans notre matériau composite

IV.2.2. traitement des fibres par NaOH

Les fibres de lins ont été immergées dans une solution de NaOH à différentes concentrations (0.5% et 1%), à la température ambiante avec agitation pendant 45 minutes. Ensuite, les fibres ont été lavées complètement avec de l'eau pour enlever l'excès du NaOH et amener le pH aux



alentours de 7. Puis elle a subi un étuvage à $T = 80^{\circ}\text{C}$ pendant 8h



Figure IV. 2..Fibres de lins dans NaOH (0.5% - 1%)



Figure IV. 3. Traitement thermique l'étuvage

- **But de traitement :** Le but de ce traitement est l'élimination de certaine quantité de lignine de cire et d'impuretés qui recouvrent la surface externe des fibres. Le traitement par l'hydroxyde de sodium (0.5 et 1% de NaOH) de la fibre favorise l'ionisation du groupe hydroxyde de l'alcool



Ainsi ; le traitement alcalin influe directement sur les fibrilles et le degré de polymérisation de la cellulose. Il favorise aussi l'extraction de la lignine et l'hémicellulose la figure suivant représente les fibres de DISS avant et après l'immersion par solution de NaOH.

IV.2.3. Matrice utilisé

La résine de l'orn c'est une résine époxyde insaturé orthophtalique, diluée au styrène, moyennement réactive et à faible viscosité

IV.2.4. préparation de la matrice

La résine époxy est une résine de stratification de manipulation facile. Ce système peut être employé pour la fabrication ou la réparation des structures composites aéronautiques. Le produit est agréé par la norme BMS 8-201 (Boeing Matériels Spécification).

Cette résine présentée sous forme d'un mélange homogène de résine (vernis epoxy) et de durcisseur tous deux de marque LORN. Les proportions ont été prises selon des normes

imposées par le fabricant, qui exige comme mélange : 100 g de résine époxy pour 65 g de vernis et 35 g de durcisseur.

Les spécifications techniques de cette résine sont mentionnées dans la fiche technique fournie par le fournisseur.



Figure IV. 4. Préparation de la résine

Tableau IV. 1. Caractéristique technique de résine epoxy

Propriétés	Vernis époxy	Durcisseurs
Couleur	transparent	Paille
Densité (g/cm ³)	1.21	1.05
Viscosité à 25 C° (mg/cm s)	77.7	4000
Temps de vie à 25 C° et sans ouverture du conteneur (mois)	12	12

Propriétés Mécaniques en durcies et les caractéristiques

Tableau IV. 2. Propriétés de la matrice époxy utilisée

Propriétés	Valeur	Unité
Dureté Barcol	30	---
Résistance à la flexion	60	MPa
Module d'élasticité en flexion	1500	MPa
Résistance à la traction	30	MPa
Module d'élasticité en traction	1500	MPa
Allongement à la rupture	20	%
Teneur en styrène	37	%
Stabilité à 65°	06	jour
Temps de gel à 25°C	11	minute
Teneur en styrène	37	%

IV.3. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été réalisées au niveau du laboratoire de la faculté de Boumerdes.

Pour la préparation des éprouvettes on a utilisé les outils et les produits suivants :

- La fibre de lin
- Le filet ou le squelette en acier
- La résine époxy
- L'accélérateur
- Le catalyseur

- La cire : C'est elle qui va permettre le démoulage
- Le gel coat : Il assure la finition de la pièce

Autres outils indispensables

- Le rouleau ébulleur : Pour éliminer ou minimiser les bulles d'air dans le matériau
- Un pinceau
- Une seringue pour pouvoir doser de faibles quantités de l'accélérateur
- Une balance
- De l'acétone
- Des chiffons doux

La pièce (moule) sur laquelle la plaque sera faite doit être propre et dégraissée et elle doit être imperméable. De plus elle ne pourra présenter de « contre-dépouille », c'est-à-dire une forme qui interdisant le démoulage :

- Nettoyage du moule à l'aide du coton sèche.
- On passe une couche de cire de démoulage soigneusement en allant dans tous les coins.
- Après séchage, lustrage soigné : le moule doit devenir brillant.
- Le cirage et lustrage doivent être effectués 3 fois (un mauvais cirage et un mauvais lustrage conduiront à un mauvais démoulage..)
- On prépare la résine en ajoutant l'accélérateur toujours selon la proportion de 2%
- On tartine le moule que l'on fixe sur un support.
- A l'aide du rouleau ébulleur, on imprègne totalement la fibre à force de passages répétés sur l'ensemble de la pièce. Les bulles doivent disparaître.
- Selon l'épaisseur de la plaque demandée on placera les couches et on répète l'opération jusqu'à l'obtention de cette épaisseur, la résine doit déborder de la pièce.
- Après 8 heures de séchage on commence par éliminer ce qui dépasse et on démoule notre plaque

IV.4: Essai de traction

IV.4.1. Objectif

- Réaliser des essais de traction sur des éprouvettes composites.
- Exploiter les courbes de traction.

IV.4.2. Introduction

L'essai de traction est le plus fondamentale parmi tous les essais mécaniques. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le

coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette normalisée (figure IV.2) à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à obtention de la rupture. La machine utilisée pour effectuer les essais de traction sur nos éprouvettes est une machine de marque zwick/Roell pilotée par microordinateur. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées à température ambiante. Nous récupérons des courbes contraintes /déformations.

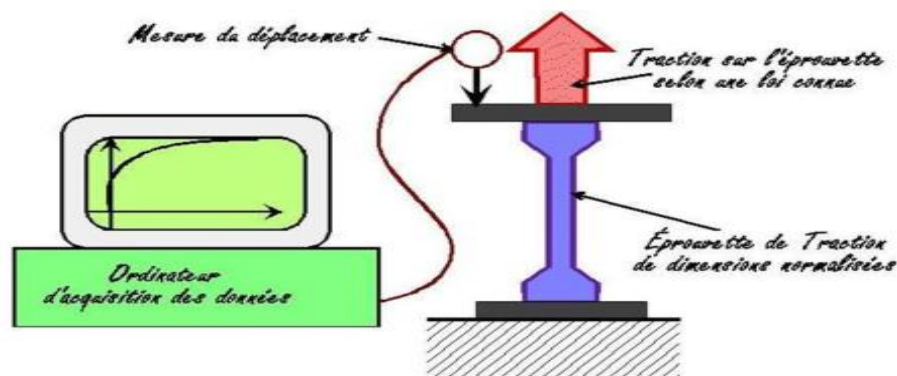


Figure IV. 5.: Principe d'un essai de traction

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et en contrainte. On obtient alors le graphe suivant (figure IV.2).

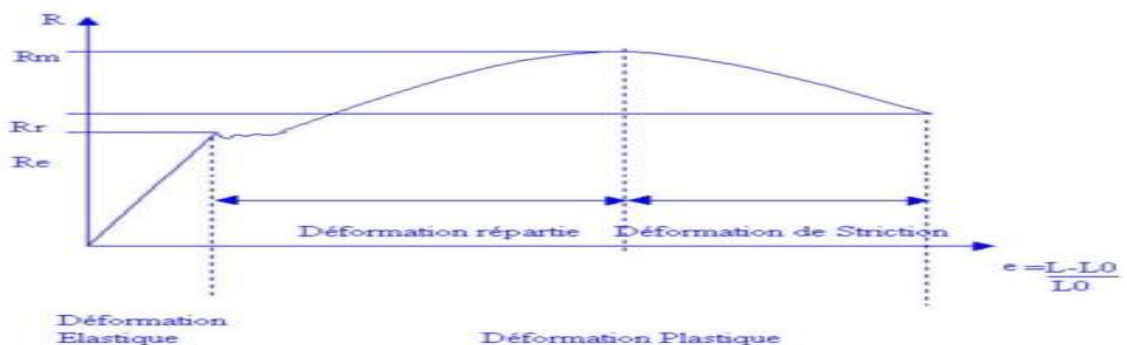


Figure IV. 6. Courbe type de traction

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- Le module de Young **E** ou module d'élasticité longitudinale,
- La limite élastique **Re** ou **σe** qui sert à caractériser un domaine conventionnel de

réversibilité.

- La limite à la rupture **R_m** ou **σ_m** .
- L'allongement à la rupture **A** , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous la charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

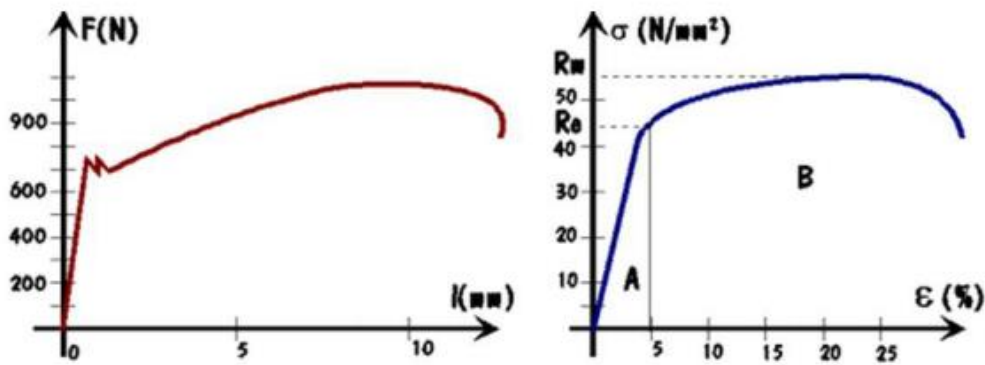


Figure IV. 7. Signification des courbes de traction

- Sur le graphe de gauche, on étudie l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort appliqué, c'est une courbe propre à l'éprouvette testée.
- Sur le graphe de droite, on fait apparaître les paramètres du matériau, à savoir le pourcentage d'allongement, en fonction de la contrainte qui est le rapport de l'effort de traction sur la section l'éprouvette

La loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \epsilon$

E [MPa], Le module de Young **ou** module d'élasticité longitudinale.

$\epsilon = \Delta L / L$ [sans unité], L l'allongement à la rupture.

$\sigma = F / S$ [MPa].

IV.4.3. La machine de traction

La machine de traction Zwick /Roell/Z050.1KN est une machine de traction universelle à un seul poste de travail, c'est une machine à vis sans fin Figure (IV.5). Elle est constituée des parties essentielles suivantes : la traverse sur colonnes et la partie électronique de commande. Elle est dotée d'extensomètre avec les deux palpeurs

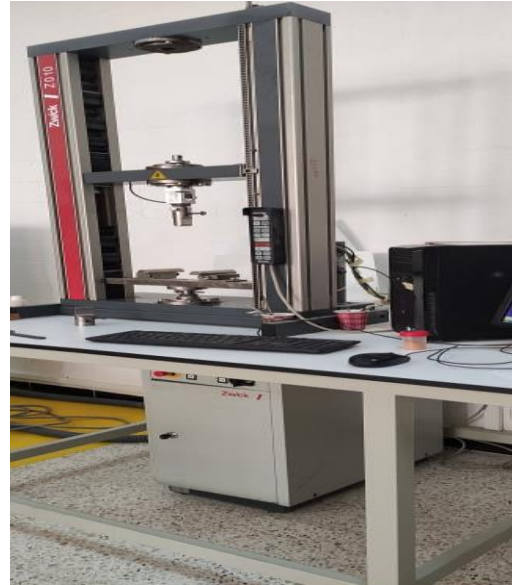


Figure IV. 8. La machine de traction Zwick /Roell/Z050

IV4.4.Essais de traction sur les fibres

Les tests de traction sur fibres sont effectués à l'aide d'une machine universelle Zwick à une vitesse de 2,5mm/min. la distance entre les deux mors de serrage de fibre est de 10mm. Les essais de traction sont réalisés sur des lots de 18 éprouvettes de longueurs de jauge 20 cm (fibres brute) entaillée ont été testées, son pilotage se fait par le logiciel qui permet à la fois de consigner les paramètres d'essais, d'acquérir et de traiter les données. **La figure IV.6.** illustre un système de fixations des fibres.



Figure IV. 9. Test de traction des fibres végétales

IV.4.4.1. courbe de comportement en traction des fibres (1%)

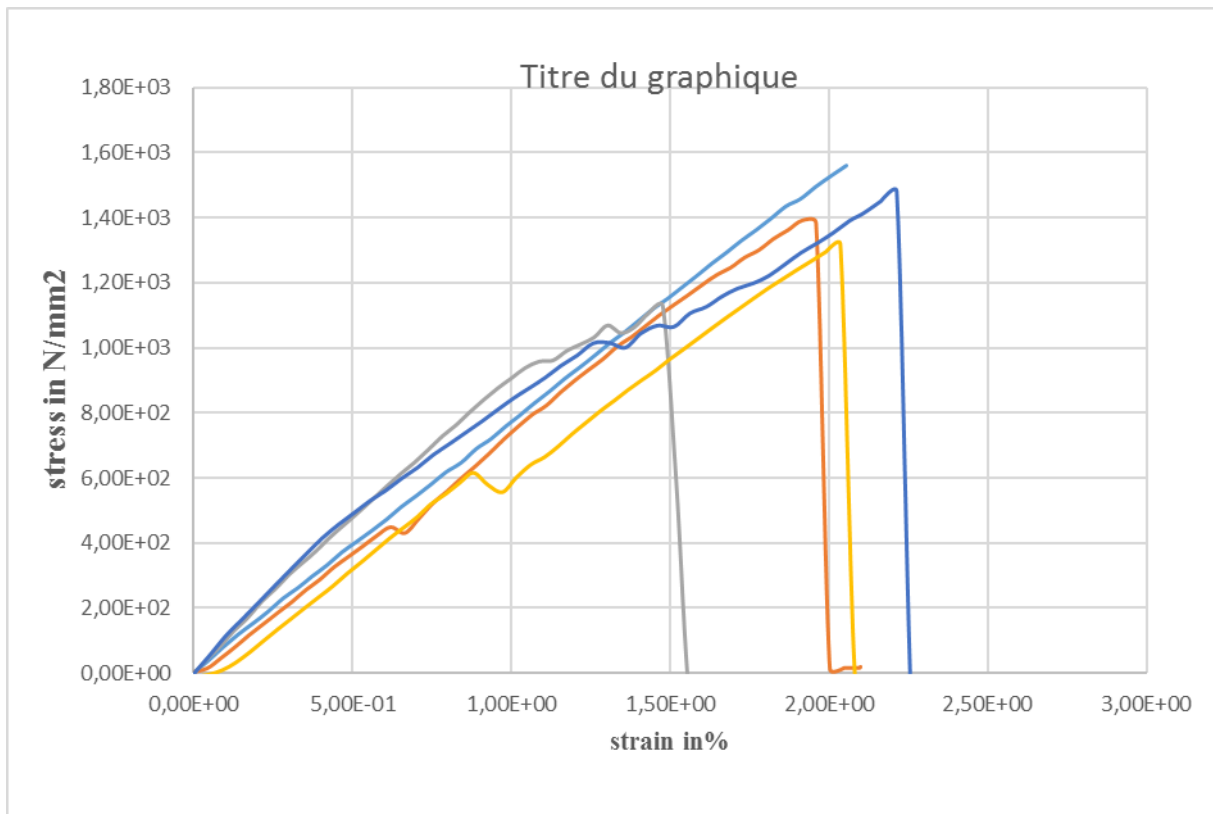


Figure IV. 10. courbe de traction des fibres (1%)

Tableau IV. 3. caractéristiques et contraintes à la rupture des fibres 1% en traction

Nr	D ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (%)	σ-F _{max} (%)
1	0.052	22.21	3.31	1559.76	2.06	2.06
2	0.052	23.37	2.96	-	-	1.91
3	0.052	23.86	2.40	-	-	1.84
4	0.052	23.37	2.80	-	-	2.03
5	0.052	20.66	3.15	-	-	2.21

IV.4.4.2. courbe de comportement en traction des fibres (0.5%)

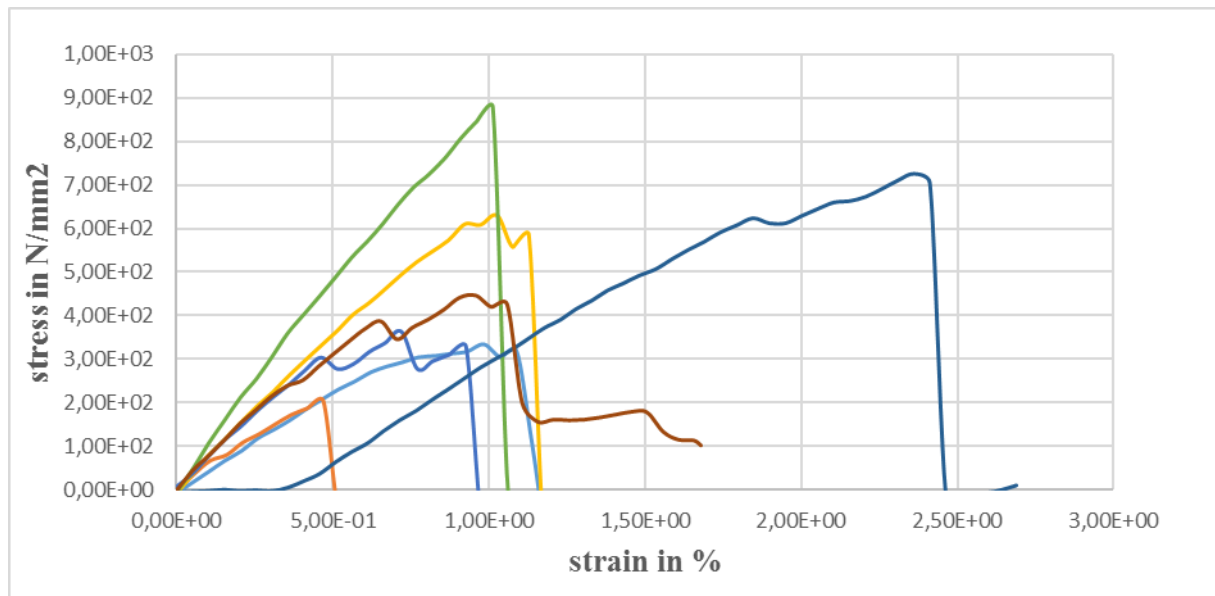


Figure IV. 11. courbe de traction des fibres (0.5%)

Tableau IV. 4. caractéristiques et contraintes à la rupture des fibres 0.5% en traction

Nr	D ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (%)	σ-F _{max} (%)
1	0.052	20.00	0.71	1559.76	2.06	0.98
2	0.052	20.00	0.43	-	-	0.47
3	0.052	20.18	1.34	-	-	1.03
4	0.052	20.18	0.77	-	-	0.72
5	0.052	20.44	1.87	-	-	1.01
6	0.052	20.18	1.54	-	-	2.36
7	0.052	20.72	0.95	-	-	0.96

IV.4.4.3. courbe de comportement en traction des fibres (témoin)

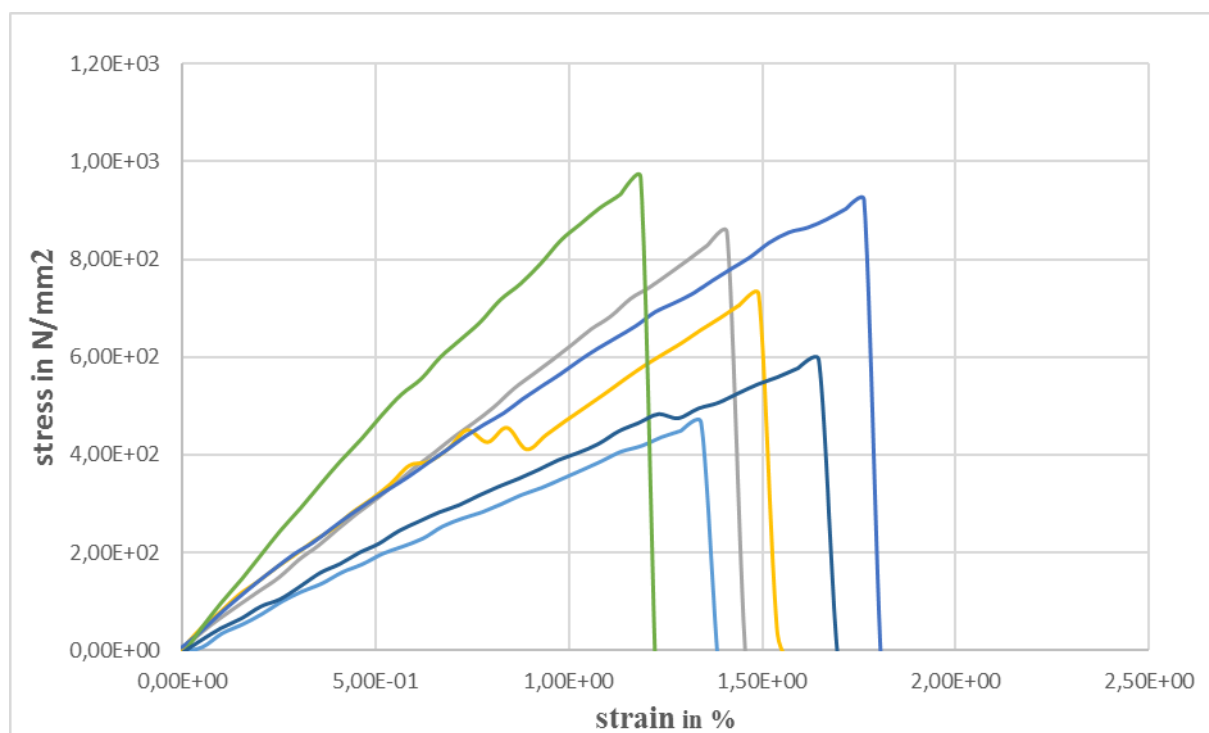


Figure IV. 12. courbe de traction des fibres (témoin)

Tableau IV. 5. caractéristiques et contraintes à la rupture des fibres témoin en traction

Pour l'échantillon témoin : une contrainte allant de 8.10^2 à 1.10^3 N/mm² pour une déformation

Nr	D ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (%)	σ-F _{max} (%)
1	0.052	20.18	0.99	1559.76	2.06	1.34
2	0.052	20.52	1.81	-	-	1.41
3	0.052	20.86	1.54	-	-	1.49
4	0.052	21.21	1.95	-	-	1.76
5	0.052	20.18	2.05	-	-	1.19
6	0.052	20.18	1.26	-	-	1.65

de 1% à 1,75 %.

Pour l'échantillon traité avec la solution NaOH à 1% , les résultats obtenus sont les suivants:

Une contrainte allant 1.10^3 à $2,25 .10^3$ et une déformation supérieure à 2%.

Pour l'échantillon ayant subi un traitement avec la solution de NaOH concentrée à 0.5% les résultats obtenus sont les suivants:

Une contrainte allant 4.10^2 à $9 .10^2$ N/mm² et une déformation maximale de 2,5 %.

On conclut pour les fibres qu'un dosage donne une contrainte de traction maximale de 2,25 fois supérieur à celle appliquée à l'échantillon témoin et une déformation de 0,25 % supérieure. On voit bien la faiblesse des résultats concernant les contraintes maximales pour un dosage de 0.5%.

IV.4.5. Essais de traction sur la matrice

Les tests de traction sur résines sont effectués à l'aide d'une machine universelle Zwick à une vitesse de 2,5mm/min. la distance entre les deux mors de serrage de fibre est de 10mm. Les essais de traction sont réalisés sur des lots de 4 éprouvettes de longueurs de jauge 11 cm entaillées ont été testées, son pilotage se fait par le logiciel qui permet à la fois de consigner les paramètres d'essais, d'acquiesir et de traiter les données. **La figure IV.13** illustre un système de fixations des fibres.

IV.4.5.1.a courbe de comportement en traction de la matrice

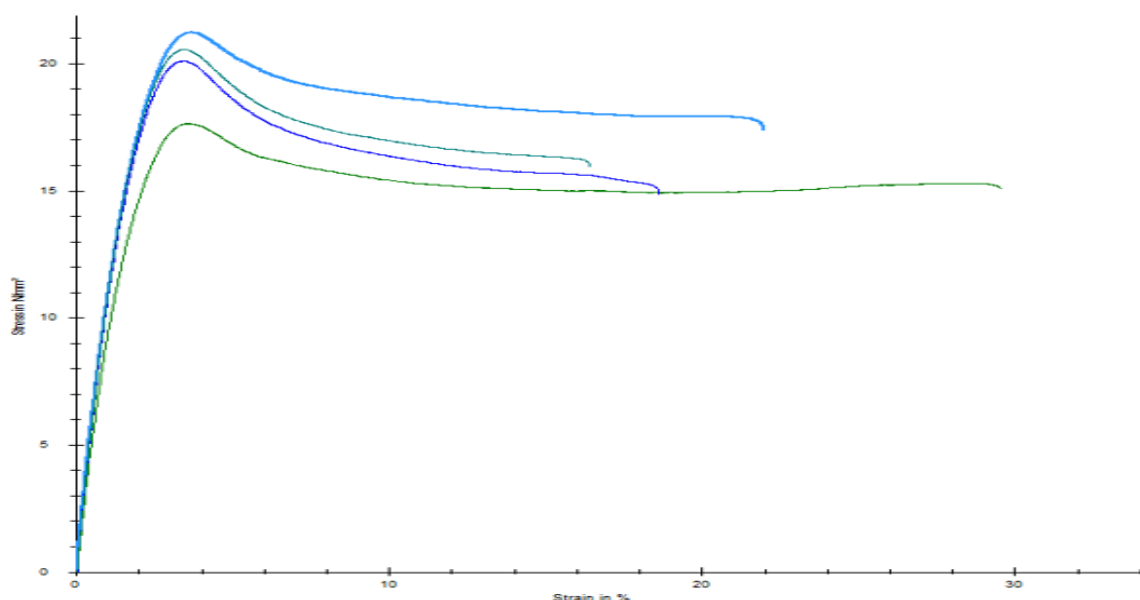


Figure IV. 13. courbe de traction de résine

Tableau IV. 6. caractéristiques et contraintes à la rupture et module d'élasticité en traction de la résine

Nr	A ₀ (mm)	B ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (μm)	σ-F _{max} (μm)	E _{mod} (N/mm ²)
1	3.92	10.00	110.00	21.23	17.38	24191.47	4019.95	1195.81
2	3.89	10.25	110.00	17.65	15.03	32479.12	3910.22	1031.01
3	3.93	9.98	110.00	20.10	14.81	20492.31	364137	1202.15
4	3.89	10.8	110.00	20.58	15.94	18031.82	3754.64	1228.33

IV.4.6. Essais de traction sur les matériaux composite

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette de géométrie définie (normalisée) à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à l'obtention de la rupture. Les caractéristiques à déterminer sont :

- La limite élastique.
- La limite à la rupture.
- Module d'élasticité E.

L'essai de traction permet de définir la contrainte maximale de traction qui est définie par la formule :

$$\sigma = \frac{F}{b \times h}$$

F : force maximale .

b : longueur initiale de l'éprouvette.

h : épaisseur initiale de l'éprouvette.

IV.4.6.1.courbe de comportement en traction des matériaux composites (0.5%)

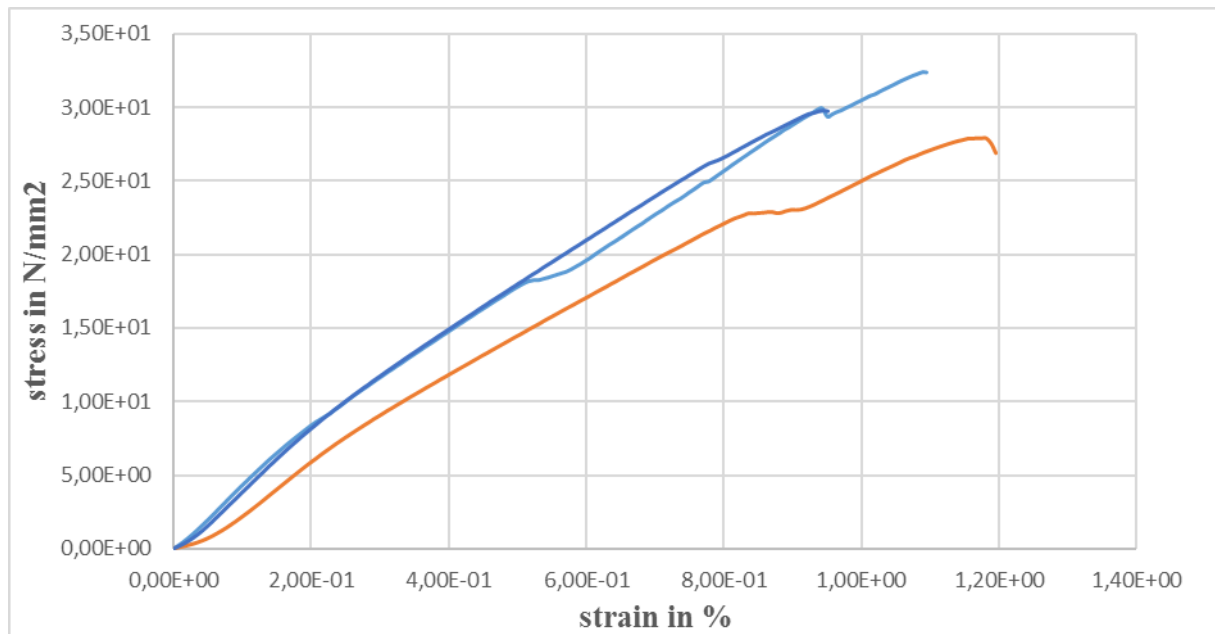


Figure IV. 14.courbe de traction des matériaux composites (0.5%).

Tableau IV. 7.caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction des matériaux composites (0.5%)

Nr	A ₀ (mm)	B ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (μm)	σ-F _{max} (μm)	E _{mod} (N/mm ²)
1	1.7	24.00	150.00	32.39	32.39	1643.32	1633.29	4654.86
2	1.4	24.00	150.00	27.93	26.93	1793.62	1762.41	3690.29
3	1.4	24.00	150.00	29.82	29.78	1427.71	1417.08	4553.58

IV.4.6.2.courbe de comportement en traction des matériaux composites (01%)

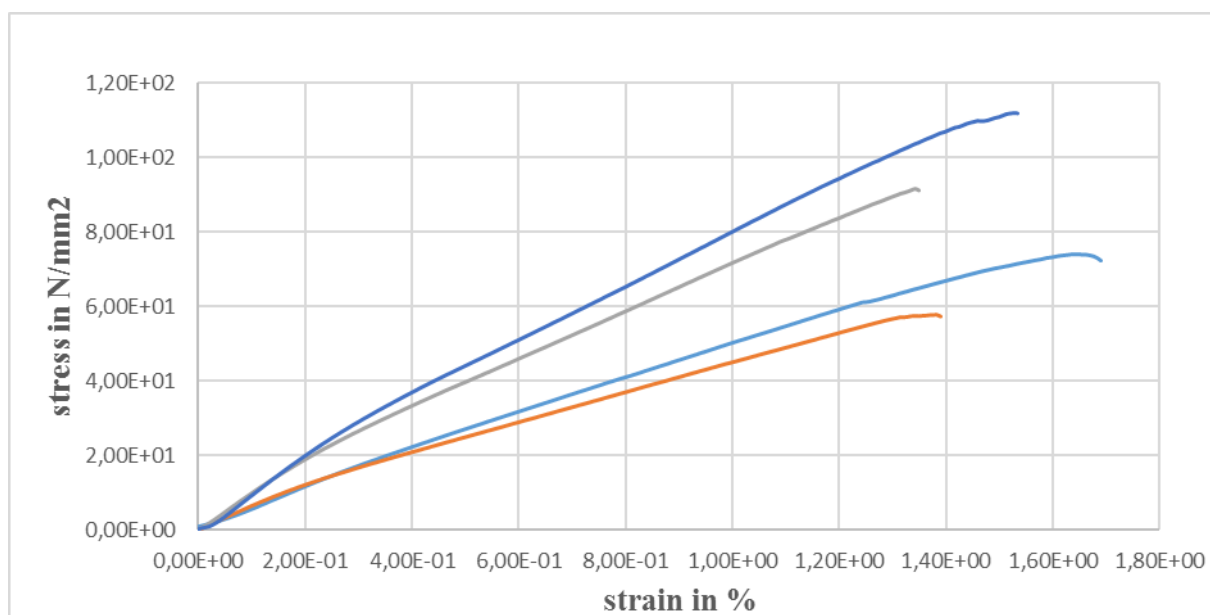


Figure IV. 15.courbe de traction des matériaux composites (01%).

Tableau IV. 8.caractéristiques et contraintes a la rupture et module d'élasticité en traction des matériaux composites (1%)

Nr	A ₀ (mm)	B ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (μm)	σ-F _{max} (μm)	E _{mod} (N/mm ²)
1	1.4	24	150.00	74.06	72.35	2536.01	2463.98	4921.08
2	1.4	24	150.00	57.73	57.28	2084.68	2074.06	6547.99
3	1.4	24	150.00	91.40	90.99	2023.76	2013.67	10206.32
4	1.4	23	150.00	111.81	111.71	2301.79	2291.59	10751.56

IV.4.6.3. courbe de comportement en traction des matériaux composites (témoin)

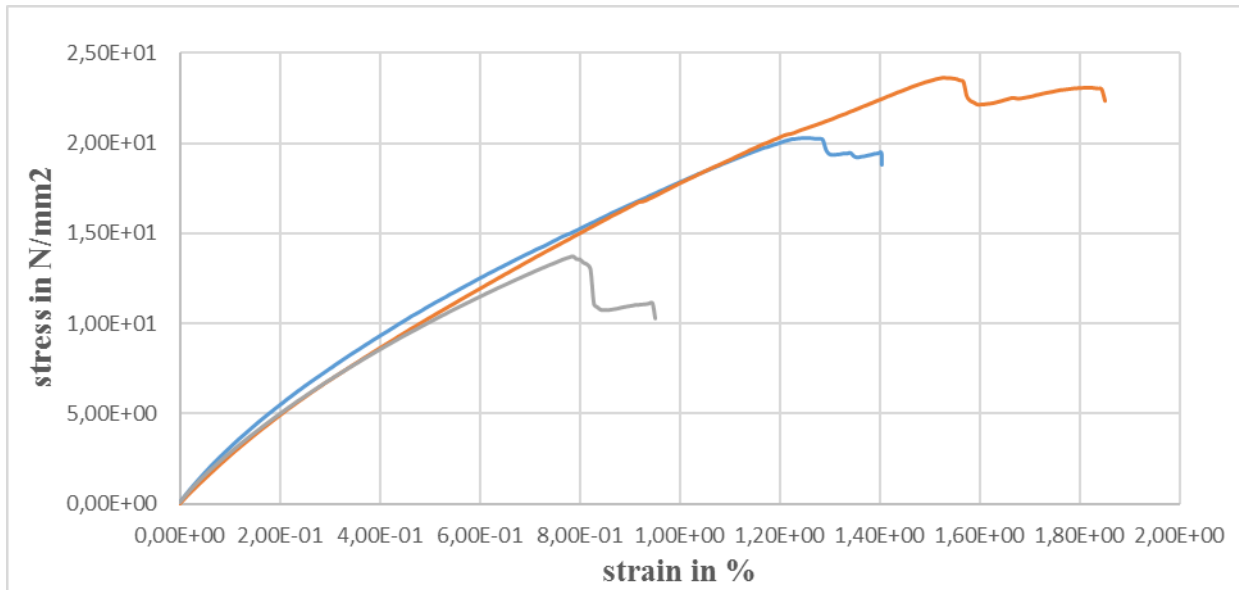


Figure IV. 16. courbe de traction des matériaux composites (témoin).

Tableau IV. 9.: caractéristiques et contraintes à la rupture et module d'élasticité en traction des matériaux composites témoin

Nr	A ₀ (mm)	B ₀ (mm)	L ₀ (mm)	F _{max} (N/mm ²)	F _{rupt} (N/mm ²)	σ-rupt (μm)	σ-F _{max} (μm)	E _{mod} (N/mm ²)
1	2.2	27.00	150.00	30.33	111.71	2301.79	1886.78	2525.97
2	2.2	27.00	150.00	23.63	22.35	2775.03	2287.75	2290.42
3	2.2	27.00	150.00	13.77	22.35	2775.03	1180.64	2235.34

Pour le matériau composite :

On remarque que les conséquences du traitement des fibres et le dosage du NaOH se répercute sur la résistance du matériau composite lui-même.

Le matériau composite obtenu avec les fibres traitées à 1% est plus résistant et résilient dont les résultats sont :

Contraintes 5.10 à $1,10 \cdot 10^2$ N/mm² et la déformation est de 1,30 à 1,70 % ce qui est bien supérieur à l'échantillon témoin ainsi qu'à la capacité de l'échantillon ayant subi un traitement de ses fibres à un dosage de 1% de concentration de la solution NaOH.

A la fin on conclut que les fibres traitées par NaOH 1% sont les plus résistantes.

Conclusion

Conclusion :

Notre conclusion s'articule autour des résultats pour différents traitements des fibres avec une solution de NaOH avec une concentration de 0,5% et 1% . Ce traitement est effectué pour permettre aux fibres d'avoir une meilleure résistance et durabilité .

Une fois bien séchées , ces fibres sont soumises aux essais à la traction pour mesurer la force de traction limite et les déformations inhérentes.

Pour cela l'échantillon témoin reste la référence . Les résultats obtenus sont sans discernement les suivants :

pour l'échantillon témoin : une contrainte allant de 8.10^2 à 1.10^3 N/mm² pour une déformation de 1% à 1,75 %.

Pour l'échantillon traité avec la solution NaOH à 1% , les résultats obtenus sont la suivants:

Une contrainte allant 1.10^3 à $2,25 .10^3$ et une déformation supérieure à 2%.

Pour l'échantillon ayant subi un traitement avec la solution de NaOH concentrée à 0.5% les résultats obtenus sont les suivants:

Une contrainte allant 4.10^2 à $9 .10^2$ N/mm² et une déformation maximale de 2,5 %.

On conclut pour les fibres qu'un dosage donne une contrainte de traction maximale de 2,25 fois supérieur à celle appliquée à l'échantillon témoin et une déformation de 0,25 % supérieure. On voit bien la faiblesse des résultats concernant les contraintes maximales pour un dosage de 0.5%.

Pour le matériau composite :

On remarque que les conséquences du traitement des fibres et le dosage du NaOH se répercute sur la résistance du matériau composite lui-même.

Le matériau composite obtenu avec les fibres traitées à 1% est plus résistant et résilient dont les résultats sont :

Contraintes 5.10 à $1,10 .10^2$ N/mm² et la déformation est de 1,30 à 1,70 % ce qui est bien supérieur à l'échantillon témoin ainsi qu'au capacités de l'échantillon ayant subi un traitement de ses fibres à un dosage de 1% de concentration de la solution NaOH.

Il est important de moduler la quantité de fibres par rapport au volume de la matrice afin d'obtenir encore des résultats plus probants .

Référence et bibliographie

- [1] C.A.R.M.A Centre d'animation régional en matériaux avancées (GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES). Actualisation October 2006.
- [2] Khalafa. Amar, Etude de comportement mécanique d'un matériau composite stratifié. Mémoire de magister, M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algerie. 2010.
- [3] Dalmaso et J. Mézières, Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites, Institut Français du Pétrole. 1998.
- [4] 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.
- [5] P. V. Joeseph, G. Mathew, K. Joeseph, G. Groeninckx, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, Comp. Part A. 34, 275-290, (2003).
- [6] **L.Guillaumat, F.Dau, A.Alzina, Cours matériaux composites « Matériaux composites et fiabilité » (le 28 janvier 2008, Clermont-Ferrand).**
- [7] **Gilbert CHRETIEN «matériaux composites à matrice organique». Mars 1986 Paris**
- [8] **Nadia BEHLOULI « Cours matériaux composites » « <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/matériaux-composites/comp0.htm> ».**
- [9]CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [10]**V.Pauchard, H.Boulharts, F.Grosjeani, P.Odru, A.Chateau Minois**, « Développement d'un modèle de durabilité de poutres composites unidirectionnelles renforcées par des fibres de verre »,Rev, IFP, Vol.56, No.6, pp.581-595, 2001.
- [11] C. Baley, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites ». Techniques de l'Ingénieur, Paris, (2005), AM 5 130, pp 1-12.
- [12] J. Taboni et X. Yu, « Composites non tissés avec des fibres naturelles et PP recyclés pour les applications intérieures en automobile ». Rapport sur les non tissés à base de matériaux recyclés, (2009), pp. 1-15.
- [13] A.K. Bledzki, V.E. Sperber et O. Faruk, « Natural and wood fibre reinforcement in polymers ». Rapra Review Reports: Expert overviews covering the science and

technology of rubber and plastics, ISSN: 0889-3144, (2002), Vol. 13, pp. 1-144.

[14] S. Bouzouita, « Optimisation des interfaces fibre/matrice de composites à renfort naturel ». Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, (2011), 179 p.

[15] H. Bindi, J. Léveque et A. Parisse, « Les fibres composites d'origine naturelle ». Les 6èmes rencontres technologiques sur les matériaux innovants et composites, la Valette du Var, France, 27 et 28 septembre 2006.

[16] D. Hammiche, « Effet d'un nouvel agent compatibilisant PVC-g-MA sur les performances des composites polychlorures de vinyle /Alfa ». Thèse de doctorat, Université de Bejaia, Algérie, (2013), 163 p.

[17] C. Pouteau, « Matériaux composites à renforts fibres naturelles d'origine végétale ». Supplément Technique n°7, (2004), pp. 1-2.

[18] JONES, R.M. « Mechanics of composite materials. » Washington D.C., USA: Scripta Book Company, 1975, 355 p. ISBN 0070327904

[19] REINHART, T.J. & CLEMENTS, L.L., Introduction to composites. Engineered materials handbook - Volume 1: Composites. Ohio, USA: ASM International, 1993, p. 27-34. ISBN 0871702797 (v.1)

[20] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.

[21] Christophe Binétruy, "Structures sandwiches," Techniques de l'ingénieur, vol. 1, no. AM5141. 2012.

[22] Diab, Sandwich Concept. 2006.

[23] Courant.R et Tillbert.D, Methods of Mathematical Physics, New York: Interscience Publishers Inc., 1953, pp. ,Vol. 1, Chap.V I,.

[24] Heckl.M, «Vibrations of Point-Driven Cylindrical Shells,» Journal of Acoustical Society of America, vol. 34(10), pp. 1553-1557, 1962.

[25] Wilkinson.J.P.D, «Modal Densities of Certain Shallow Structural Elements,» Journal Acoustic Society of America, vol. 43(2), pp. 245-251, 1968.

[26] Erickson.L, «Modal Densities of Sandwich Panels: Theory and Experiment,» The Shock and Vibration Bulletin, vol. 39(3), pp. 1-16, 1969.

[27] Renji.K, Naira.P.S et Narayananb.S, «Modal Density of Composite Honeycomb Sandwich

Panels,» Journal of Sound and Vibration, vol. 195(5), pp. 687-699, 1996.

[28] Ghinet.S et Atalla.N, «Vibro-acoustic Behavior of Multi-Layer Orthotropic Panels,» Canadian Acoustics, vol. 30(3), pp. 72-73, 2002.

[29] Berthelot.J-M, Composite Materials, Mechanical Behavior and Structural Analysis, New York: Springer-Verlag, 1999.

- [30] Batoz.J-L et Dhatt.G, Modélisation des Structures par Éléments Finis, Hermes, 2002.
- [31] Ghinet.S et Atalla.N, «Vibro Acoustic Behaviors of Flat Sandwich Composite Planels,» Transactions of the CSME de la SCGM, vol. 30(4), 2006.
- [32] Tongan.W, Shan.Li et Steven.R.N, «Optimal Design of Acoustical Sandwich Panels With a Genetic Algorithm,» University of Southern California, 2009.
- [33] R. Stewart, "At the core of lightweight composites," Reinf. Plast., vol. 53, no. 3, pp. 30–35, 2009, doi: 10.1016/S0034-3617(09)70112-2.
- [34] Experts of the European Scientific Council of the European Cofederation of Flax and Hemp, Flax and Hemp Fiber Composites, a market reality, JEC Group. 2018.
- [35] Bourouis Fairouz : Etude du comportement mécanique de structures sandwichs a différents matériaux de revêtements, mémoire de magister, université Constantine, 2005.
- [36] Selmi Saber " Etude du comportement mécanique des composites sandwichs en fibres naturelles" . Mémoire de maîtrise . Trois rivières , Québec . 2019.
- [37] Y.Mouton , M.de loncamp, Histoire des matières plastiques, aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau , le 15 octobre 2007.
- [38] www.agmat.asso.fr , la lettre de l'agence Rhône-Alpes pour la maîtrise des matériaux ,Numéro 9 Janvier/Mars (2004).
- [39] www.nova-institut.com
- [40] L.Berreur , B.de Maillard , S. Nosperger , "l'industrie Française des matériaux composites" , études stratégiques.
- [41] 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.
- [42] F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse de doctorat, université Laval, 2003.
- [43] 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.

- [44] Pickering KL, Beckermann GW, Alam SN, Foreman NJ. Optimising industrial hemp fibre for composites. *Composites: Part A*, Vol. 38, pp. 461–468, 2007.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Bos HL, Donald AM. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres. *Journal of Materials Science*. pp. 221-274, 1999.
- [48] Sarén MP, Serimaa R. Determination of microfibril angle distribution by X raydiffraction. *Wood Science and Technology*. Vol. 40, N°6, pp. 445-460, 2005.
- [49] Baley C. *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Vol. 5. Techniques de l'ingénieur, 2008
- [50] Bos H. *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*. Thèse de doctorat, Eindhoven, 2004.
- [51] 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.
- [52] 31.Thiery JP. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fine en microscopie électronique. Vol. 6, pp. 987.1967.
- [53] Jean-Louis Pariente, Pierre. *Histoire des Matériaux ou de l'âge de pierre aux matières plastiques*. *Progrès en Urologie*, 15. 863-864. 2005.
- [54] 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
- [55] A, Davies P, and Baley C, (2011), "Environmental impact analysis of the production of flax fibres to beused as composite material reinforcement";*Journal of biobased materials and bioenergy*, 5: p.1-13
- [56] Berthelot J.M. *Matériaux Composites. Comportement mécanique et analyse des structures*. 4eme édition 2005. Ed. Lavoisier. ISBN : 2-7430-0771-0.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement au c des matériaux composites. Les matériaux étudiés sont des stratifiés construits d'une matrice époxyde, renforcée par des fibres de verres traité par la solution NAOH (0.5% et 1%).

Ce mémoire se compose de quatre chapitres. Le premier chapitre présente les généralités des matériaux composites, leurs classification, leurs avantages et inconvénients , leurs structures ,leurs différentes familles, leurs considération d'usage et en fin leurs méthodes de moulage. Dans le chapitre 2, on a présenté les fibres naturelles qui sont spécialisés dans l'augmentation de la résistance, la classification des fibres naturelles, ces propriétés mécaniques , les structure et morphologie des fibres lignocellulosiques et les structure et composition des fibres végétales ,**le mode de fabrication et surtout leurs utilisations**,. La méthode de calcul des matériaux composites et en fin une petite historique et le rôle et la méthode d'assemblage des panneaux sandwiches.

Dans le chapitre 3, une large définition de lin, sa culture, le marché et les quantités produites et leurs utilisations et en fin les caractéristiques mécanique et physique de la fibre de lin et la matrice.

Dans le chapitre 4, une représentation bien définie des matériaux utilisé, l'élaboration des éprouvettes, le traitement des fibres, une explication de l'essai de traction et à la fin une analyse des résultats.

Summary

The main objective of this work is to study the behavior of composite materials. The materials studied are laminates constructed from an epoxy matrix, reinforced with glass fibers treated with NaOH solution (0.5% and 1%).

This thesis consists of four chapters. The first chapter presents the generalities of composite materials, their classification, their advantages and disadvantages, their structures, their different families, their consideration of use and finally their molding methods.

In chapter 2, we presented the natural fibers which are specialized in the increase of the resistance, the classification of the natural fibers, these mechanical properties, the structure and morphology of the lignocellulosic fibers and the structure and composition of the vegetable fibers, the mode of manufacture and especially their uses,. The method of calculating composite materials and finally a little history and the role and method of assembling sandwich panels.

In chapter 3, a broad definition of flax, its culture, the market and the quantities produced and their uses and finally the mechanical and physical characteristics of the flax fiber and the matrix.

In chapter 4, a well-defined representation of the materials used, the development of the specimens, the treatment of the fibers, an explanation of the tensile test and at the end an analysis of the results.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة السلوك C للمواد المركبة. المواد المدروسة عبارة عن شرائح مصنوعة من مصفوفة إيبوكسي، معززة بألياف زجاجية معالجة بمحلول NaOH (0.5 % و 1 %).

تتكون هذه الأطروحة من أربعة فصول. يعرض الفصل الأول عموميات المواد المركبة ، وتصنيفها ، ومزاياها وعيوبها ، وتركيبها ، وعائلاتها المختلفة ، ومراعاة استخدامها ، وأخيراً طرق تشكيلها.

في الفصل الثاني، قدمنا الألياف الطبيعية المتخصصة في زيادة المقاومة ، وتصنيف الألياف الطبيعية ، وهذه الخواص الميكانيكية ، وهيكل وتشكل الألياف اللجنوسيللوزية وهيكل وتكوين الألياف النباتية ، والوضع. للتصنيع وخاصة استخداماتها، طريقة حساب المواد المركبة وأخيراً القليل من التاريخ ودور وطريقة تجميع الألواح العازلة.

في الفصل 3، تعريف واسع للكتان وثقافته وسوقه وكمياته المنتجة واستخداماتها وأخيراً الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لألياف الكتان والمصفوفة.

في الفصل 4، تمثيل محدد جيداً للمواد المستخدمة، وتطوير العينات، ومعالجة الألياف، وشرح اختبار الشد وفي النهاية تحليل النتائج.