

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et informatique
Département Automatique
Spécialité master 1 Automatique et Informatique industrielle

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie
Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique

THEME

Influence de l'introduction de
particules de bois sur le comportement
mécanique d'un composite

Proposé et dirigé par :

Mme. MOHELLEBI Fadhila

Co-encadreur :

Mr. MOHELLEBI Mouloud

Réalisé par :

Mr. HAMDANI Mounir

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué sous la direction de madame Mohelbi. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour l'intérêt qu'elle a constamment porté à ce travail, ses conseils, ainsi que pour ses encouragements et sa gentillesse.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, pour avoir bien voulu examiner et évaluer ce travail.

Enfin, mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de mon travail.

Liste des figures

Figure I.1. *Matériau composite.*

Figure I.2. Les différentes formes des renforts fibres de verre [(e) f) et g)[9]]

Figure I.3. *Principaux matériaux de renfort.*

Figure I.4. *Structure cristalline du graphite.*

Figure I.5. Moulage au contact

Figure I.6. Moulage par projection

Figure I.7. Injection thermodurcissable BMC

Figure I.8. Compression thermodurcissable SMC

Figure I.9 Moulage par enroulement filamentaire

Figure I.10 Monocouche unidirectionnelle

Figure I.11 Structure d'un composite sandwich

Figure I.12 Structure d'un composite stratifié

Figure I.13 Production mondiale des matériaux composites [14]

Figure II.1. Courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{rf} < \epsilon_{rm}$)

Figure II.2. Courbe contrainte/déformation d'un composite à matrice céramique soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{rf} \epsilon_{rm}$)

Figure II.3. Evolution du facteur de concentration de contrainte avec le taux de fibres

Figure II.4. a) Montage d'une éprouvette sandwich sur une machine de flexion trois points [16], **b)** principe d'application de la charge

Figure II.5. Courbe Effort- Flèche enregistré lors d'un essai de flexion.

Figure II.6. Schéma d'un microscope optique.

Figure III.1. Coupe transversale et radiale d'un billon.

Figure III.2. Coupe transversal d'un tronc d'arbre.

Figure III.3. Représentation des couches constituant la paroi cellulaire.

Figure III.4. Teneurs de différentes couches de la paroi cellulaire en cellulose, hémicellulose et lignine.

Figure III.5. La structure de la cellulose.

Figure III.6. Liaisons hydrogène entre deux chaînes de cellulose.

Figure III.7. La structure des chaînes des hémicelluloses.

Figure III.8. Interfaces cellulose/hémicelluloses/lignine

Figure III.9. Les monomères de la lignine.

Figure IV.1 comportement de la résine polyester en fonction du temps

Figure IV.2. Résine à l'état liquide.

Figure IV.3. Durcisseur pour résine Polyester.

Figure IV.4. Balance.

Figure IV.5. Mélangeur électrique.

Figure IV.6. Fibre de verre tissée.

Figure IV.7. Charges de bois utilisés pour la préparation du composite.

Figure IV.8. Cire de démoulage Tr 104.

Figure IV.9. Moule utilisé pour l'élaboration du matériau composite.

Figure IV.10. Schéma détaillé d'un microscope optique.

Figure IV.11. Machine de traction de marque Zwick.

Figure IV.12. Machine de flexion de marque Zwick/Roell

Figure IV.13. Principe de l'essai de flexion 3 points.

Figure IV.14. Test de dureté Vickers.

Figure IV.15. Duromètre

Figure IV.16. Mouton de Charpy.

Figure V.1 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester

Figure V.2 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée de bois rouge à de granulométrie supérieur à 2mm

Figure V.3 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois rouge de granulométrie entre 2mm et 1mm

Figure V.4 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois rouge de granulométrie entre 1mm et 0,8mm

Figure V.5 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois blanc de granulométrie a) supérieur à 2mm, b) granulométrie entre 1mm et 2mm

Figure V.6 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois blanc de granulométrie a) supérieur à 2mm, b) granulométrie entre 1mm et 2mm

Figure V.7 courbe force-flèche du matériau résine polyester

Figure V.8 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois rouge granulométrie supérieur à 2mm

Figure V.9 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois rouge granulométrie supérieur à 1mm et inférieur à 2mm

Figure V.10 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois rouge granulométrie supérieur à 0,8mm et inférieur à 1mm

Figure V.11 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois blanc granulométrie supérieur à 2mm

Figure V.12 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois blanc granulométrie supérieur à 1mm et inférieur à 2mm

Figure V.13 la superposition des courbes force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois rouge et bois blanc.

Figure V.14 courbe force-déplacement de l'essai de flexion de la résine renforcée en fibre de verre

Figure V.15 courbe force-déplacement de l'essai de flexion du matériau composite renforcé en fibre de verre et chargé en bois rouge de granulométrie supérieure à 2mm

Figure V.16 courbe force-déplacement de l'essai de flexion du matériau composite renforcé en fibre de verre et chargé en bois rouge de granulométrie entre 2mm et 1mm.

Références

[1]- M.GEIER ,D.DUEDAL «Guide pratique des matériaux composites», TEC & DOC (Lavoisier), Paris, 1985, 349P.

[2]- J.M.BERTHELOT«Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures », Ed. MASSON, Paris, 1992, 620P.

[3]- W.KURZ, J. P. MERCIER, G.ZAMBELLI «Traité des matériaux: Introduction à la science des matériaux», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1995, 404P.

[4]- J.WEISS, C. BORD «Les matériaux composites, Tome I: Structure, constituants, fabrication», Ed. l'Usine nouvelle, Paris, 1983, Partie: A-B-C.

[5]- TEC & DOC «Guide de la technique -2-: Métaux, Liants, Plastiques, Composites, Matières vivantes», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1991, PP: 143-148.

[6]- J. PABIOT«Plastiques renforcés: Propriétés mécaniques, Calcul», Techniques de l'ingénieur, Paris, 1987, PP: A3245 (1-13).

[7]- A. DESSARTHE, H. GUYOT, M. CARAYOL «Techniques de fabrication de pièces mécaniques en plastiques ou composites», Centre Technique des Industries Mécaniques (CTIM), Paris, 1994, 226P.

[8]- H. OSMANI «Rupture des composites céramique–céramique à fibres», thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1989, 226p.

[9]- T. CHOU, R. Mc CULLOUGH, B. PIPES «Les composite», Pour la science, Déc.1987, PP: 147158.

[10]- S. LAROSE, J. J. BARRAU «Mécanique des Structures, Tome 4: Calcul de structures en matériaux composites», EYROLLES-MASSON, Paris, 1987, 276P.

[11]- D. GAY «Matériaux composites», HERMES, Paris, 1997, 672P.

[12]- P. CANARD «Monographies des thermodurcissables: Polyesters insaturés», Techniques de l'ingénieur, Paris, 1985, PP: A3445- (1-17).

[13]- Bonwell and Mc. Cash, Fundamentals of molecular spectroscopy

[14]- Docteur de l'Université de Bretagne Sud Mention Sciences pour l'Ingénieur Par Yves Perrot
Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène]

[15]- [L'industrie française des matériaux composites. Etude stratégique réalisée par pour le compte de la DiGITIP / SIM Rapport final. Louis Berreur Bertrand de Maillard Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger 17 décembre 2001]

[16]- ELABORATION ET CARACTERISATION D'UN COMPOSITE SANDWICH A AME EN LIEGE RENFORCE DE JUTE ET ENVELOPPES EN BOIS. Lakreb N I1, Bezzazi B.1

Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE), Université M'Hamed Bougara, Boumerdès. Cité Frantz fanon, 35000 Boumerdès. lakrebnadia@hotmail.fr, bbezzazi@yahoo.fr

[17]- Ressources naturelles Canada, www.rncan.gc.ca (dernière visite 12/06/2009).].

[18]- P. CANARD «Monographies des thermodurcissables: Polyesters insaturés», Techniques de l'ingénieur, Paris, 1985, PP: A3445- (1-17).

[19]- J.WEISS, C. BORD «Les matériaux composites, Tome I: Structure, constituants, fabrication», Ed. l'Usine nouvelle, Paris, 1983, Partie: A-B-C.

[20]- M.GEIER ,D.DUEDAL «Guide pratique des matériaux composites», TEC & DOC (Lavoisier), Paris, 1985, 349P.

[21]- Herrera-Franco P.J., Valadez-González A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering* **36B**(8):597-608 (2005).

[22]- Chudnoff M. *Tropical Timbers of the World*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 826 p.(1980).

[23]- Van Acker J., Militz H., Stevens M. The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. *Holzforschung* **53**(5):449-458 (1999).

[24]- Stark N.M., Rowlands R.E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science* **35**(2):167-174 (2003).

[25]- Djiporovic M., Dingova E., Miljkovic J., Popov-Pergal K. The influence of different coupling agents on some properties of polypropylene-wood composites. *Materials Science Forum* **413** (Contemporary Studies in Advanced Materials and Processes):219-223 (2003).

[26]- Magne M., El Kasmi S., Dupire M., Morard M., Vaca-Garcia C., Thiébaud-Roux S., Peydecastaing J., Borredon E., Gaset A. *Method for treating lignocellulosic materials, in particular wood and material obtained by said method*. WO 03/084723, 16 October 2003, (2003).

[27]- Pandey K.K. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. *Polymer Degradation and Stability* **90**(1):9-20 (2005).

Liste des tableaux

Tableau I.1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.

Tableau I.2. Différents types de verres filables.

Tableau I.3. Propriétés mécaniques des fibres à hautes performances mécaniques [2, 3, 4, 11]

Tableau III.1. Taux de cellulose, hémicellulose et lignine du bois

Tableau III.2. Composition chimiques de quelques fibres végétales.

Tableau IV.1 : Propriétés de la résine d'impregnation «UP» non renforcée [19]

Tableau IV.2. Fiche technique de la résine.

Tableau V.1 : Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527.

Tableau V.2. Dimensions en mm des éprouvettes de flexion, selon la norme ISO 178.

Tableau V.3. Dimensions en mm des éprouvettes de résilience, selon la norme ISO 148.

Tableau V.4. Résilience des matériaux composites élaborés.

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	-----------

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1. Définition d'un matériau composite.....	03
I.1.1.Caractéristiques générales des matériaux composites.....	03
I.1.2. Intérêt des matériaux composites	05
I.1.3. Différents types de matériaux composites.....	05
I.1.3.1. Matériaux composites de grande diffusion.....	05
I.3.2 Matériaux composites de hautes performances.....	06
I.4.Classification des matériaux composites	06
I.4.1: Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants	06
I.4.1.a. Composites à fibres	06
I.4.1.b. Composites à particules.....	06
I.1.4.2 : Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants	07
I.1.5.Constituants des Matériaux Composites	07
I.1.5.1. Les renforts	08
I.1.5.1.1. Différents types de renfort	08
I.1.5.1.2. Différentes nature de renfort.....	10
I.1.5.2. Les charges et les additifs	12
I.1.5.2.1.Les charges	12
I.1.5.2.2. Les additifs	13
I.1.5.3. La matrice.....	13
I.1.5.3.1. Les différents types de matrices	13
I.1.5.3.1.1 : Les matrices organiques	13
I.1.5.3.1.2 : Les matrices carbonées.....	13
I.1.5.3.1.3 : Les matrices métalliques.....	14
I.1.5.3.1.4 : Les matrices céramiques.....	14
I.2. La mise en œuvre des matériaux composites.....	14
I.2.1. Moulage au contact.....	14
I.2.2. Moulage par projection simultanée.....	15
I.2.3. Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound).....	15
I.2.4. Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound).....	16
I.2.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage)	16
I.3 Architecture du composite.....	17
I.3.1 Les monocouches.....	17
I.3.2. les Sandwichs.....	18
I.3.3. Les stratifiées.....	18
I.4. Caractéristiques des matériaux composites.....	19
I.5. Domaines d'application.....	19

Sommaire

Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites	22
II.2. Propriétés mécaniques des matériaux composites.....	22
II.2.1. Mode d'essais mécaniques	22
II.2.1.1.Essai de traction	23
II.2.1.1.1. Traction longitudinale.....	23
II.2.1.1.2: Traction transversale.....	25
II.2.1.2. Essai de flexion.....	27
II.2.1.2.1. Essai de flexion trois points.....	27
II.2.1.2.2. Principe de l'essai.....	28
II.2.1.3. Essai de résilience.....	29
II.3. Caractérisation morphologique.....	30
II.3.1. Observation au microscope optique.....	30

Chapitre III : Le bois dans les matériaux composites

III.1. Les composites bois-polymères.....	32
III.1.1. Le bois.....	32
III.1.1.1. L'anatomie du bois.....	32
III.2. Structure anatomique du bois.....	33
III.2.1. Les résineux.....	33
III.2.2. Les feuillus.....	33
III.3. Structure macroscopique du bois.....	33
III.3.1. Structure de la paroi cellulaire.....	34
III.3.2. La paroi primaire.....	35
III.3.3. La paroi secondaire.....	35
III.4. Structure moléculaire du bois.....	36
III.4.1. La composition chimique du bois.....	36
III.4.2. La cellulose.....	37
III.4.3. Les hémicelluloses.....	38
III.4.4. La lignine.....	39
III.5. Les composés extractibles.....	39
III.5.1. Les cendres.....	40
III.6. Adhésion fibre/matrice.....	40

Chapitre IV : Techniques Expérimentales

III.1. Matériaux utilisés	41
III.1.1 La matrice.....	41
III.1.2 Durcisseur.....	43
III.1.3 La Balance.....	43
III.1.4 Mélangeur.....	44
III.1.5 Les renforts.....	44
III.1.6 Les charges.....	45
III.1.7 La cire.....	46
III.1.8 Le moule.....	46

Sommaire

III.1.9 : Etapes suivi pour l'élaboration du matériau à étudié	47
III.2. Caractérisation du matériau composite.....	47
III.2.1 Caractérisation physique.....	47
III.2.1.1 Observation au microscopique optique.....	47
III.2.2 Caractérisation mécanique.....	48
III.2.2.1 Essai de traction.....	48
III.2.2.2 Essai de flexion.....	49
III.2.2.2.1 Essai de flexion trois points.....	50
III.2.2.3 Essai de dureté.....	50
III.2.2.3 .1 Dureté Vickers.....	50
III.2.2.3.2 La micro dureté.....	51
III.2.2.4 Essai de résilience.....	51

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1 Résultats de la caractérisation mécanique	53
V.1.1.Résultats de l'essai de traction.....	53
V.1.1.1Résultats de l'essai de traction de la résine seule.....	54
V.1.1.2Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois.....	54
V.1.1.2.1.Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois rouge.....	55
V.1.1.2.2.Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois blanc.....	56
V.1.1.3 Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois rouge et renforcé en fibre de verre.....	57
V.1.2 Résultats de l'essai de flexion.....	57
V.1.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine seule.....	58
V.1.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois.....	58
V.1.2.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois rouge.....	58
V.1.2.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois blanc.....	60
V.1.2.3. Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois et renforcée en fibre de verre.....	62
V.1.2.3. Résultats de l'essai de flexion de la résine renforcée en fibre de verre.....	62
V.1.2.3.1. Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois rouge et renforcée en fibre de verre.....	63
V.1.3 Résultats de l'essai de résilience.....	64

Conclusion générale	66
---------------------------	----

Références

Annexes

Introduction générale

On définit les civilisations par les matériaux qui ont permis à l'homme de construire les matériaux, âge de la pierre, âge du bronze, âge de l'acier, âge de l'aluminium. A l'aube du XXIème siècle, c'est le début de l'ère des matériaux composites [1].

Les matériaux composites sont vieux comme le monde. Il y a plusieurs millénaires, les artisans de l'Egypte ancienne augmentaient les propriétés mécaniques des briques par une adjonction de paille courte à l'argile fraîche, citant aussi l'adjonction de ballots de papyrus dans une matrice de bitume améliore la qualité des canoës. La combinaison de deux phases caractérisées par des propriétés complémentaires se retrouve dans la nature, l'os (mélange complexe de collagène et de phosphate de calcium) [1].

L'utilisation de fibres végétales en tant que renfort d'une matrice plastique est une pratique devenue courante notamment en Amérique du Nord, le principal marché étant le platelage (*decking*). En Europe, le secteur automobile développe et conçoit de nouveaux véhicules intégrant ces matériaux offrant un gain technique et environnemental conséquent par rapport aux matériaux composites classiques à base de fibres de verre.

Dans le secteur du bâtiment, les fibres végétales sont utilisées pour leurs capacités isolantes thermique et phonique. Associées à une matrice plastique, elles ne trouvent actuellement que peu d'applications. Pourtant, ces composites pourraient être une alternative écologique pour certaines pièces plastiques ou métalliques des bâtiments : cadres de fenêtres et portails par exemple, répondant ainsi au concept d'éco-conception.

Les matériaux composites plastiques/bois permettent d'associer les avantages du plastique à ceux du bois :

- la légèreté du bois représente un avantage considérable,
- ils présentent une rigidité supérieure par rapport à celle du plastique,
- il existe des possibilités de mise en forme plus nombreuses que pour le bois,
- les traitements de surface peuvent ne plus être nécessaires,
- le matériau composite peut être conçu pour être potentiellement recyclable.

Ainsi, la fabrication de matériaux composites à base de résine polyester renforcée par des fibres de bois apporterait en plus, un gain environnemental conséquent à deux niveaux :

- en remplaçant, en partie, une matière issue pour moitié de ressources fossiles par une matière renouvelable,
- et en prolongeant la durée de vie utile du bois qui participe au stockage de carbone.

L'objectif de ce travail est l'élaboration puis la caractérisation d'un matériau composite en résine polyester renforcé par des fibres de bois rouge ou bois blanc. Dans un premier temps, nous avons chargé de la résine polyester avec de la sciure de bois blanc et de hêtre (bois rouge) à différents granulométries. Dans un second temps nous avons considéré de la résine polyester renforcée avec de la fibre de verre et chargée avec de la sciure de bois rouge. Nous jugé inutile de renforcer la le composite résine/fibre de verre avec de la sciure de bois blanc étant donné les résultats faibles obtenus avec la résine seule.

Après élaboration des composites, un certains nombre de caractérisation a été effectué à savoir : la caractérisation mécanique (Test de traction, flexion, résilience et test de dureté), la caractérisation métallographique.

Pour mener à bien ce travail, nous avons élaboré le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur les matériaux composites.
- Le second chapitre présente une revue bibliographique des procédés de mise en œuvre pour la réalisation des matériaux composites et des essais de caractérisation utilisés pour leur étude.
- Le troisième chapitre donne les principales généralités sur le bois, matériau utilisé pour la réalisation du matériau composite.
- Le quatrième chapitre concerne les matériaux utilisés, les méthodes de traitement, la préparation des composite Résine/charge de bois et Résine/fibre/charge de bois issue de déchet menuiserie et les différentes techniques de caractérisation utilisées.
- La discussion des résultats est réalisée dans le cinquième chapitre.

Enfin, une conclusion générale permet de résumer les résultats essentiels obtenus lors de la réalisation de ce travail.

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Introduction

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allégement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre.

Un matériau composite résulte de l'association de deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour tenter d'accroître leurs performances. Les deux constituants du composite sont la matrice et le renfort, qui en se combinant donnent un matériau hétérogène souvent anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés diffèrent suivant les directions. Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques requises, la résistance à la chaleur ou à l'eau ? Ou même la méthode de mise en œuvre.

Dans ce chapitre, nous allons définir les matériaux composites, leurs composants, les différents types de matériaux composites ainsi que leurs domaines d'applications.

I. Définitions

I.1. Définition d'un matériau composite

Dans un sens large, le mot « composite » signifie « constitué deux ou plusieurs parties différentes ». En fait, l'appellation *matériau composite* ou *composite* est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, ce complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau 1.1.

I.1.1. Caractéristiques générales d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la *matrice*. La phase discontinue est appelée le *renfort* ou *matériau renforçant*. Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants,

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

- De leur distribution géométrique,
- De leurs interactions, etc.

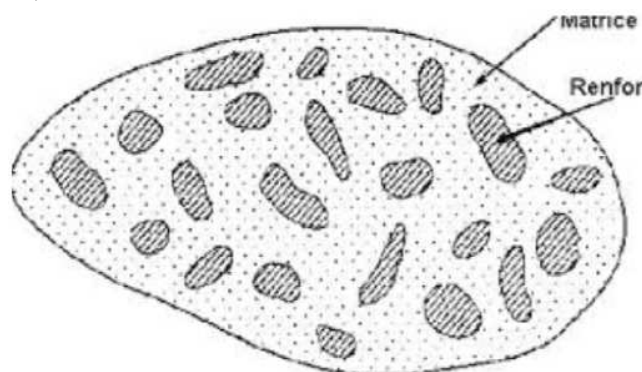


Figure I.1. Matériau composite.

Tableau I.1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1) Composites à matrice organique Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés	Résines/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Élastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2) Composites à matrice minérale Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermo-mécaniques
3) Composites à matrice métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
4) Sandwiches Peaux Ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

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

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. Si l'ensemble de ces paramètres concourt à déterminer les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique. La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une "homogénéité" du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées.

I.1.2. Intérêt des matériaux composites.

Il est communément reconnu que les matériaux composites présentent des handicaps par rapport aux matériaux métalliques bien connus dans l'industrie automobile : coût au kilogramme, cadences de fabrication des pièces, recyclabilité....

Cependant, leur utilisation, non calquée sur celle des métaux, présente de nombreux avantages qui permettent d'apporter des réponses favorables aux évolutions du produit automobile et aux attentes des utilisateurs.

I.1.3. Différents types de matériaux composites

On distingue deux types de composites: les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances.

I.1.3.a. Matériaux composites de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

I.1.3.b Matériaux composites de hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- Beaucoup de procédés encore manuels.
- MM, CMC.

I.1.4. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés selon deux critères :

I.1.4.1. Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants

I.1.4.1.a. 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 soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, 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 isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur :

- La nature des constituants,
- La proportion des constituants,
- L'orientation des fibres,

suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques.

I.1.4.1.b. composite à particules

Un matériau composite est un composite à particule lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

I.1.4.1.c. Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés : 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. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

- Composites à *matrice organique* (résine, charges), avec :
 - des fibres minérales : verre, carbone, etc.
 - des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
 - des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.
- Composites à *matrice métallique* (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
 - des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
 - des fibres métalliques : bore,
 - des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).
- Composites à *matrice minérale* (céramique), avec :
 - des fibres métalliques : bore,
 - des particules métalliques : cermets,
 - des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrices métalliques ou minérales sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice céramique.

I.1.5. Constituants des Matériaux Composites

Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres.

La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

Le type d'association matrice-renfort dépend des contraintes imposées au concepteur : caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, coût, résistance à la corrosion, etc.

I.5.1.1 Les renforts

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécanique : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc [2]. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont :

- Caractéristiques mécaniques élevées,
- Masse volumique faible,
- Bonne compatibilité avec les résines,
- Facilité de mise en œuvre,
- Faible coût, etc

A l'exception du mica les principaux agents de renfort sont fibreux [3], et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7.

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc.

I.5.1.1 a Différents types de renfort

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.),
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.),
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.)

Des « fibres » courtes particulières, les whiskers, dont les caractéristiques mécaniques sont élevées, sont également développées. Leur utilisation est toutefois limitée du fait des difficultés de fabrication.

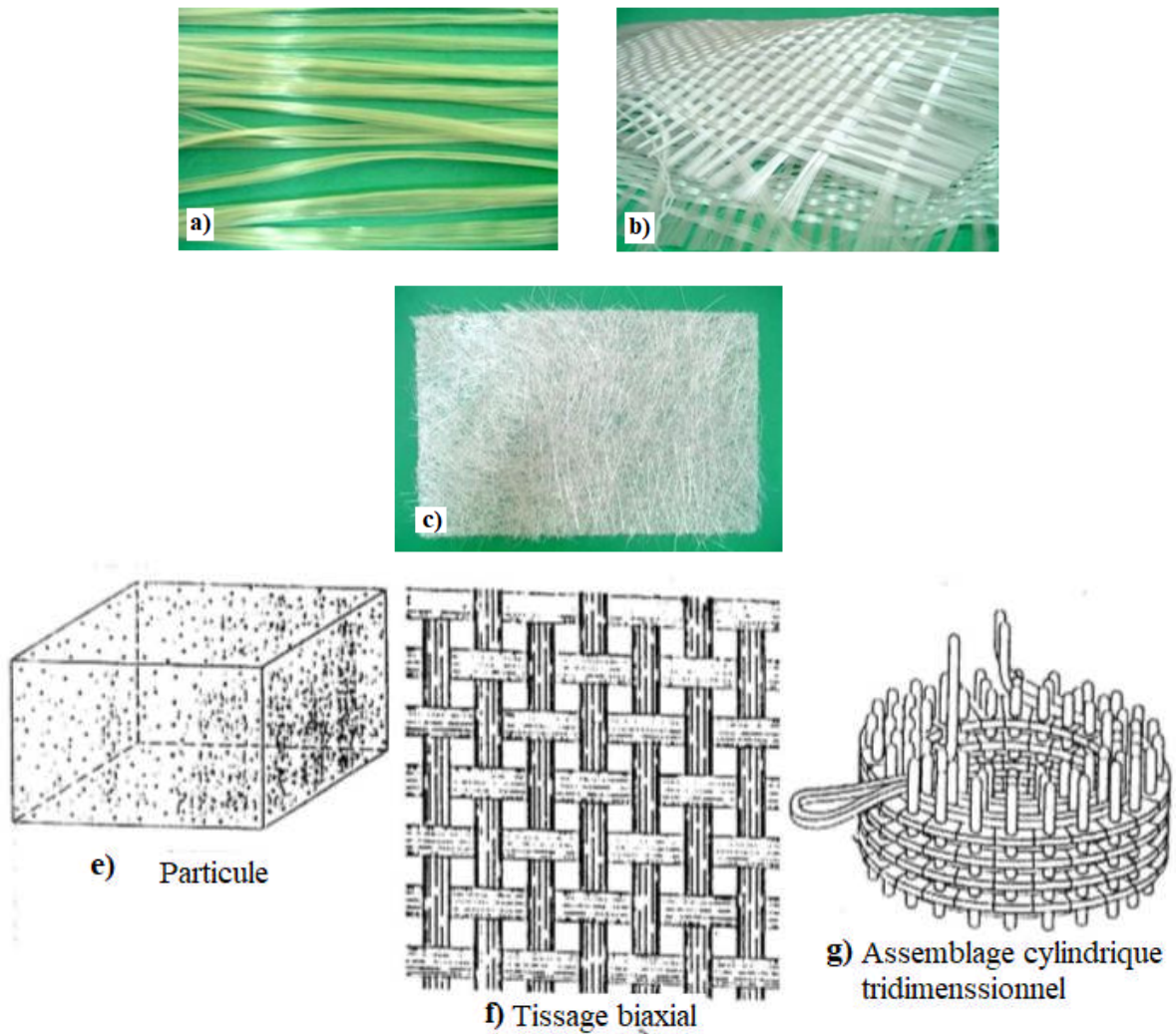


Figure I.2. Les différentes formes des renforts fibres de verre [(e) f) et g)[9]]

a). sous forme linéique. b). sous forme de tissus surfaciques. c). sous forme multidirectionnelle

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou *monofilament*. Les monofilaments sont ensuite réunis en *fils* ou *mèches* . Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou titre. Cette masse linéique est une mesure de la finesse des fils, et elle dépend du diamètre et du nombre de monofilaments. L'unité de masse linéique est le *tex*, masse d'un fil d'une longueur égale à 1 000 m. Soit :

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km.}$$

En fait, on devrait plutôt écrire :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m.}$$

I.5.1.1.b. Différentes nature de renfort

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur la figure (3) qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

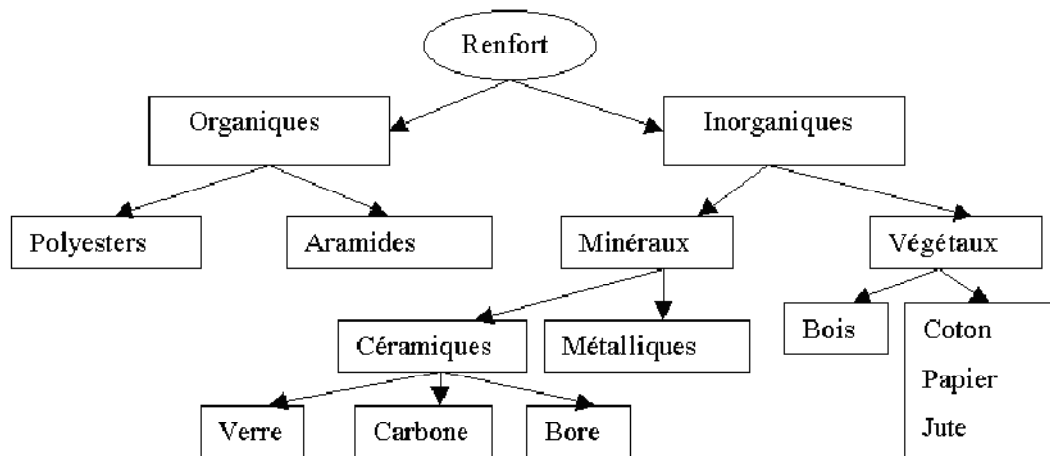


Figure I.3. Principaux matériaux de renfort.

Les renforts peuvent être d'origines diverses: [1]

- végétale: bois, coton, jute, lin, sisal;
- minérale: alumine, amiante, mica;
- synthétique: polyester, polyamide;
- artificielle: bore, carbone, SiC, acier, tungstène.

➤ Les fibres de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verres sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performance/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites.

Suivant leurs compositions, différents types de verres fiables peuvent être obtenus (tableau I.2.). Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, présentant globalement une faible quantité (environ 1%), sont réservés à des applications spécifiques :

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

- Le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications ;
- Le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique ;
- Les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

Tableau I.2. *Différents types de verres filables.*

Type	Caractéristiques générales
E	A usage général ; bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Haute résistance mécanique

➤ Les fibres de carbone

Le graphite a une structure hexagonale d'atomes de carbone, disposés en plans cristallographiques parallèles (figure I.4.). Ces plans sont décalés de telle sorte qu'un atome de carbone se projette au milieu d'un hexagone des plans voisins. Les liaisons entre atomes de carbone de plans voisins sont faibles, et confèrent au graphite de bonnes propriétés de conduction thermique et électrique. Par contre, les liaisons entre les atomes voisins d'un même plan sont fortes, et donnent au graphite des propriétés mécaniques élevées dans la direction parallèle aux plans cristallographiques. L'étude théorique des liaisons prévoit dans cette direction un module d'Young de 1 200 GPa et une résistance à la rupture de 20 000 MPa. D'autre part, la masse volumique faible (inférieure à 2 000 Kg/m³) conduit à des propriétés mécaniques spécifiques théoriques remarquablement élevées. Les fibres industrielles n'atteignent toutefois pas les valeurs mécaniques théoriques, du fait des imperfections des structures cristallines obtenues.

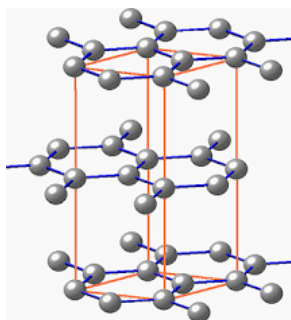


Figure I.4. *Structure cristalline du graphite.*

➤ Les fibres céramiques

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborés par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

- Les fibres de bore (B),
- Les fibres de bore (B)-carbure de bore (B_4C),
- Les fibres de carbure de silicium (SiC),
- Les fibres de bore-carbure de silicium, appelées BorSiC.

Les fibres sont en réalité de gros filaments (diamètre de l'ordre de 100 μm), formés d'une âme (le fil support) en tungstène ou en carbone d'un diamètre d'environ 10 μm , recouvert :

- D'une couche de bore d'épaisseur environ 40 μm (fibre de bore),
- D'une couche de bore d'épaisseur 40 μm et d'une couche de carbure de bore de 4 μm d'épaisseur (fibres B- B_4C),
- D'une couche de carbure de silicium (fibres SiC),
- D'une couche de bore et d'une couche de carbure de silicium (fibres BorSiC).

I.1.5.2. Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits peut varier de :

- quelques dizaines de % dans le cas des charges,
- à quelques % en moins dans le cas d'*additifs*.

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter sa mise en œuvre.

I.1.5.2.a. Les charges

Il s'agit de matières organiques, minérales, métalliques ou synthétiques permettant de modifier de manière sensible les propriétés du matériau composite.

- Organiques : fibres et poudres de cellulose, farine de bois, poudre de noyaux de fruits
- Minérales : carbonates de calcium et/ou de magnésium, silices, sulfates
- Métalliques : poudres ou paillettes de nickel, cuivre ...
- Synthétiques : microbilles de verre, silices, fibres de nylon, rylsan ...

I.1.5.2.b. Les additifs

Il s'agit de la substance ajoutée à la résine pour modifier ou améliorer le comportement rhéologique ou les propriétés du produit fini:

- accélérateurs et catalyseurs de polymérisation
- diluants
- plastifiants ou flexibilisateurs
- tensioactifs
- pigments et colorants
- anti-oxydants, anti UV, anti-ozones, antistatiques ...

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.3. Propriétés mécaniques des fibres à hautes performances mécaniques : [2, 3, 4, 11].

Fibre		Aspect	Densité	Propriétés type (prix comparé)	Diamètre Φ (μm)	Contrainte à la rupture σ_{rupture} (Mpa)	Module d'élasticité E (Gpa)	Température limite d'utilisation Tmax (°C)	Masse volumique ρ	Allongement à la rupture (%)
Fibres de verre	Verre E	Soyeux blanc	2.54	Prix / performance (1)	3 à 30	3400	73	700	2600	4.8
	Verre R ou S		2.48	Résistance en traction (4)		4400	86		2550	5.4
	Verre D		2.14	Rigidité diélectrique (15)		2500	55		2500	4.8
	Verre C		2.5	Résistance aux acides (2)		2800	70		2500	4
Fibres aramides	Kevlar 29	Soyeux jaune	1.45	Résistance en traction/ densité (12)	12	3000	70	Décomposition à 480	1400	4
	Kevlar 49			Résistance et module en traction / densité (12)		3600	130		1450	2
Fibres de carbone	Carbone HR	Soyeux noir	1.78	Haut module (60)	7	3200	220	>450	1750	1
	Carbone HM		1.80	Haut module / prix (20)	6.5	2800	400		1810	0.5
Fibres de céramiques	Bore	Métallique gris-noir	2.63	Tenue mécanique générale (200)	100 à 150	3800	430	2000	2600	0.8
	Bore carbure de bore		2.60	Tenue mécanique générale (240)		4000	430	Décomposition	2500	
	Carbure de Silicium		3.45	Tenue mécanique à haute température (280)		3900	410		2550	

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

I.1.5.3 : La matrice

De façon générale, dans un matériau composite, une *matrice* est une matière servant de liant et à transférer les efforts au renfort, qui est plus rigide et plus résistant.

Dans les composites à matrice organique (plastiques renforcés), elle est appelée **résine**.

I.1.5.3.1 : Les différents types de matrices

Il est d'usage de classer les composites par la nature de leur matrice, pour deux raisons : la matrice assure toutes les fonctions autres que la tenue mécanique (voire, dans le cas des matériaux « à grande diffusion », une partie des propriétés mécaniques), et conditionne le choix du procédé de mise en forme. On distingue habituellement trois familles :

- Les composites à matrice organique (CMO),
- Les composites à matrice céramique (CMC),
- Les composites à matrice métallique (CMM).

Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés.

➤ **I.5.3.1. Les matrices organiques**

Les matrices de ces matériaux sont des résines polymères dont :

- les thermoplastiques, constitués de longues molécules linéaires reliées par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou forces de Van der Waals) qui se cassent quand on les chauffe et se rétablissent quand on les refroidit, de manière réversible ;
- les thermodurcissables, ayant une structure moléculaire tridimensionnelle, maintenue par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes).

Les premiers sont moins rigides, moins résistants et plus ductiles que les seconds. Les matrices thermodurcissables sont plus souvent employées car plus simples à mettre en forme.

➤ **I.5.3.1.2. Les matrices carbonées**

Elles sont produites par le même principe que celui utilisé pour la production des fibres de carbones : carbonisation d'une matrice organique à haute température.

Elles sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se dépose à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celle-ci et ferme les vides laissés entre elles. On obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique se rapproche de celle du carbone massif.

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

➤ I.5.3.1.3. Les matrices métalliques

La matrice d'un CMM est généralement constituée d'un métal léger (aluminium, magnésium, titane, etc.). Le renfort se compose :

- soit de particules ou de fibres courtes céramiques qui améliorent légèrement les propriétés mécaniques de la matrice tout en permettant de conserver les procédés traditionnels de mise en forme des métaux ;
- soit de fibres longues céramiques ou métalliques qui procurent des propriétés mécaniques bien supérieures à celle de la matrice mais nécessitent des procédés de mise en forme coûteux.

➤ I.5.3.1.4. Les matrices céramiques

L'une des particularités des CMC tient à ce que leur matrice et leurs renforts sont souvent constitués du même matériau : du carbure de silicium (SiC), de l'alumine (Al_2O_3) ou du carbone (C) - qui n'est pas une céramique mais qui se comporte comme tel dans ce cas précis. La structure composite ne vient pas combiner les propriétés des constituants mais en améliorer la ténacité et la ductilité.

I.2. La mise en œuvre des matériaux composites

Nous donnons dans ce qui suit les principes de différents processus de mise en œuvre de matériaux composites. La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée *stratification*, conduisant à l'élaboration de *stratifiés*, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

I.2.1. Moulage au contact

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée «*gel coat*».

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

- 1) le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
- 2) Le renfort : mat, tissus, etc., est disposé dans le moule.
- 3) Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- 4) Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique.
- 5) Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
- 6) La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage.

- 7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

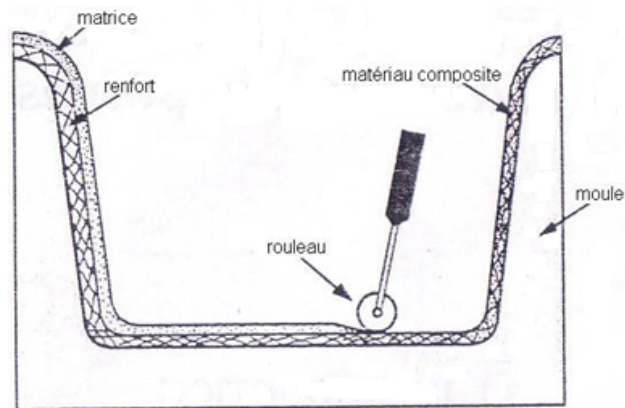


Figure I.5. Moulage au contact

I.2.2. 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 stratifil 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. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

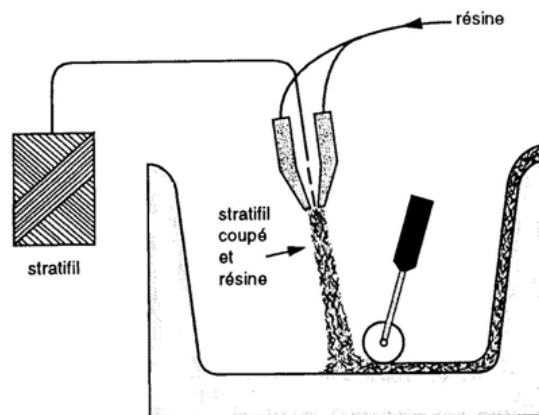


Figure I.6. Moulage par projection

I.2.3. Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound).

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars (Figure I.7.).

Les avantages de cette technique est la: réalisation de grandes séries, les pièces n'ont besoin que de peu de finition.

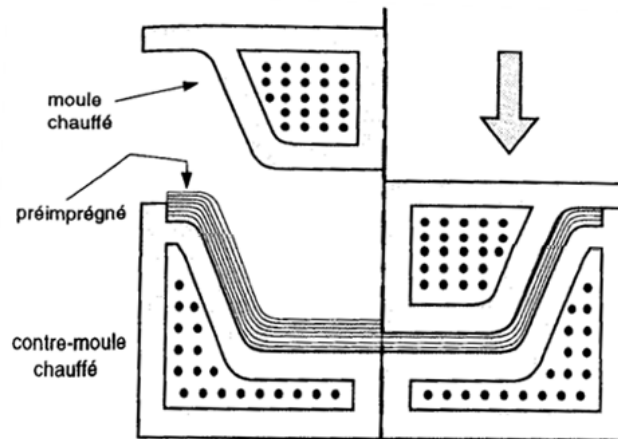


Figure I.7. Injection thermodurcissable BMC

I.2.4. Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce (Figure I.8.).

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

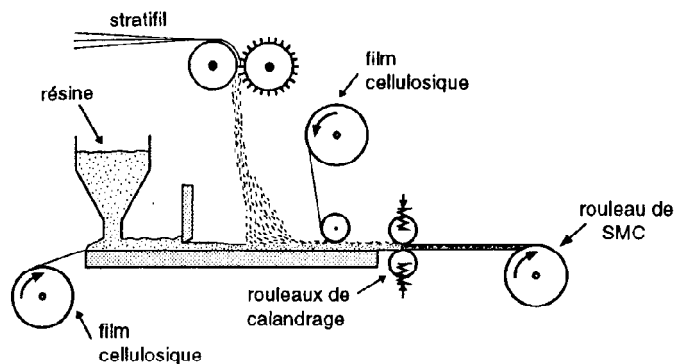


Figure I.8. Compression thermodurcissable SMC

I.2.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation (Figure I.9.).

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

élevées de renfort (jusqu'à 80% en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratification) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire.

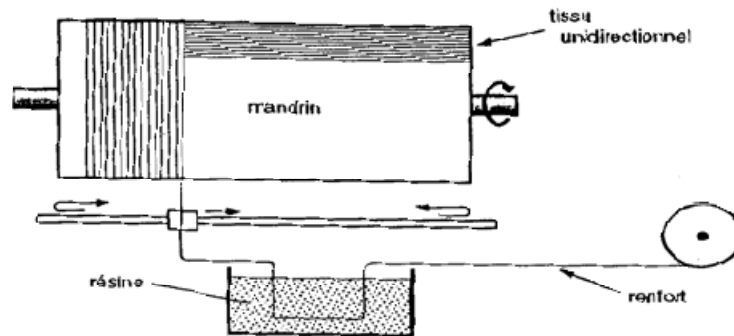


Figure I.9 Moulage par enroulement filamentaire

I.3 Architecture du matériau composite

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface : plaques, coques,
- par stratification de couches successives.

I.3 1 Les 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 continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat.

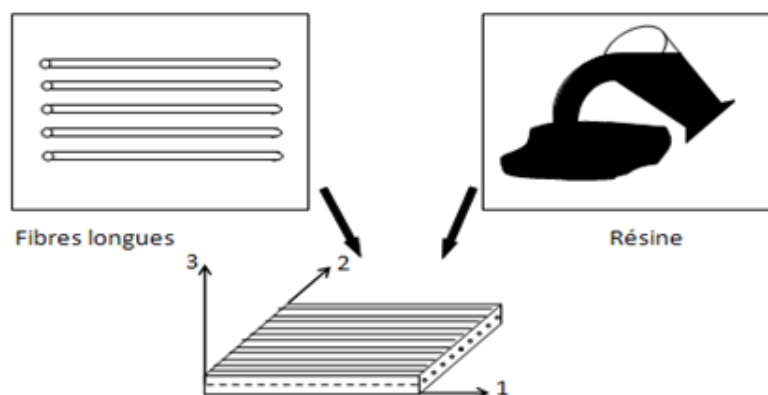


Figure I.10 Monocouche unidirectionnelle

I.3.2. les Sandwichs

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une *âme* (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux « feuilles », appelées *peaux*, possédant de caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier *légèreté* et *rigidité*.

Généralement, le choix des matériaux fait avec est dans l'objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

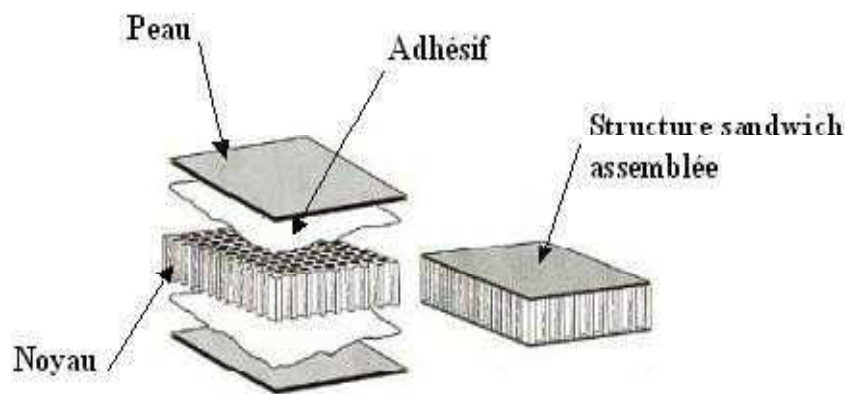


Figure I.11 Structure d'un composite sandwich

I.3.3. Les stratifiées

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Il existe divers types de stratifiés :

- Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels,
- Stratifiés symétriques,
- Stratifiés hybrides.

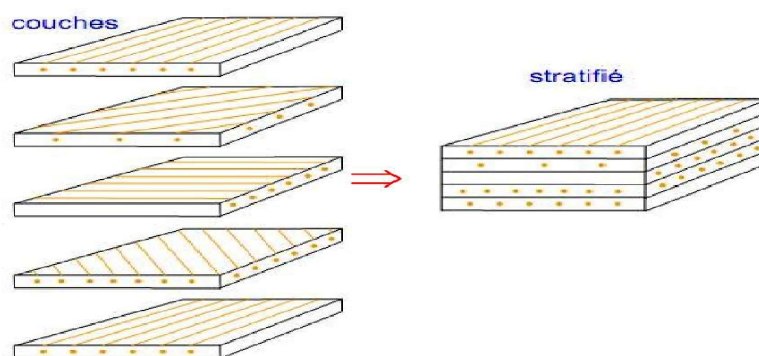


Figure I.12 Structure d'un composite stratifié

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

I.4. Caractéristiques mécaniques des matériaux composites

Le but de la mécanique est la recherche constante des matériaux les plus performants : module élevé, masse volumique faible. Il est évident également que l'élaboration de ces matériaux ne doit pas aboutir à un coût prohibitif, qui dépend d'ailleurs du domaine d'utilisation. Par exemple, dans le domaine de l'espace, de l'aviation de hautes performances sont recherchées, et le coût matériau a une incidence faible. Par contre, dans le domaine de l'automobile, l'amélioration des performances ne peut pas se faire au détriment du coût du produit fini. L'incidence du coût matériau est élevée.

Les matériaux traditionnels tels l'acier, les alliages d'aluminium, le bois, le verre ont des modules spécifiques comparables. Par contre, on constate que la contrainte spécifique du verre est nettement supérieure à celle de l'acier et des alliages d'aluminium. D'autre part, il est un fait établi que les contraintes à la rupture mesurées sur les matériaux sont bien plus faibles que les contraintes théoriques. Cette différence est attribuée à la présence de défauts ou de microfissures dans les matériaux. Pour augmenter les valeurs des contraintes à la rupture, il est alors nécessaire de chercher des processus d'élaboration qui conduisent à une diminution des défauts.

Du fait de leurs faibles sections (diamètres de 10 à 20 μm), les fibres ne peuvent toutefois être utilisées directement dans des applications mécaniques. D'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un *composite* à fibres. La matrice a alors diverses fonctions : lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, etc. Ainsi est né un nouveau matériau, modulable et présentant des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

I.5 Domaines d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer! D'où leurs domaines d'application:

- Electricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf,...)
- Construction navale....

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

La Figure 1.13 retrace l'évolution récente de la production mondiale des matériaux composites [13]. En 2000, la production Européenne représente environ les deux tiers de la production des Etats-Unis tandis que la production du Japon, bien que premier producteur de fibres de carbone, est de l'ordre de la moitié de celle des Etats-Unis. 95% des composites étant transformés à partir de fibres de verre, les polymères renforcés par ce type de fibres représentent de ce fait un bon indicateur de la production mondiale des composites.

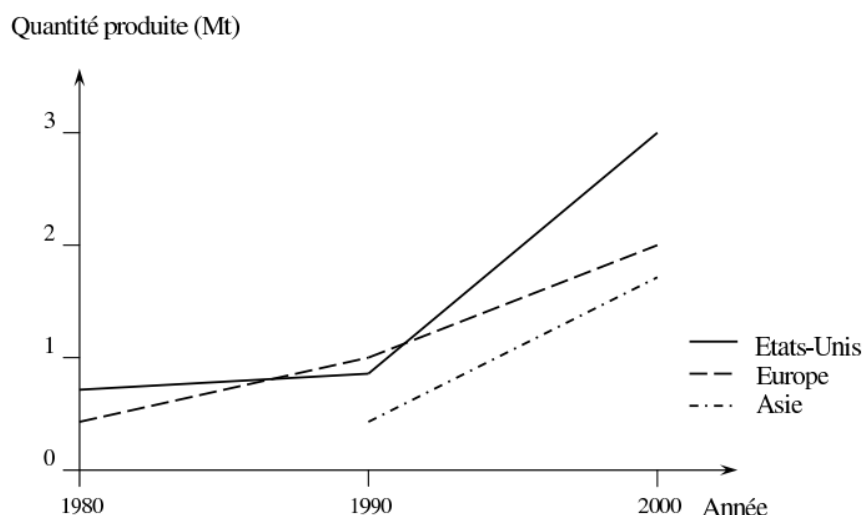


Figure I.13 Production mondiale des matériaux composites [14]

➤ Utilisation des matériaux composites en construction aéronautique

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

- des coûts élevés par rapport à l'aluminium,
- des risques de délaminage les interdisant de vol sur les structures aérodynamiques chargées. Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés, en particulier par des acteurs étrangers, par exemple :

- dans le cadre du programme Advanced Composite Technology mené par la NASA et Boeing, mise au point d'un nouveau procédé permettant de développer des ailes en composites 20% moins chers qu'avec des matériaux conventionnels,

- développement de composites à mémoire de forme mené par British Aerospace et Daimler Benz, décision d'Airbus d'équiper les fuseaux de ses futurs A380 en technologie composite dite « glare »

➤ Utilisation des matériaux composites en Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents. Les entreprises françaises de transformations de composites, notamment les deux leaders du marché de l'équipement automobile - Inoplast et

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Matra Automobile - devront profiter du rattrapage probable de l'Europe sur les Etats-Unis dans l'utilisation des composites dans l'automobile (estimée globalement à 113 kg par voiture aux Etats Unis contre 30 kg en Europe).

➤ **Utilisation des matériaux composites dans le secteur du bâtiment**

Mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (35 F/kg contre 18 F/kg pour l'acier et 6 F/kg pour le bois),
- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites,
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique, possibilité de créativité) sont cependant extrêmement prometteuses. Les fournisseurs de solutions composites ont développé de nombreux produits: fenêtres, portes, substituts d'ardoise, renforts de poutres, etc.

Utilisation des matériaux composites dans le secteur des loisirs et sports

Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes (skis moulés et non stratifiés

➤ **Exemples d'autres domaines d'utilisation des composites**

Les matériels ferroviaires présentent de nombreuses possibilités d'utilisation pour les matériaux composites, réalisation des wagons en structure composite.

L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et l'équipement électronique, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel plurifonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) y est important. En électronique, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs.

Les composites jouent un rôle croissant dans le secteur dentaire (implants) et biomédical (matériaux prothétiques), en dépit de fortes contraintes de bio-compatibilité. [15]

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les matériaux composites, leurs constituants, leurs modes d'élaboration, leurs différentes architectures ainsi que leur importance dans différents domaines de la construction. L'utilisation des matériaux composites s'est élargie de manière importante au vu de leurs bonnes caractéristiques mécaniques et du rapport qualité-prix.

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un matériau, des méthodes expérimentales sur des éprouvettes normalisées furent mises au point, tels que l'essai de traction, de flexion et l'essai de résilience qui seront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II Les propriétés des matériaux composites

Introduction :

Le choix des matériaux à utiliser en mécanique réside dans le choix des matériaux les plus performants : Module de Young élevé, Résistance à la rupture forte. Les méthodes utilisées permettant d'étudier le comportement mécanique et d'évaluer numériquement les propriétés des matériaux sont les essais mécaniques.

Dans ce chapitre, nous donnons les différentes propriétés usuelles des matériaux composites, et les essais permettant de déterminer certaines de ces propriétés.

Il existe six grandes catégories de propriétés :

- | | |
|---------------|--|
| • Mécaniques | } Propriétés physiques : concernant le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière. |
| • Electriques | |
| • Thermiques | |
| • Magnétiques | |
| • Optiques | |
| • Chimiques | Comportement dans un environnement réactif. |

II.1. Propriétés physique et chimique des matériaux composites

Dans l'étude d'un matériau, il est essentiel d'étudier ses propriétés physiques et chimiques, afin de comprendre les structures et les réactions physiques et chimiques qui s'opèrent à l'intérieur du matériau.

Dans notre étude, les essais et techniques mises en œuvre afin de comprendre ces phénomènes consistent en l'étude du matériau composite et de ses constituants au microscope optique.

II.2. Propriétés mécanique des matériaux composites

Les propriétés mécaniques indiquent généralement leurs applications potentielles. Nous noterons principalement les notions de résistance et de dureté, qui feront les objets principaux de notre étude mécanique du matériau composite élaboré. En effet, un matériau dur est souvent fragile. Il faut donc déterminer plusieurs caractéristiques, plusieurs valeurs. Ces valeurs sont obtenus par des essais normalisés.

II.2.1. Mode d'essais mécaniques

Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force. Les principales sont :

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre,
- La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration,
- La ductilité : capacité d'un matériau à se déformer de manière irréversible avant de se rompre,
- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module d'Young),

Chapitre II Les propriétés des matériaux composites

- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture.

Afin de déterminer ces propriétés mécaniques, le matériau est soumis à des essais, permettant de calculer les forces nécessaires pour la rupture du matériau.

Quand un corps est soumis à l'action de forces extérieures, des contraintes internes s'établissent. A ces contraintes sont associées des déformations.

II.2.1.1. Essai de traction

Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte de déformation.

Ce type d'essai est normalisé par des réglementations nationales ou internationales :

- Géométrie des éprouvettes,
- Machine d'essai et leur étalonnage,
- Techniques expérimentales mises en œuvre, le dépouillement des résultats et leur représentation.

II.2.1.1.1. Traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'amorçage de la rupture se produit soit par rupture des fibres lorsque la déformation à rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ($\sigma_{rf} < \sigma_{rm}$), soit par rupture de la matrice dans le cas contraire.

Un premier scénario consiste à considérer que la rupture des fibres entraîne instantanément celle du composite. Si l'on admet l'égalité des déformations dans la fibre et la matrice, la contrainte appliquée au moment de la rupture du composite est donnée par:

$$\sigma_r = V_f \sigma_{rf} + (1 - V_f) \sigma^* \quad (1)$$

où σ^* est la valeur de la contrainte dans la matrice au moment de la rupture. L'équation ci-dessus considère également que la matrice a un comportement élastique dans la plage de déformation $0 - \epsilon_r$.

$$\sigma_{rf} = E_f \epsilon_r = E_f \epsilon_{rf} \text{ et } \sigma^* = E_m \epsilon_r$$

Ce qui donne:

$$\sigma_r = [V_f E_f + (1 - V_f) E_m] \frac{\sigma_{rf}}{E_f} \quad (2)$$

Il n'y a renforcement par les fibres que si la résistance à rupture du composite est supérieure à celle de la matrice non renforcée soit:

$$\sigma_r > \sigma_{rm}$$

ce qui n'est vérifié qu'au-delà d'une certaine fraction volumique critique de fibres V_{fcrit} donnée par:

$$v_{fcrit} = \frac{E_f \sigma_{rm} - E_m \sigma_{rf}}{(E_f - E_m) \sigma_{rf}} \quad (3)$$

Dans la pratique, les ordres de grandeurs de V_{fcrit} sont très faibles (pour un UD renforcé par des fibres de carbone $V_{fcrit} \sim 2\%$) et la rupture longitudinale de l'unidirectionnel est donc pilotée par celle des fibres. Comme illustré sur le schéma ci-dessous, la déformation à rupture du composite est égale à celle des fibres:

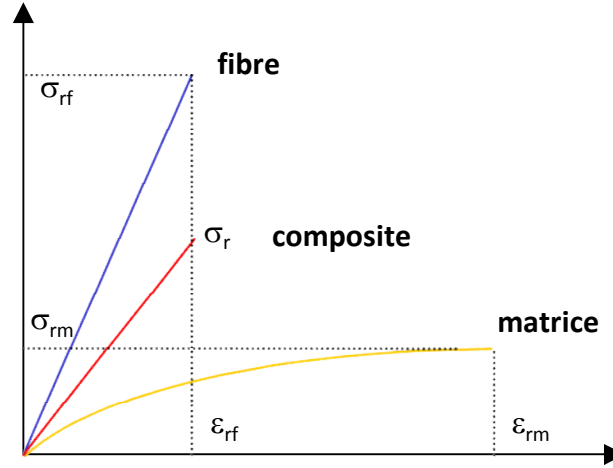


Figure II.1. Courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{rf} < \epsilon_{rm}$)

Dans le cas où $\epsilon_{rf} > \epsilon_{rm}$

Si l'on considère que la rupture de la matrice entraîne celle des fibres, la contrainte à rupture du composite est donnée par:

$$\sigma_r = \sigma_f^* V_f + \sigma_{rm} (1 - V_f) \quad (4)$$

où σ^* est la contrainte supportée par la fibre au moment de la rupture de la matrice. Par ailleurs, la loi de Hooke permet d'écrire:

$$\sigma_{rm} = E_m \epsilon_{rm}$$

$$\sigma_f^* = E_f \epsilon_{rm}$$

Chapitre II Les propriétés des matériaux composites

La rupture de la matrice entraînant celle du composite; $\epsilon_r = \epsilon$, ce qui permet de déterminer σ^* :

$$\sigma_f = \frac{E_f}{E_m} \sigma_{rm}$$

La contrainte à la rupture du composite est alors donnée par:

$$\sigma_r = [E_f V_f + E_m (1 - V_f)] \frac{\sigma_{rm}}{E_m} \quad (6)$$

Le comportement à rupture du composite est alors piloté par la fissuration de la matrice fragile (figure ci-dessous). Dans la mesure où celle-ci se manifeste à des valeurs de déformation très faibles, ce comportement n'est pas optimal.

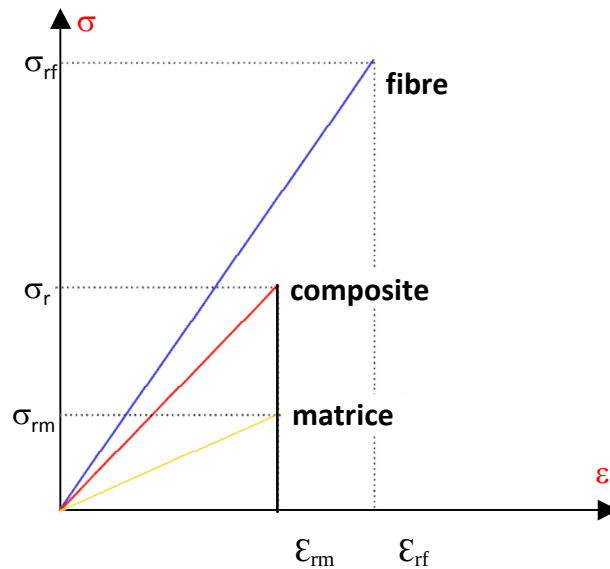


Figure II.2. Courbe contrainte/déformation d'un composite à matrice céramique soumis à une traction longitudinale (ϵ_{rf} ϵ_{rm})

II.2.1.1.2. Traction transversale

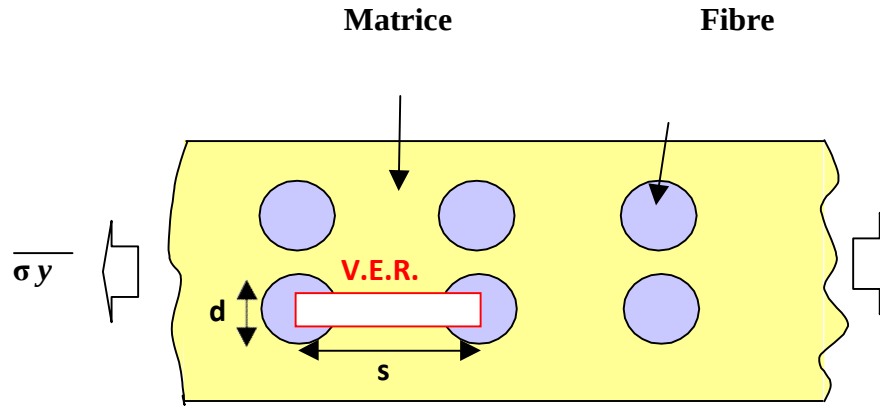
Sous chargement transverse, la rupture d'un pli unidirectionnel met en jeu des fissurations matricielles et des décohésions à l'interface fibre/matrice. Ce mode de rupture correspond généralement au premier endommagement observé dans les stratifiés croisés soumis à des efforts de traction. On observe alors des fissures transverses dites intra-laminaires dans les plis désorientés par rapport à l'axe de chargement. Ces ruptures interviennent bien avant la rupture des plis orientés à 0° par rapport à l'axe de sollicitation.

En raison notamment de la méconnaissance des propriétés à rupture de l'interface et des champs de contrainte complexes générés dans la matrice, ces ruptures sont très difficiles à prévoir.

Une approche simplifiée consiste à considérer que la rupture résulte de concentrations de contraintes autour des fibres. La déformation à rupture transverse ϵ_{ry} est alors reliée à la déformation à rupture ϵ_{rm} de la matrice par un facteur de 'concentration de contraintes' F défini comme suit:

$$\epsilon_{ry} = \frac{\epsilon_{rm}}{F}$$

F peut être déterminé pour certaines configurations simplifiées telle celle décrite dans la figure ci- dessous:



Sous l'action d'une traction transverse σ_y , l'élongation moyenne δ_y du VER peut s'écrire:

$$\overline{\sigma_y} = \delta_{fy} + \delta_{mv} = S\epsilon_y = d\epsilon_{fy} + (S - d)\epsilon_{mv}$$

Pour des raisons d'équilibre : $\sigma_{my} = \sigma_{fy}$

Ce qui donne :

$$S\epsilon_y = \left(d \frac{E_m}{E_f} + s - d\right)\epsilon_{my} \quad (7)$$

Ce qui permet d'estimer le facteur de concentration de contraintes F :

$$F = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_y} = \frac{1}{\frac{d}{S} \left[\frac{E_m}{E_f} - 1 \right] + 1} \quad (8)$$

C'est-à-dire que la contrainte à la rupture transverse est environ trois fois plus faible que la rupture en traction de la matrice non renforcée.

On peut également noter que F augmente de façon fortement non linéaire avec V_f (Figure II.2).

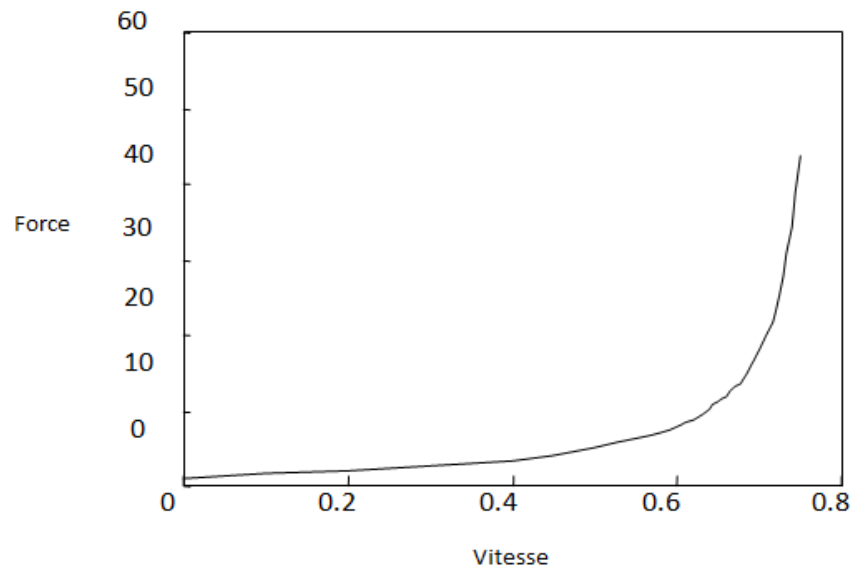


Figure II.3. Evolution du facteur de concentration de contrainte avec le taux de fibres

II.2.1.2. Essai de flexion

La flexion est la déformation d'un objet sous l'action d'une charge. Elle se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher ses deux extrémités. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action.

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. On utilise la flexion dite « **trois points** ».

On calcul la contrainte conventionnelle de rupture en flexion statique pour une flexion 3 points:

$$\sigma = \frac{3P.l}{2.b.h^2} \quad (9)$$

p : la charge totale appliquée à la rupture en flexion en N

l : la distance en mm entre les axes des appuis cylindriques

b : la largeur mesurée en mm de l'éprouvette

h : la hauteur mesurée en mm de l'éprouvette

II.2.1.2.1. Essai de flexion trois points

La flexion trois points est un essai mécanique classique. Il représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simples (appuis linéaires rectilignes qui, dans un problème plan, équivalent à une liaison ponctuelle) et soumise à une charge concentrée, appliquée au milieu de la poutre avec elle aussi un contact simple. On modélise souvent un des appuis comme un pivot afin d'avoir une poutre qui ne se déplace pas horizontalement.

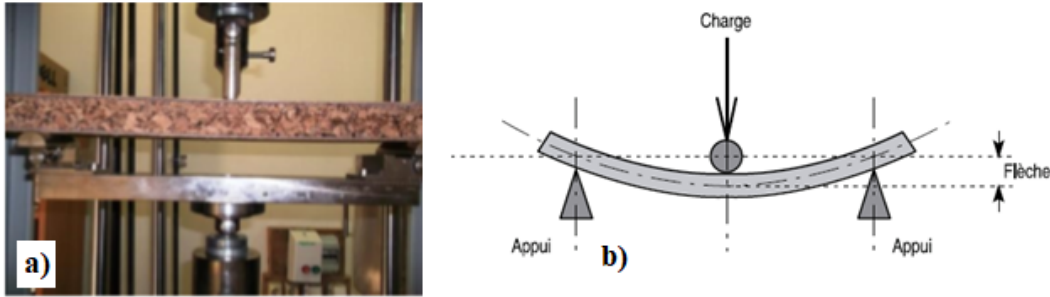


Figure II.4. a) Montage d'une éprouvette sandwich sur une machine de flexion trois points [16], b) principe d'application de la charge

II.2.1.2.2 : Principe de l'essai

La flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre.

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou *flèche*, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

Cet essai permet de connaître :

- Le comportement mécanique du matériau ;
- Les propriétés du matériau ;
- Les valeurs des caractéristiques du matériau.

L'enregistrement de la courbe Effort– Flèche permet de calculer à l'intérieur de la zone linéaire, la rigidité à la flexion K :

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (10)$$

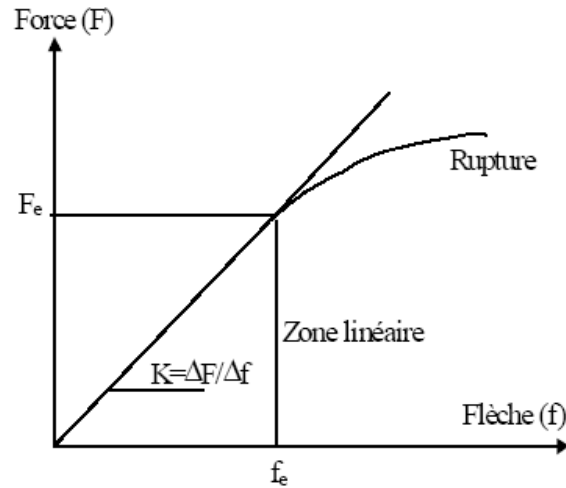


Figure II.5. Courbe Effort- Flèche enregistré lors d'un essai de flexion.

La théorie de la Résistance Des Matériaux (RDM) permet d'évaluer le moment fléchissant $M_z(x)$ autour de l'axe z , agissant sur la section droite de centre d'inertie G située à l'abscisse x

$$M_z(x) = \frac{F}{2}x = E_x I_z \frac{d^2 U_y}{dx^2} \quad (11)$$

E_x : module d'élasticité selon la direction x

$I_z = bh^3/12$: moment d'inertie

$U_y(x)$: la flèche à l'abscisse x

Par double intégration, la flèche s'écrit de la manière suivante

$$U_y(x) = \frac{F}{4E_x I_z} \left[\frac{x^3}{3} - x \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Soit f , la flèche maximale, en $x=L/2$. On en déduit le module d'élasticité E_x

$$E_x = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} = \frac{1}{4b} \left(\frac{L}{h} \right)^3 \quad (13)$$

La contrainte à rupture est égale à :

$$\sigma = \frac{M_z \cdot Y_{max}}{I_z} \quad (14)$$

$$\text{avec : } Y_{max} = \frac{h}{2}$$

II.2.1.3. Essai résilience

L'**essai de résilience** a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture. Il est fréquemment appelé *essai de résilience Charpy* ou même *essai Charpy*. Il porte le nom de l'ingénieur français Georges Charpy (1865-1945) qui en fut un des principaux théoriciens et promoteurs. Il mit en particulier au point la machine qui permet de réaliser l'essai et qui est appelée *Mouton Charpy*.

Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. Cette énergie est classiquement, dans le cas de la norme européenne, de 300 joules.

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette.

L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale à :

$$\begin{aligned} K &= m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h' \\ &= m \cdot g \cdot (h - h') \end{aligned} \quad (14)$$

Avec :

m = masse du mouton-pendule [kg]

g = Accélération terrestre. [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] (9,80665)

h = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

h' = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement une valeur en joules.

II.3. Caractérisation morphologique

II.3.1. Observation au microscope optique

Le **microscope optique** ou microscope photonique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise sa puissance optique) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

C'est un système optique à lentilles dont le but est d'obtenir une image agrandie de l'objet observé.

L'objet à observer est placé devant le premier groupe optique appelé « objectif ». Si l'objet est au-delà de la distance focale, cela forme une image réelle renversée de taille différente ;

Chapitre II Les propriétés des matériaux composites

l'image est plus grande que l'objet si celui-ci est situé à une distance inférieure au double de la distance focale de l'objectif.

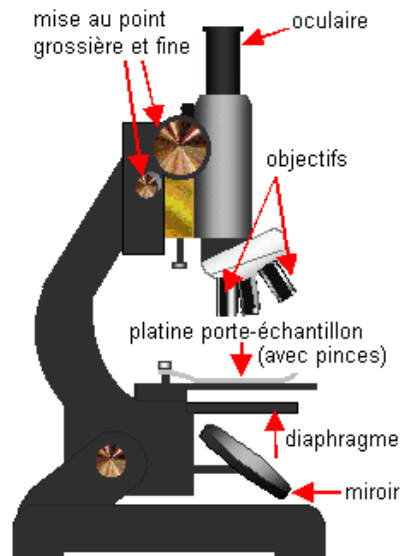


Figure II.6. Schéma d'un microscope optique.

Il s'agit d'un système centré dioptrique, composé en partie de doublets pour en corriger certaines des aberrations optiques.

A contrario d'autres systèmes optiques qui sont définis par leur grossissement optique (téléscope) ou leur grandissement (appareil photographique), le terme approprié, pour le microscope, est sa **puissance**, rapport de l'angle, sous lequel est vu l'objet à travers l'instrument, à la longueur de cet objet.

La technique d'illumination la plus utilisée en microscopie à champ large classique est l'illumination de Köhler, qui garantit une qualité d'image optimale.

Conclusion

Pour bien connaître les champs d'application d'un matériau, il est essentiel de lui faire subir des essais, afin de distinguer ses différentes propriétés. Plusieurs essais ont été mis au point pour déterminer les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, Etc.

Les propriétés recherchées et les essais effectués afin d'obtenir les résultats souhaités seront abordés dans le chapitre suivant.

Introduction

L'idée d'utiliser des fibres végétales naturelles comme renfort dans une matrice de polymère n'est pas tout à fait nouvelle, mais dans un contexte où le recours à des ressources renouvelables tend à devenir une priorité, elle est désormais considérée comme une voie prometteuse et doit poursuivre sa contribution aux objectifs de développement durable tout en continuant à répondre aux préoccupations environnementales. D'autant que des industriels ont déjà mis au point la production de composites renforcés de fibres végétales pour des applications ciblées. Ils s'efforcent donc d'élargir leurs marchés qui sont encore modestes. Seulement quelques dizaines de milliers de tonnes de fibres végétales sont intégrées aujourd'hui dans des composites, à comparer aux 2 millions de tonnes de fibres de renfort de synthèse utilisés par an [17].

III.1. Les composites bois-polymères

Remplacer des fibres de verre par du chanvre, des fibres de carbone par du lin ou du Kevlar (polyaramide) par du bois est une proposition qui peut paraître saugrenue à de nombreux producteurs et utilisateurs de matériaux composites. Néanmoins, cette idée commence pourtant à être prise au sérieux, tant du côté des chercheurs que des industriels.

Le bois possède plusieurs avantages, dont son apparence, sa diversité, son faible coût, sa provenance locale, sa faible signature environnementale et sa capacité comme puits de carbone. Il a cependant des défauts dont il faut tenir compte: instabilité dimensionnelle, présence de défauts (nœuds), couleur instable, inflammabilité et résistance variable aux insectes et à la moisissure. Que son usage soit intérieur ou extérieur, structural ou non, le produit composite à base de bois doit répondre à différentes exigences de performance et de rapport qualité/prix.

III.1.1 Le bois

III.1.1.1 l'anatomie du bois

Origine du bois

L'arbre est constitué, de l'extérieur vers l'intérieur du tronc, d'une couche d'écorce recouvrant une épaisseur de bois fonctionnel, entourant le bois du cœur.

L'écorce est formée de l'écorce externe ou suber, inerte, et de l'écorce interne ou liber, joue un rôle de conduction de la sève élaborée des feuilles aux racines.

Entre l'écorce et le bois fonctionnel se trouve l'assise génératrice libéro-ligneuse, ou cambium, constituée de cellules initiales qui possèdent la faculté de se diviser un certain nombre de cellules libériennes ou ligneuses. La succession de divisions de l'assise cambiale conduit à l'accroissement du diamètre du tronc. Chez les essences tempérées l'arrêt du fonctionnement du cambium en hiver se traduit par les limites de cernes.

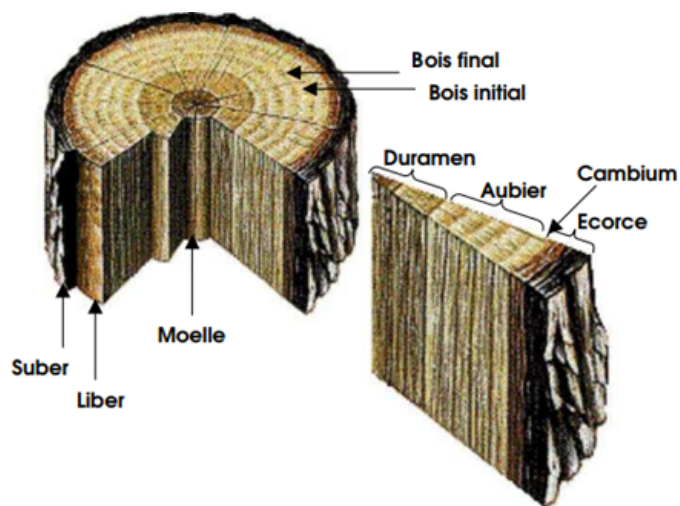


Figure III.1. Coupe transversale et radiale d'un billon.

III.2. Structure anatomique du bois

Le bois proprement dit constitue le volume principal de l'arbre. La norme NF B 50-003 le définit comme « ensemble de tissus résistants secondaires (de soutien, de conduction et de mise en réserve) qui forment les troncs, branches et racines des plantes ligneuses ». L'arbre est un organisme végétal qui appartient à l'embranchement des spermaphytes. Les spermaphytes ligneuses comportent les angiospermes ligneuses et les gymnospermes, plus communément appelées feuillus et résineux.

III.2.1. Les résineux

Les conifères ou résineux sont les arbres les plus anciens puisqu'ils sont apparus il y a 270 millions d'années. Ils ont la caractéristique de conserver leur feuillage, constitué d'aiguilles (ex. feuilles repliées), leur sève est appelée résine. Leurs organes reproducteurs sont portés par les écailles qui recouvrent le cône.

III.2.2. Les feuillus

Les feuillus sont apparus plus tardivement au cours de l'évolution, il y a 10 millions d'années, leurs feuilles larges et plates apparaissent au printemps et tombent à l'automne. Ils appartiennent au groupe des Angiospermes.

III.3. Structure macroscopique du bois

L'arbre est constitué, de l'extérieur vers l'intérieur du tronc, d'une couche d'écorces recouvrant une épaisseur de bois fonctionnel, entourant le bois de cœur. L'écorce est formée de l'écorce externe ou suber, inerte, et de l'écorce interne ou liber, qui joue le rôle de conduction de la sève élaborée des feuilles aux racines.

Entre l'écorce et le bois fonctionnel se trouve le cambium, organe de croissance qui forme le liber vers l'extérieur et les cellules du bois vers l'intérieur, la succession de divisions de l'assise cambiale conduit à l'accroissement du diamètre du tronc. L'aubier, est la partie jeune du tronc ou de la branche formée par les dernières couches annuelles de croissance du bois. Ces couches successives se superposent au cours des années et forment les cernes. L'aubier est constitué de cellules vivantes, de fibres ligno-cellulosiques xylémiennes, ainsi que de vaisseaux conduisant la

sève brute contenant les nutriments vers les feuilles. Le bois de cœur représente la partie interne du tronc. Il est en principe plus sombre que l'aubier comme la montre la figure III.2, car ses cellules contiennent de la résine, des corps gras, etc. Le bois de cœur comporte des cellules mortes. Sa teneur en humidité est bien inférieure à celle de l'aubier, et il donne aussi la force et l'envergure des arbres âgés. Le bois de cœur n'est pas plus sombre chez certaines essences telles que le sapin.

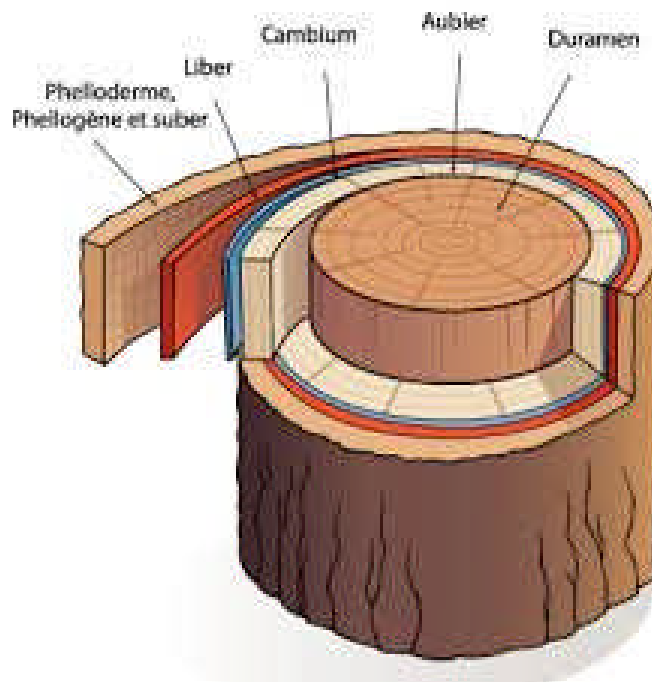


Figure III.2. Coupe transversal d'un tronc d'arbre.

L'anatomie du bois est habituellement étudiée selon trois plans perpendiculaires: transversal, radial et tangentiel, qui correspondent aux trois directions d'anisotropie du matériau pour la majorité de ses propriétés physiques, mécaniques et technologique.

Les deux grands groupes d'arbres (résineux et feuillus) se distinguent très nettement à l'échelle microscopique.

Chez le résineux, deux types principaux de cellules, trachéides et cellules de parenchyme, forment un plan ligneux régulier et uniforme. Les trachéides, qui représentent 90% des cellules, assurent le double rôle de conduction de la sève et du support mécanique.

Chez les feuillus la structure des cellules est plus complexe. Le nombre d'éléments constitutifs est plus grand et leur agencement est plus variable, chaque fonction est remplie par un type de cellule particulier: les vaisseaux conduisent la sève brute, alors que les fibres lariformes fibres-trachéides assurent la résistance mécanique.

III.3.1 Structure de la paroi cellulaire

Les parois de cellules du bois sont constituées de trois parties qui s'appliquent les unes contre les autres. On distingue une couche intercellulaire, une paroi primaire et une paroi secondaire, elle-même divisée en trois couches comme le montre la **figure III.3**.

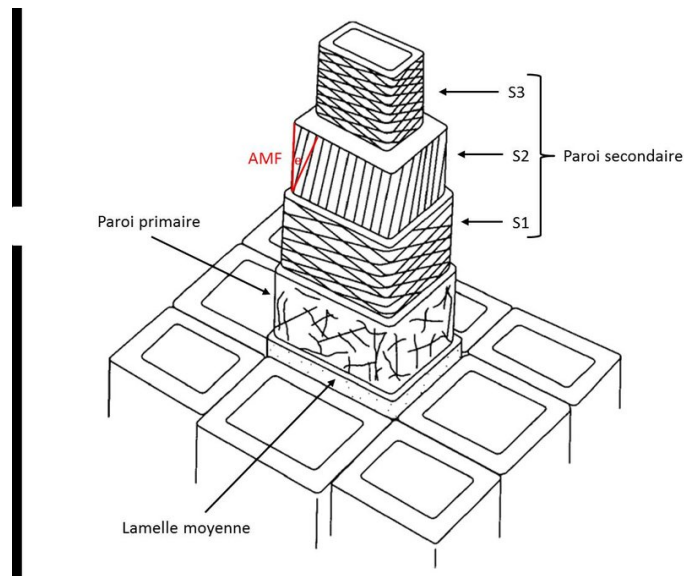


Figure III.3. Représentation des couches constituant la paroi cellulaire.

C'est une couche qui réunit les cellules les unes aux autres donnant en microscopie électronique une image homogène des cellules. Principalement constituée de substances pectiques, son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5 μm et semble être plus mince dans le bois initial que le bois final.

III.3.2 La paroi primaire

Est une surface très fine, apparaît dès la fin de la division cellulaire. Elle est constituée de plusieurs couches de microfibrilles de cellulose enchevêtrées dans lesquelles se déposent la lignine, des hémicelluloses et des substances pectiques. A l'état vert, cette couche contient énormément d'eau et son épaisseur est très faible est d'ordre de 0.1 μm [22].

III.3.3 La paroi secondaire

La paroi secondaire est une couche épaisse, dense et rigide déposée sur la paroi primaire une fois que la cellule a atteint sa taille définitive. Composée essentiellement de microfibrilles de cellulose qui s'orientent en structure parallèles. Entre les microfibrilles, des hémicellulose et la lignine se déposent à la manière de substances incrustantes. Les teneurs des différentes couches de la paroi cellulaire en cellulose, hémicellulose et lignine sont donnés sur la **figure III.4**. Généralement, la paroi secondaire se compose de trois couches : S1, S2 et S3.

- La couche S1 (0,2-0,3 μm), les microfibrilles forment un angle de 50 à 70° par rapport à l'axe de la fibre,
- la couche S2 (1-5 μm) qui constitue 90% de la masse de la paroi, cet angle n'est plus que de 10 à 30°,
- La couche S3 (0,1 μm), les microfibrilles retrouvent la même orientation que dans la couche S1.

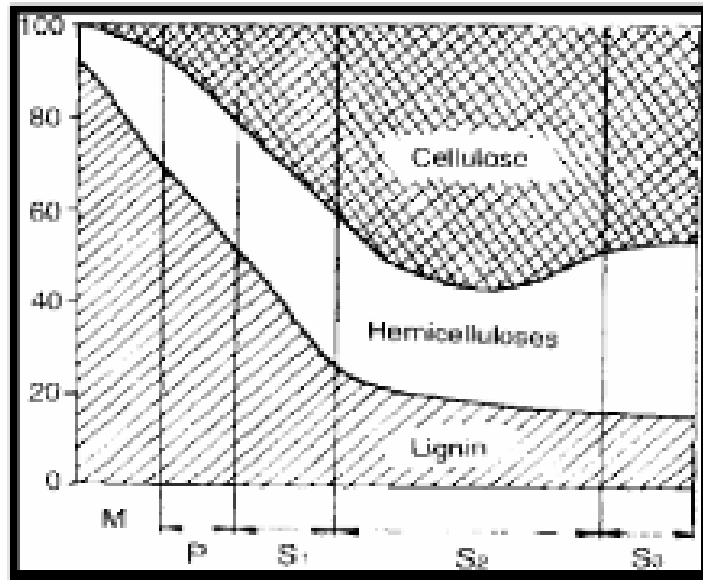


Figure III.4. Teneurs de différentes couches de la paroi cellulaire en cellulose, hémicellulose et lignine.

III.4. Structure moléculaire du bois

III.4.1. La Composition chimique du bois

Le bois est un composite de polymères naturels, il est possible d'y distinguer deux grands groupes de constituants :

- Les substances macromoléculaires : ce sont essentiellement les composants des parois cellulaires (cellulose, hémicellulose, et lignines). Elles représentent environ 98% du matériau [23,24],
- Les substances de faibles poids moléculaires notamment constituées des extraits et substances minérales. Elles représentent environ 2% du matériau.

La quantité de ces substances variait selon la famille d'arbre et le type des fibres naturelles, le **tableau III.1** et le **tableau III.2** représentent respectivement le taux de cellulose, hémicellulose et lignine du bois et quelques fibres naturelles.

Tableau III.1. Taux de cellulose, hémicellulose et lignine du bois

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Extractibles	Cendres
Résineux	41 ±4	28 ±3	29 ±3	3±2	1 ±1
Feuillus	47 ±6	29 ±7	23 ±4	3±1	1 1

Tableau III.2. Composition chimiques de quelques fibres végétales.

Fibre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Cires
Alfa	45,4	38,5	14,9	3
Lin	71	18,6-20	2,2	1,5
Ramie	68-76	13-16	0,6-0,7	0,3
Sisal	65	12	9,9	2
Chanvre	68	15	10	0,8

III.4.2. La cellulose

La cellulose est le principal constituant du bois, elle est considérée comme le constituant le plus stable chimiquement et thermiquement et joue un rôle fondamental dans la tenue mécanique des parois cellulaires des éléments anatomiques du bois [22].

La cellulose est un homo-polysaccharide linéaire composé d'unités -D-glucopyranose liées par des liaisons -1-4 [26] où chaque monomère contient trois groupement hydroxyyles, la structure chimique de la cellulose est présentée sur la Figure III.5.

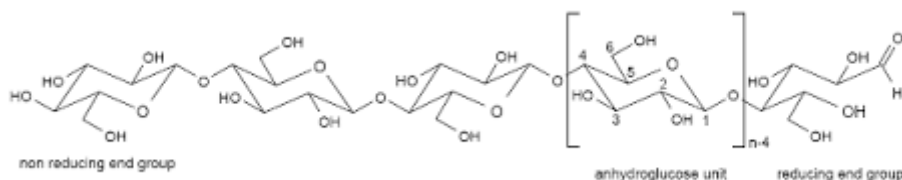


Figure III.5. La structure de la cellulose.

Le degré de polymérisation, donné par le nombre de répétition du motif élémentaire de glucose, est (≈ 10000) [27]. Il est important de noter qu'il n'est pas constant au sein du monde végétal et peut considérablement varier d'une espèce à l'autre.

La présence de nombreux groupes hydroxyyles le long de la chaîne favorise la formation d'un réseau de liaisons hydrogène intra et intermoléculaires comme le montre la **figure III.6**. Cet arrangement ordonné des chaînes cellulosiques parallèles entre elles est la base d'un édifice cristallin que l'on appelle microfibrilles.

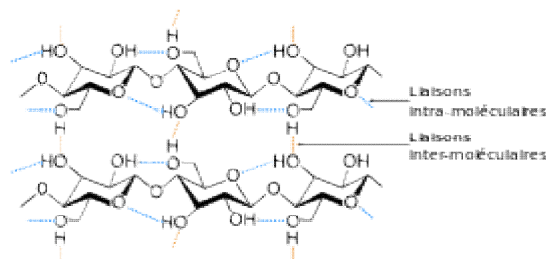


Figure III.6. Liaisons hydrogène entre deux chaînes de cellulose.

Les micro-fibrilles de cellulose forment un système élastique présentant une bonne résistance mécanique, chimique et thermique.

III.4.3 Les hémicelluloses

Les hémicellulose représentés en **figure III.7** sont des polyoses à chaînes plus courtes que celles de la cellulose, elles sont constituées de pentoses (xylose et arabinose), d'hexoses (mannose, galactose, glucose) et de dérivés de sucre (acide uroniques) le degré de polymérisation des hémicellulose est beaucoup plus bas que celui de la cellulose, il est entre 50 à 250. La nature de ces constitutifs dépend de la famille de bois considérée (résineux ou feuillu).

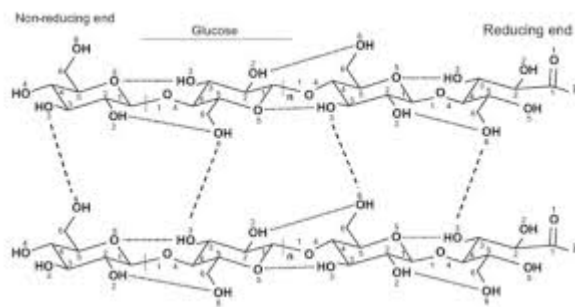


Figure III.7. La structure des chaînes des hémicelluloses.

Les hémicelluloses sont hydrophiles et susceptibles de gonfler au contact de l'eau, ce qui les rend responsables de l'instabilité dimensionnelle du bois. Elles réagissent donc assez facilement et sont thermiquement beaucoup moins stables que la cellulose et la lignine. Les hémicelluloses jouent le rôle d'agent de couplage entre la cellulose polaire et la lignine beaucoup moins polaire, et forment des liaisons hydrogène avec la surface des micro-fibrilles et des liaisons covalentes avec la lignine.

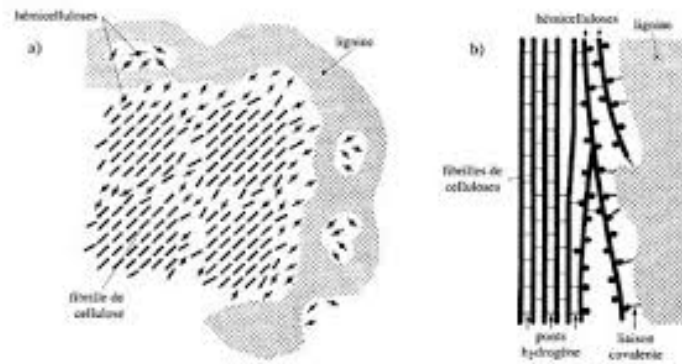


Figure III.8. Interfaces cellulose/hémicelluloses/lignine

a) Vue longitudinale, b) Vue transversale

III.4.4. La lignine

La lignine est un polymère phénolique amorphe d'un poids moléculaire indéterminé. Les feuillus contiennent 18% à 25% de lignine alors que les résineux en contiennent 25% à 35%.

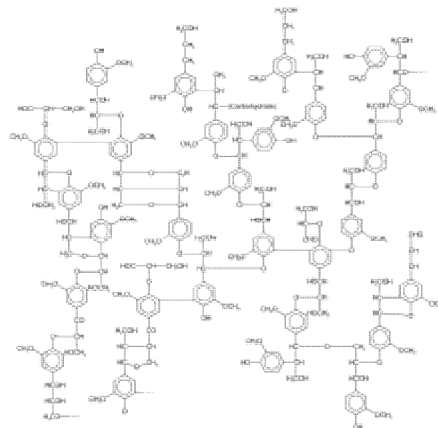


Figure III.9. Les monomères de la lignine.

La structure des lignines, très complexe, ne peut pas être déterminée de façon précise, car les unités constitutives sont liées entre elles de manière désordonnée, et par de nombreux types de liaisons. Le degré d'enchevêtrement élevé de la lignine, accroît la résistance mécanique du bois, sa stabilité thermique et diminue son hygroscopicité.

III.5. Les composés extractibles

Le terme « extrait » recouvre un grand nombre de constituants qui peuvent être extraits avec des solvants organiques comme l'éthanol, l'acétone ou le dichlorométhane. Généralement ce

Chapitre III Le bois dans les matériaux composites

sont des molécules de faible masse molaire ne font pas partie de la paroi cellulaire et ne contribuent pas aux propriétés mécaniques. Tandis qu'ils contribuent à certaines propriétés du bois, telles que sa couleur, son odeur ou encore sa résistance à la décomposition biologique. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la valeur d'un bois. Ils peuvent être classés selon trois groupes :

- Les composés aromatiques (tannins, stilbènes, flavonoides, ...) ;
- Les terpènes (α -pinène, limonène, myrcène, ...) ;
- les composés aliphatiques (acides gras saturés et insaturés, triglycérides,...)

III.5.1. Les cendres :

Les cendres désignent les composés inorganiques présents dans le bois. Leur quantité varie en moyenne entre 0,5 et 3% de la masse initiale du bois. Elles sont constituées en majorité d'élément calcium. Elles contiennent également des quantités significatives d'éléments potassium, de magnésium, de phosphore et de silicium.

III.6. Adhésion fibre/matrice

L'adhésion entre les fibres et la matrice est sans doute le point le plus important au niveau des caractéristiques des matériaux composites. En effet, leurs propriétés mécaniques chutent si l'adhésion fibre/matrice est mauvaise. Pour les WPC, ce phénomène est lié au fait que les fibres végétales sont hydrophiles et polaires alors que les polymères thermoplastiques couramment utilisés pour ces composites, sont hydrophobes et apolaires.

Les études menées jusqu'à présent ont cherché à renforcer l'affinité de la matrice et des fibres de manière à en augmenter la force d'adhésion. Dans ce cas, de nombreuses méthodes et procédés sont mis en œuvre pour satisfaire au mieux ces deux critères. Ils peuvent être rassemblés en deux catégories : les traitements physiques et les traitements chimiques.

Conclusion

La structure anatomique du bois tient pour beaucoup dans le comportement mécanique des matériaux composites chargés en bois. Les caractéristiques physiques, chimiques et

Chapitre III Le bois dans les matériaux composites

mécaniques du bois, très importantes pour le dimensionnement des structures, varient en fonction de l'essence, et au sein de l'arbre lui-même, qui est hétérogène et anisotrope.

La caractérisation de la résine chargée en sciures de bois de différentes granulations ainsi que le matériau composite élaboré feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV Technique expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons l'aspect expérimental de ce projet. Nous présenterons ainsi les constituants choisis pour l'élaboration du composite, ainsi que le matériel utilisé pour la mise en œuvre, les techniques expérimentales utilisées pour l'établissement des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques du matériau.

IV.1. Matériaux utilisés

IV.1.1 la matrice

Dans le domaine des matières plastiques, le terme polyester, recouvre les deux grandes familles suivantes: - les polyesters insaturés; - les polyesters saturés.

Les polyesters saturés sont des produits finis mis en œuvre par fusion (injection, extrusion). Les polyesters insaturés sont en général des liquides dont le durcissement est dû à une polymérisation par l'ajout d'un catalyseur [18].

Les polyesters insaturés (UP unsaturated polyester) sont d'un usage relativement ancien (1950), essentiellement dans le bâtiment. Ils ont connu un renouveau important à partir de 1980, à cause de leur prix, du nombre élevé de possibilités qu'elles offrent et des derniers progrès de la technique. Elles peuvent être des monocomposants adaptés aux procédés de fabrication les plus modernes et les plus automatisés [19]. Elles rentrent dans la fabrication de 95% des composites thermodurcis renforcés [20]. Les propriétés thermomécaniques des polyesters insaturés sont illustrées dans le tableau III.1

Tableau IV.1 : Propriétés de la résine d'imprégnation «UP» non renforcée [19]

	propriétés thermomécaniques				
Polyesters insaturés	résistance à la rupture en flexion (MPa)	résistance à la rupture en traction (MPa)	module en traction (GPa)	allongement à la rupture (%)	température limite * (°C)
Orthophtallique	100 à 135	50 à 75	3,2 à 4,5	1,2 à 4,0	80 à 100
isophtallique	110 à 140	55 à 90	3,0 à 4,0	0,8 à 2,8	100 à 130

Polyesters insaturés : C'est la résine la plus utilisée dans l'application des composites de grande diffusion. La résine de polyester insaturé est constituée d'un monomère (généralement le styrène). Elle 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. L'apport d'un amorceur radicalaire à la résine UP en présence d'un accélérateur, conduit à la formation de matériaux réticulés, infusibles et insolubles dans les solvants [EHR00]. La figure. II.2-a présente l'évolution de la température de la réaction exothermique de la résine UP. Le durcissement est d'autant plus

Chapitre IV Technique expérimentales

rapide que la courbe de température en fonction du temps se rapproche davantage de la verticale (Fig. II.2-b.) 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.

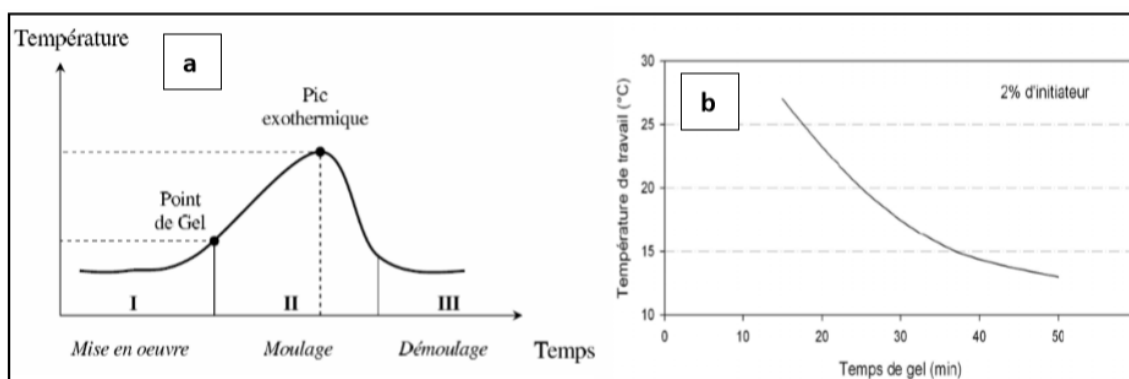


Figure IV.1 comportement de la résine polyester en fonction du temps :

a) cycle de polymérisation, b) temps de gel [RAP93]

La résine utilisée pour la réalisation de nos éprouvettes est une résine polyester ortho phthalique de stratification de couleur bleu opaque, moyenne réactivité, nommée LORNESTER H511 TA, dont la fiche technique est donnée dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Fiche technique de la résine.

Propriétés mécaniques de la résine :	
-Résistance en traction	40-60 MPa
-Dureté Barcol	40-45
-Résistance en flexion	80-100 MPa
-Méthode d'application	Application manuelle
-Densité	1,09-1,11kg/dm ³
-Temps de durcissement	45-60mins



Figure IV.2. Résine à l'état liquide.

IV.1.2. Durcisseur

Le durcisseur est une substance liquide qui augmente la vitesse de réaction chimique sans pour autant être consommé et sans modifier la position finale d'équilibre thermodynamique de cette réaction.

Le dosage utilisé lors de la préparation du matériau composite est d'environ 2%.



Figure IV.3. Durcisseur pour résine Polyester.

IV.1.3. La Balance

Pour le dosage des ingrédients lors de la préparation, nous avons utilisé une balance avec une précision de 10^{-2} .



Figure IV.4. Balance.

IV.1.4. Mélangeur

Pour le mélange de la résine, du durcisseur et de la charge, nous avons utilisé un mélangeur électrique afin de permettre une bonne distribution du durcisseur ainsi que de la charge.



Figure IV.5. Mélangeur électrique.

III.1.5. Les renforts

Nous avons utilisé pour le renfort, de la fibre de verre tissée, comme montrée sur la figure III.5.

Tissu de verre tissé biaxial est composé de deux couches de tissu unidirectionnel orienté à $+45^\circ$ et -45° respectivement. Largement utilisé pour les processus où il nécessite une très bonne résistance mécanique combiné avec l'esthétique des finitions de haute qualité.

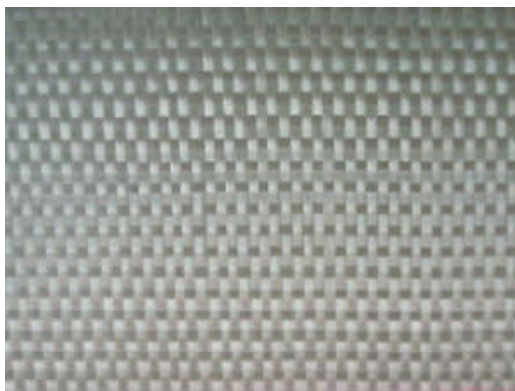


Figure IV.6. Fibre de verre tissée.

III.1.6. Les charges

Pour les charges, nous avons utilisé des copeaux de bois issus de déchets de menuiserie. Pour nos essais, nous avons eu recours à deux variétés de copeaux : Bois blanc et bois rouge.



(a)



(b)

Figure IV.7. Charges de bois utilisés pour la préparation du composite.

(a) Copeaux de bois rouge

(b) Copeaux de bois blanc

III.1.7. La cire

Afin d'éviter que le matériau composite élaboré ne colle sur la plaque en verre, on applique sur cette dernière une fine couche de cire.



Figure IV.8. Cire de démoulage Tr 104.

III.1.8. Le moule

Le procédé de mise en forme utilisé est le **Moulage au contact**. Nous avons utilisé une plaque en verre de 320 mm de longueur, 240 mm de largeur et 4 mm d'épaisseur, séparée en deux pour créer deux moules. Les rebords sont faits de baguettes en carton de 2 mm d'épaisseur, comme indiqué sur la figure III.7.

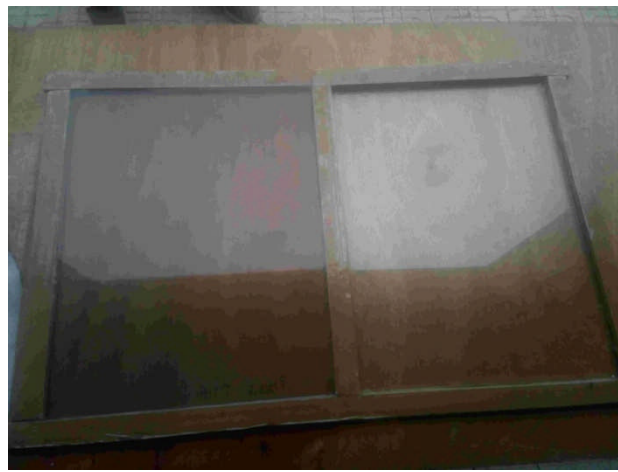


Figure IV.9. Moule utilisé pour l'élaboration du matériau composite.

Chapitre IV Technique expérimentales

III.1.9. Etapes suivies pour l'élaboration du matériau à étudier

Pour l'élaboration de la résine chargée et du composite, nous avons respecté les étapes suivantes :

- Préparation du moule et des différentes couches de renforts,
- Application de la cire et nettoyage du moule à 5 reprises,
- Écrasement des copeaux de bois à l'aide d'un pilon et d'un mortier pour en tirer des granulats
- Tri des granulats à l'aide de tamis de différentes épaisseurs d'ouvertures en granulats de 0.8mm, 1mm et 2mm,
- Versement de la résine et du durcisseur chargé de bois à différents granulations dans un récipient adéquat,
- Mélange des composants à l'aide d'un mélangeur électrique,
- Étalement de la résine chargée sur le moule à l'aide d'un rouleau,
- Superposition des couches de fibres,
- Versement de la dernière couche de résine en l'étalant soigneusement afin d'avoir la meilleure planéité sur la surface,
- Laisser le matériau composite ainsi élaborer durcir le temps nécessaire.

III.2. Caractérisation du matériau composite

Il est indispensable pour étudier et comprendre un matériau de le caractériser à l'aide des techniques de caractérisation appropriées. Soit, destructives, c'est-à-dire qui endommagent le matériau. Soit, non destructives, qui n'endommagent pas le matériau et donc l'objet étudié.

III.2.3.1. Essai de traction

L'essai de traction est l'essai le plus fondamental lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un matériau.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces servant dans la conception et la construction mécanique.

Le principe de l'essai consiste à soumettre une éprouvette normalisée à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à atteindre la rupture de la pièce.

La machine de traction utilisée dans nos essais de traction est une machine de marque **Zwick Z010** (réalisé au laboratoire de l'université de Boumerdes), selon la norme **ISO 527**, pilotée par micro-ordinateur. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées (Figure III.10.), ayant subi un traitement thermique, à température ambiante, ce qui nous a permis de récupérer les courbes **contrainte/déformation** du matériau, obtenues sur le logiciel **test Xpert V.12.0**.



Figure IV.11. Machine de traction de marque Zwick.

III.2.3.2. Essai de flexion

L'essai de flexion permet de déterminer l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec un effort appliqué à mi-distance. Il nous permet de déterminer la contrainte maximale en flexion du matériau, sa flèche ainsi que son module d'Young en flexion. Pour cet essai, deux configurations peuvent être retenues : flexion trois points et flexion quatre points.

La machine de flexion utilisée pour nos essais est une machine de marque **Zwick/Roell 72,5** (figure III.11), selon la norme **ISO 178**, pilotée par micro-ordinateur (Laboratoire de l'université de Bomerdes).



Figure IV.12. Machine de flexion de marque Zwick/Roell

III.2.3.2.1. Essai de flexion trois points

Il consiste à placer une éprouvette sur deux appuis et on applique au centre de l'éprouvette une force croissante jusqu'à rupture. Nous pourrions ainsi mesurer la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

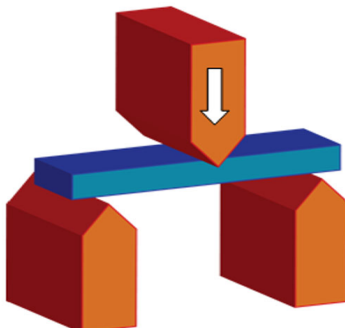


Figure IV.13. Principe de l'essai de flexion 3 points.

III.2.3.3. Essai de dureté

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

Il existe plusieurs tests de dureté : La dureté de Mohs, la dureté Brinell, la dureté Vickers, la dureté Knoop et la dureté Rockwell B et C.

Pour nos essais de dureté, nous avons effectué des tests de micro-dureté Vickers.

III.2.3.3.2. La micro dureté

Le test de micro-dureté est un test effectué sous très faibles charges (inférieures à 0,2 daN), avec une pyramide en diamant Vickers. La mesure de la dimension se fait à l'aide d'un microduromètre.

Les essais de microdureté Vickers sont réalisés sur un appareil muni d'un microscope permettant de localiser la phase à soumettre à l'indentation. Ainsi, lorsque le choix de la charge et de la zone d'indentation sont réalisés, le pénétrateur cible la phase voulue et maintient la pression pendant 20 secondes et enfin mesurer la diagonale de l'empreinte de la forme carré dans le matériau étudié produite par la pyramide à l'aide d'un programme placé sur l'appareil. Le microduromètre utilisé est représenté sur la figure III.12.



Figure IV.15. Duromètre

III.2.3.4. Essai de résilience

L'essai de résilience se fait sur une machine du nom de **Mouton de Charpy** (représentée sur la figure III.13).

Le principe de l'essai CHARPY consiste à mesurer l'énergie résiduelle d'une masse en mouvement pendulaire à la suite d'un choc unique à une vitesse généralement comprise entre 1 et 4 m/s, sur une éprouvette entaillée de dimensions normalisées sollicitée en flexion trois-points. Une partie de l'énergie disponible est consommée par la rupture de l'éprouvette.

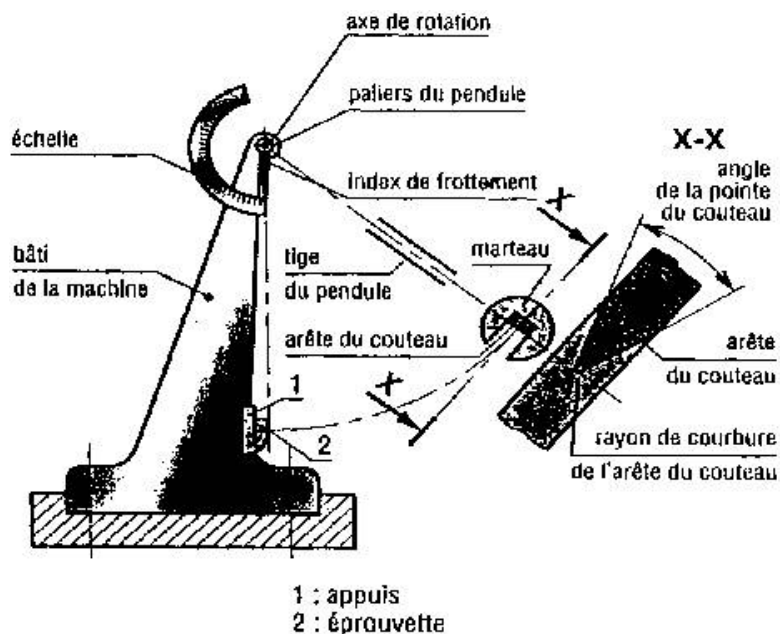


Figure IV.16. Mouton de Charpy.

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à l'énergie de départ W_0 ,
- On libère le couteau qui brise l'éprouvette,
- On mesure la hauteur de remontée du pendule pour déterminer l'énergie non absorbée W_1 ,

Chapitre IV Technique expérimentales

- On calcule l'énergie absorbée $W_0 - W_1 = W = \text{Poids} * (h_0 - h_1)$.

Les essais que nous avons réalisés ont été effectués sur une machine **Zwick** (laboratoire matériaux de l'entreprise El d'Azazga).

La distance entre les appuis est de 40 mm, le marteau utilisé est un marteau 2J pour les éprouvettes de résine chargée et un marteau 15J pour les éprouvettes de composite chargé.

Conclusion :

Pour chacune des caractéristiques d'un matériau, plusieurs méthodes sont disponibles pour les déterminer. Le choix de l'une de ces méthodes se fait selon le type de matériau, le type de résultats attendus ainsi que le domaine d'application du matériau.

Les résultats obtenus lors de nos essais feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V: Résultats et discussions

Introduction

Nous avons élaboré des matériaux composites à base de résine polyester, en utilisant comme renfort des fibres tissées et différents charges (copeaux de bois rouge et de bois blanc en variant la granulométrie de la charge). L'élaboration s'est faite par moulage en contact. Nous en avons élaboré des éprouvettes normalisées de traction, de flexion et de résilience. Des observations au microscope optique ont été menées dans le but de comprendre les phénomènes microscopiques résultants des essais mécaniques de traction, flexion ainsi que de résilience subits par le matériau composite.

Dans ce chapitre, nous donnerons les résultats de ces différents tests ainsi que les interprétations qui en découleront.

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour chacun des essais sont donnés dans les tableaux V.1 pour les essais de traction, V.2 pour les essais de flexion et V.3 pour les essais de résilience.

V.1.1.Résultats de l'essai de traction

Des éprouvettes en matériaux composites ont été élaborées pour l'essai de traction selon la norme selon ISO 527. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'influence des charges de bois, sous différentes granulations, sur la résine polyester. Puis, dans un second temps, nous avons fait une comparaison entre l'influence de l'incorporation du bois rouge et du bois blanc sur la résine polyester. La troisième analyse consiste en l'influence de la charge sur le matériau composite renforcé en fibre de verre. Dans le tableau ci-dessous nous donnons les dimensions de l'éprouvette de traction ainsi élaborée.

Tableau V.1 : Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527

Matériau	Dimensions	Valeurs
Type III	longueur minimale	250
	Distance initiale entre mors	136
	Longueur de référence (extensomètre)	50+-1
	Distance entre talons	150+-1
	Largeur de la partie calibrée	25 ou 50+-0,5

Chapitre V: Résultats et discussions

Nous allons considérer dans ce qui suit les courbes **Contrainte/Déformation** obtenues lors des essais de traction sur nos éprouvettes.

Les essais de traction sont effectués sur les matériaux chargés ainsi que les matériaux renforcés et chargé, après étuvages des éprouvettes dans un four à 80°C pendant 8 heures, puis effectués à température ambiante.

V.1.1.1 Résultats de l'essai de traction de la résine seule

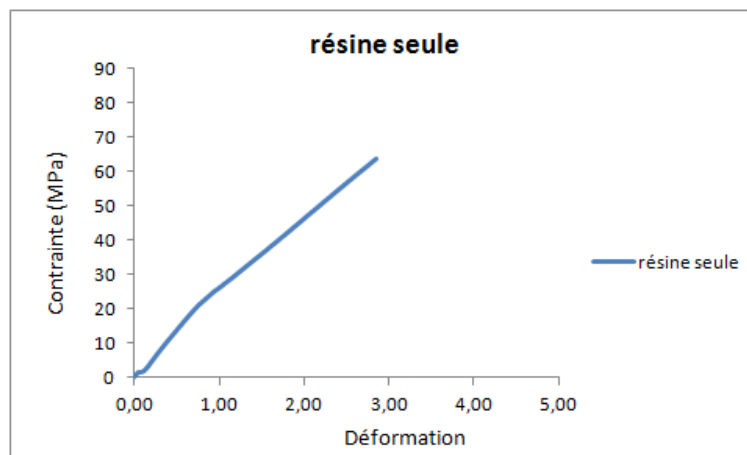


Figure V.1 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester

Le comportement mécanique de la résine polyester, comme montré sur la figure V.1 est un comportement fragile dont la rupture s'effectue avec une déformation de moins de 3% et une contrainte élastique 65MPa (valeur légèrement en dessous de la valeur indiquée au cahier des charges).

V.1.1.2 Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois

La charge ajoutée à la résine polyester, afin d'élaborer un mélange est des particule de bois avec un pourcentage de 2% en masse..

Deux nuances de bois sont choisies afin de relater une quelconque différence dans le comportement en fonction de la nature du bois, nous avons utilisé du bois rouge(le hêtre) et du bois blanc utilisé en maçonnerie. Une deuxième variable qu'on va étudier est l'influence de la granulométrie du bois sur le comportement mécanique ; pour ce faire, nous avons choisi trois granulométrie pour le bois rouge et deux granulométries pour le bois blanc.

Chapitre V: Résultats et discussions

Pour le bois rouge les particules de bois ont les dimensions suivantes :

- 1) Coupeaux de bois de dimensions supérieures ($>$) à 2mm
- 2) Coupeaux de bois de dimensions entre 1mm et 2mm
- 3) Coupeaux de bois de dimensions ($<$) entre 1mm et 0.8mm

Pour le bois blanc les particules de bois ont les dimensions suivantes :

- 1) Coupeaux de bois de dimensions supérieures ($>$) à 2mm
- 2) Coupeaux de bois de dimensions entre 1mm et 0.8mm

V.1.1.2.1. Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois rouge

Pour les échantillons de résine polyester chargée en sciure de bois rouges nous représentons dans ce qui suit les différents résultats.

- **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est supérieure à 2mm ($G_r > 2mm$)**

L'ajout de 2% de sciure de bois de granulométrie supérieure à 2 mm, a diminué la cohésion de la matrice et engendré des points de fissuration de l'éprouvette, la matrice perd sa résistance à la traction, cette valeur chute à 30MPa soit la moitié de la résistance de la résine seule.

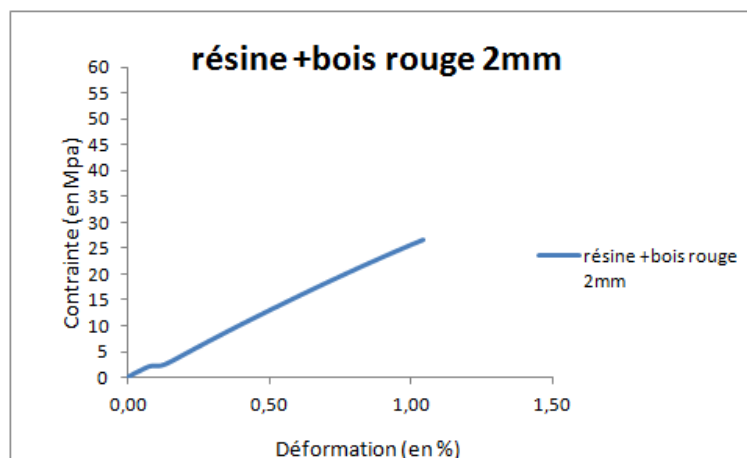


Figure V.2 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée de bois rouge à granulométrie supérieure à 2mm

- **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm ((2mm>G_r> 1mm)**

Le même comportement observé, durant l'essai de traction, que dans le cas précédent.

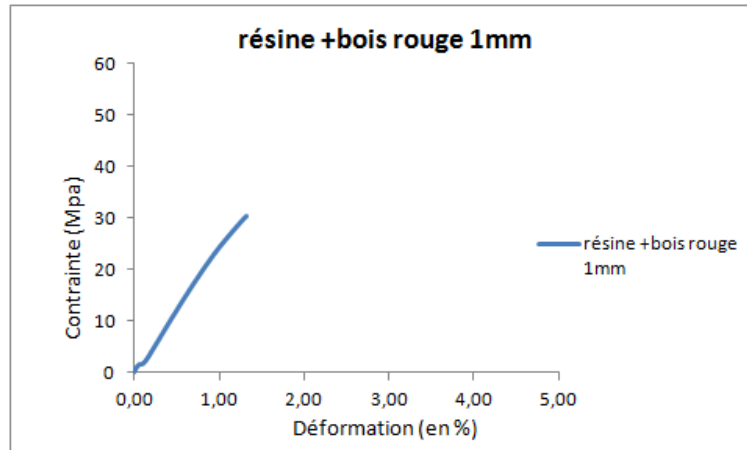


Figure V.3 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois rouge de granulométrie entre 2mm et 1mm

- **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est entre 1mm et 0,8mm ((1mm>G_r> 0,8mm)**

On constate toujours le même comportement mécanique, la résine s'est fragilisée avec l'incorporation du bois rouge, donc on peut dire qu'il n'y a pas une bonne adhérence entre la résine et les particules de bois rouge.

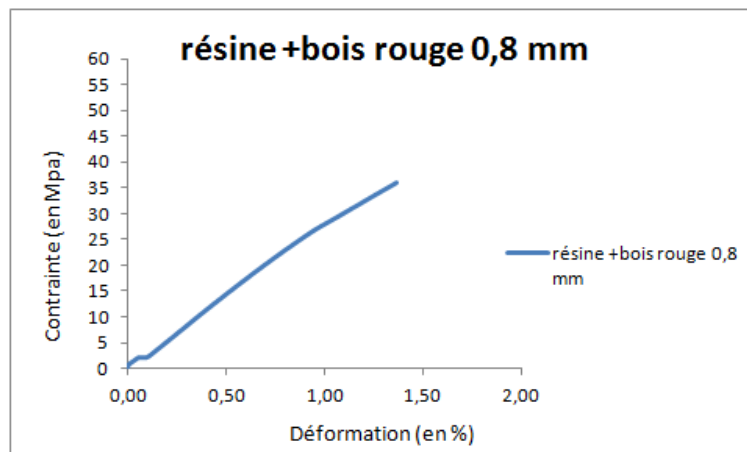


Figure V.4 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois rouge de granulométrie entre 1mm et 0,8mm

V.1.1.2.2. Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois blanc

La charge en bois blanc, a le même effet que la charge en bois rouge, la nature de bois n'a pas d'effet sur le comportement mécanique. La charge en bois blanc de granulométrie supérieur à 2mm, est celle qui altère le plus la résine.

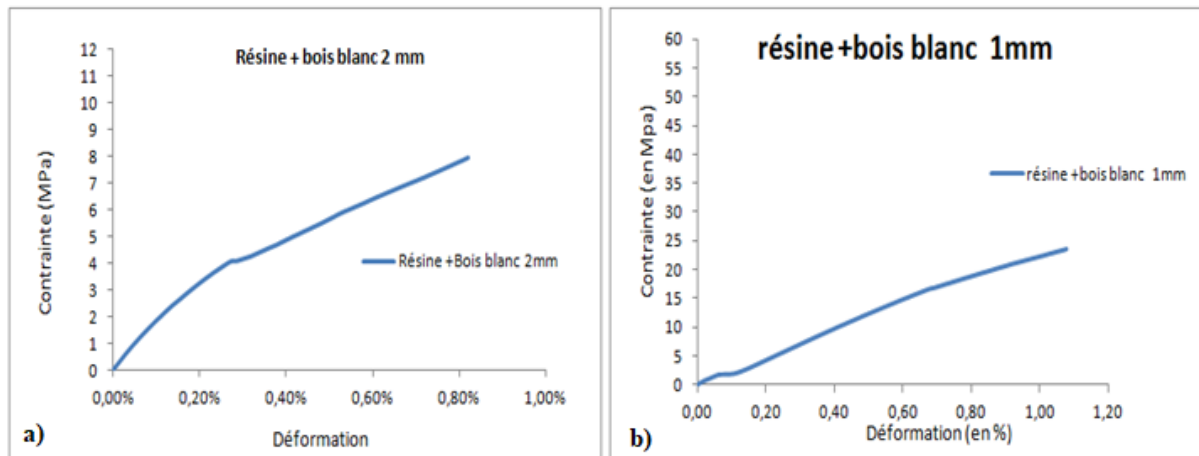


Figure V.5 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois blanc de granulométrie a) supérieur à 2mm, b) granulométrie entre 1mm et 2mm

V.1.1.3 Résultats de l'essai de traction de la résine chargée en bois rouge et renforcé en fibre de verre

Normalement la résine chargée devait avoir un comportement mécanique en traction avec une résistance de l'ordre de 3 à 4 fois la résistance de la résine seule. Dans notre investigation, on se rend compte que l'ajout du bois rouge comme charge a altéré la résistance en traction de nos éprouvette. La déformation quand à elle a subit une légère augmentation.

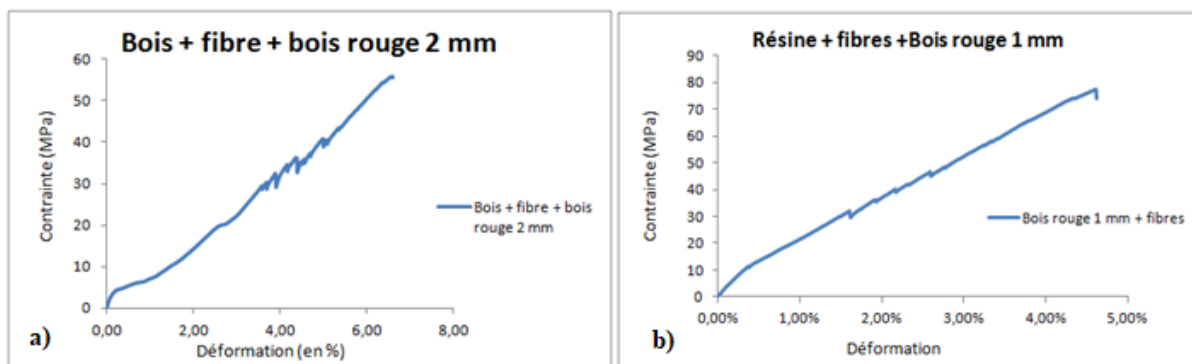


Figure V.6 Courbe contraintes-déformations de la résine polyester chargée en bois blanc de granulométrie a) supérieur à 2mm, b) granulométrie entre 1mm et 2mm

V.1.2 Résultats de l'essai de flexion

Nous avons réalisé les essais de flexion sur les éprouvettes dont la résine polyester est chargée de granulés de bois rouge et bois blanc, puis nous avons effectué l'essai avec des éprouvettes de matériau composite chargée.

Tableau V.2. Dimensions en mm des éprouvettes de flexion, selon la norme ISO 178.

Matériau	Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur L	Epaisseur h
Type III	80	64	15	4

V.1.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine seule

Le comportement mécanique en flexion de la résine polyester est un comportement purement fragile comme il est indiqué par la figure ci-dessous, la force avant la rupture a atteint 88,3N soit une contrainte de 70,64 MPa (concorde avec le cahier des charges), la déformation à la rupture est de 0,09%, comportement très fragile.

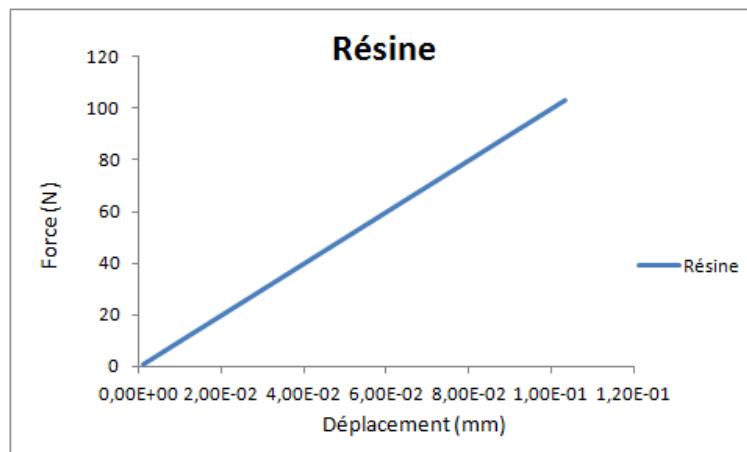


Figure V.7 courbe force-flèche du matériau résine polyester

V.1.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois

Nous présentons les résultats de l'essai de flexion du matériau composite chargée en bois rouge en premier, avec les différentes granulométries utilisées dans notre travail, puis en présentera les résultats obtenus pour le matériau composite chargé en bois blanc. Le pourcentage de la charge est fixé à 2%.

V.1.2.2.1 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois rouge

Nous avons utilisé trois granulométries pour le bois rouge et cela en le passant par des tamis, nous avons choisi une charge supérieur à 2mm, une seconde charge entre 2mm et 1mm, une troisième granulométrie entre 1mm et 0,8mm.

➤ **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est supérieure à 2mm ($G_1 > 2\text{mm}$)**

L'ajout de 2% de bois rouge dont la granulométrie est supérieure à 2mm à la résine polyester confère au mélange un comportement toujours fragile, mais dont la valeur de la force à la rupture est plus importante, (450 N au lieu de 88,3N) et la déformation a aussi augmenté de 0,09% jusqu'à 3%.

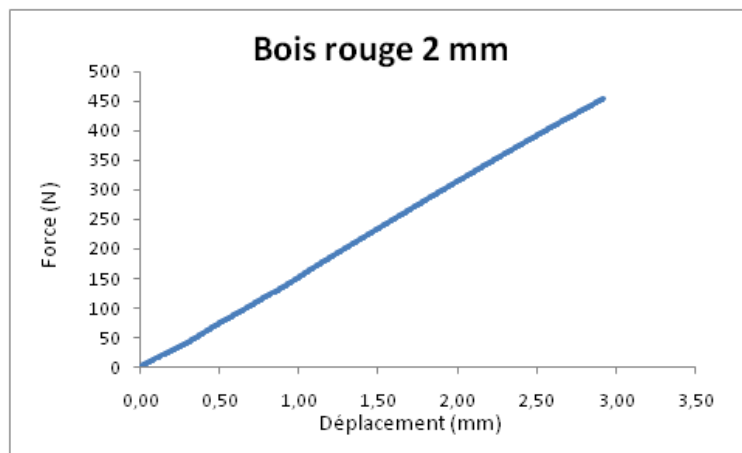


Figure V.8 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé copeau de bois rouge granulométrie supérieure à 2mm

➤ **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm ($2\text{mm} > G_2 > 1\text{mm}$)**

L'ajout de 2% de sciure de bois dont la granulométrie est supérieure à 1mm et inférieure à 2mm, augmente relativement la résistance à la flexion de la résine mais cette augmentation est relativement moins importante que dans le premier cas où la charge (bois) avait une granulométrie supérieure à 2mm. La déformation relevée dans cette essai est 1,4% toujours plus importante que la déformation de la résine seule.

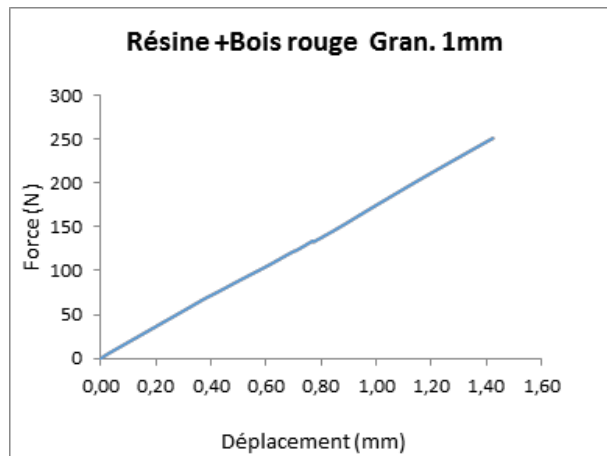


Figure V.9 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé coupeau de bois rouge granulométrie supérieur à 1mm et inférieur à 2mm

- **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est entre 1mm et 0.8 mm ($1\text{mm} > G_2 > 0,8\text{mm}$)**

Sur la figure V. ci-dessous nous représentons le comportement mécanique de notre matériau résine polyester chargé en sciure dont la granulométrie est entre 0,8mm et 1mm, son comportement vis-à-vis de l'essai de flexion est presque identique à celui de la résine chargée avec une sciure de bois rouge dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm.

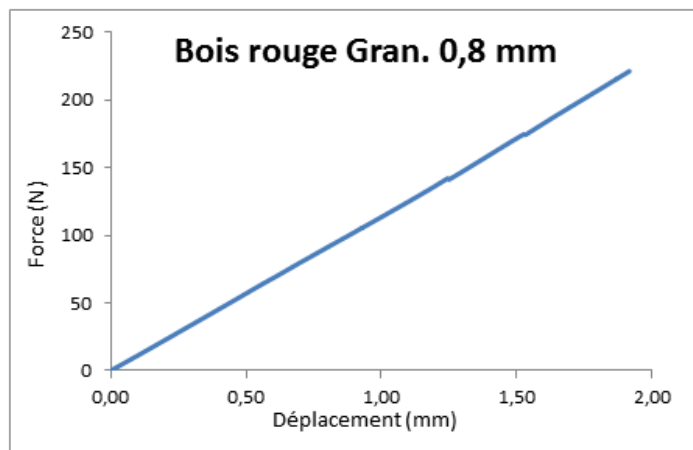


Figure V.10 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé coupeau de bois rouge granulométrie supérieur à 0,8mm et inférieur à 1m

V.1.2.2.2 Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois blanc

Lors de l'élaboration de notre matériau résine plus sciure de bois blanc à 2%, nous avons utilisé les deux granulométries : supérieure à 2mm et entre 2mm et 1mm, nous n'avons pas élaboré le troisième mélange de granulométrie entre 1mm et 0,8mm et cela par manque de matière première qui est la résine polyester.

➤ **Résine polyester chargée avec du bois blanc dont la granulométrie est supérieur à 2mm (($G_1 > 2\text{mm}$))**

L'ajout de 2% de sciure de bois blanc dont la granulométrie est supérieure à 2mm, à la résine polyester a amélioré sa résistance à la flexion ainsi que sa déformation.

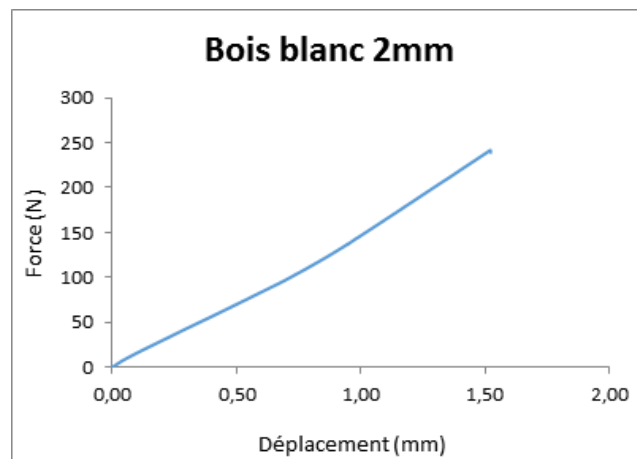


Figure V.11 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé coupeau de bois blanc granulométrie supérieur à 2mm

Résine polyester chargée avec du bois blanc dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm ($2\text{mm} > G_2 > 1\text{mm}$)

Sur la figure V. nous constatons le même comportement mécanique en flexion, l'ajout de 2% de sciure de bois blanc dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm, améliore le comportement fragilise la résine polyester en augmentant sa résistance et sa déformation.

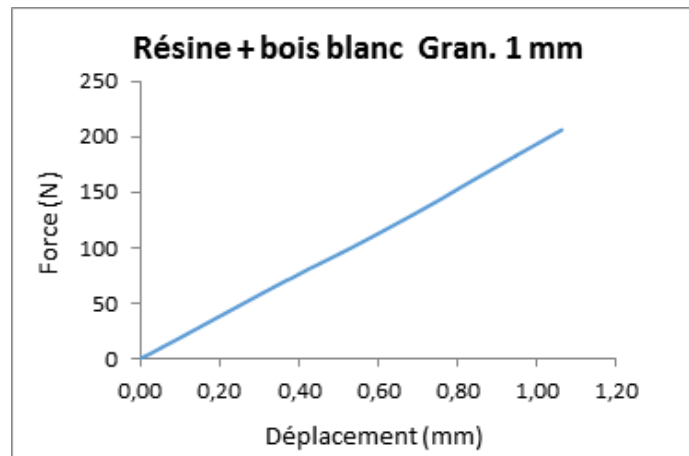


Figure V.12 courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé coupeau de bois blanc granulométrie supérieur à 1mm et inférieur à 2mm

La figure V est la superposition des courbes force- flèche précédentes, sur cette figure on constate l'effet positif de l'ajout de la sciure de bois pour la résine polyester.

Tous les mélanges ont des résistances à la flexion nettement supérieure à celle de la résine, les déformations constatées lors de ces essais sont aussi plus importantes que la déformation de la résine seule.

Notons que l'ajout de 2% de sciure de bois rouge dont la granulométrie est supérieure à 2 mm représente le résultat le plus concluant servant à une amélioration très importante du comportement en flexion de la résine.

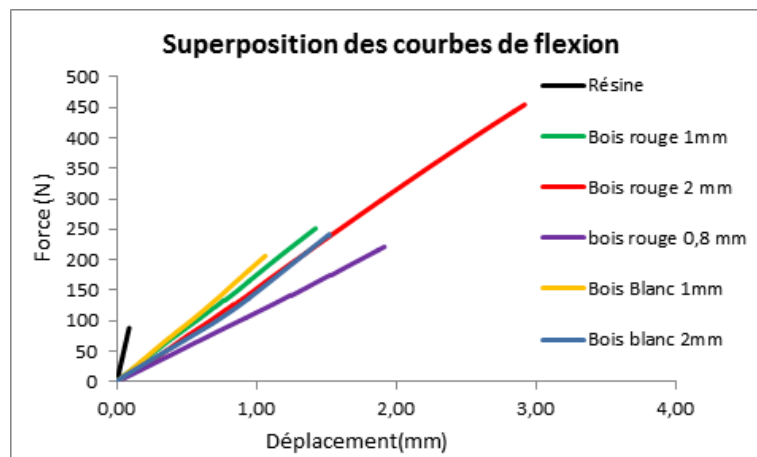


Figure V.13 la superposition des courbe force-flèche du matériau résine polyester chargé coupeau de bois rouge et bois blanc.

Chapitre V: Résultats et discussions

V.1.2.3. Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois et renforcée en fibre de verre

Nous avons opté pour la suite des essais de flexion, pour les matériaux composites chargés en sciure de bois et renforcés en fibre de verre d'utiliser uniquement les deux premières granulométries qui sont sciure de bois rouge supérieure à 2mm et entre 2mm et 1mm.

Nous n'avons pas élaboré les matériaux composites renforcés en fibre de verre et chargés en sciure de bois blanc, car nous jugeons que les résultats déjà donnés en flexion pour ces mélanges étaient insatisfaisants.

La fibre utilisée pour la réalisation des nos échantillons est une fibre à double faces, la première face est une fibre tissée, la seconde face est une fibre mat de 600.

V.1.2.3. Résultats de l'essai de flexion de la résine renforcée en fibre de verre

Comme il est prévisible, l'ajout de la fibre de verre améliore considérablement le comportement mécanique de la résine polyester, après la rupture de la matrice les fibres ont supportées l'effort. Il n'y a pas eu séparation des deux parties de l'éprouvettes.

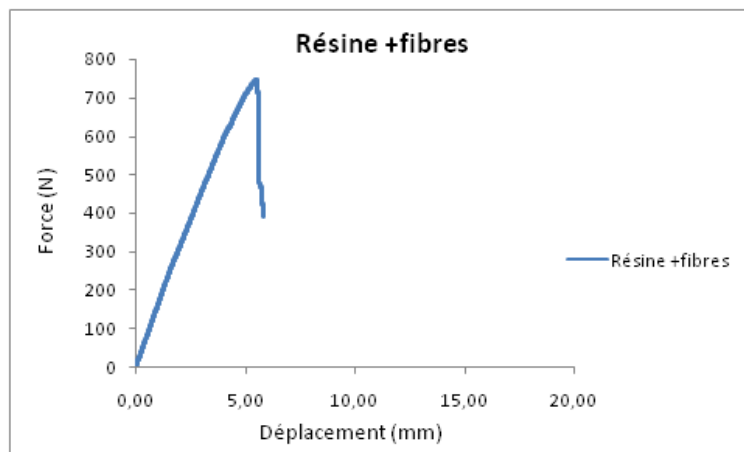


Figure V.14 courbe force-déplacement de l'essai de flexion de la résine renforcée en fibre de verre

V.1.2.3.1. Résultats de l'essai de flexion de la résine chargée en bois rouge et renforcée en fibre de verre

Deux matériaux composites renforcés en fibre de verre ont été élaborés ; le mélange résine polyester chargée en bois rouge avec les granulométries supérieur à 2mm et entre 2mm et 1mm.

➤ **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est supérieure à 2mm ($G_1 > 2\text{mm}$) et renforcée en fibre de verre**

L'ajout 2% de sciure de bois rouge de granulométrie supérieure à 2mm, affecte la résistance du matériau composite renforcé en fibre de verre. La résistance en flexion chute de la valeur 750 N pour le matériau composite résine plus fibre de verre, pour atteindre la valeur de 370 N pour le matériau composite renforcé et chargé avec du bois rouge de granulométrie supérieur à 2mm.

La sciure de bois joue un rôle négatif dans la cohésion résine fibre de verre.

La flèche dans ce cas de figure est plus importante que la flèche du matériau composite renforcé et non chargé (résine plus fibre de verre), on peut considérer que la sciure de bois constitue un absorbeur de choc au matériau composite.

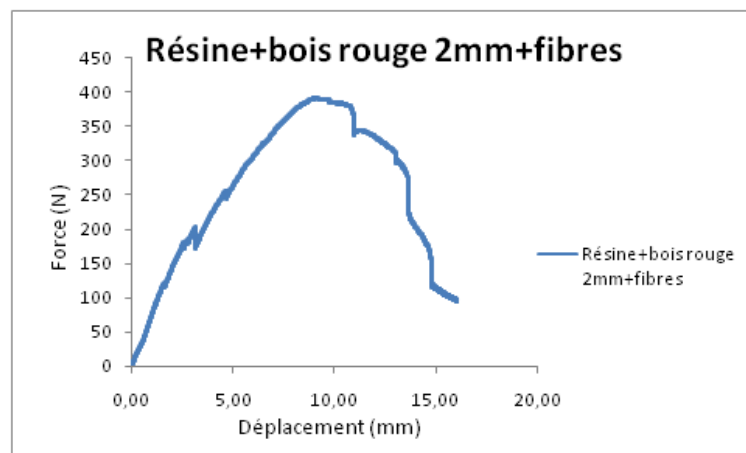


Figure V.15 courbe force-déplacement de l'essai de flexion du matériau composite renforcé en fibre de verre et chargé en bois rouge de granulométrie supérieure à 2mm

➤ **Résine polyester chargée avec du bois rouge dont la granulométrie est entre 2mm et 1mm ($2\text{mm} > G_2 > 1\text{mm}$) et renforcée en fibre de verre**

L'ajout de la sciure de bois rouge de granulométrie entre 1mm et 2mm, affecte la force mais augmente la flèche du matériau composite qui devient plus déformable et moins rigide.

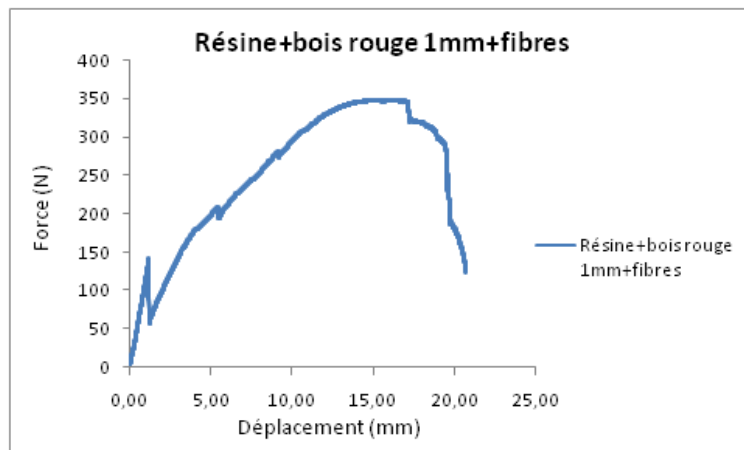


Figure V.16 courbe force-déplacement de l'essai de flexion du matériau composite renforcé en fibre de verre et chargé en bois rouge de granulométrie entre 2mm et 1mm.

V.1.3 Résultats de l'essai de résilience

L'éprouvette de résilience est de forme rectangulaire, sans entaille, dont les dimensions sont données dans le tableau V.3 ci-dessous :

Tableau V.3. Dimensions en mm des éprouvettes de résilience, selon la norme ISO 148.

Matériau	Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur L	Epaisseur h
Type III	85	40	15	4

Pour les éprouvettes de résine seule et de résine chargée en particule de bois, nous avons utilisé un marteau 2 J. Pour les éprouvettes de résine renforcée de fibre de verre tissées et chargées, nous avons utilisé un marteau 15 J.

Nous résumons les résultats obtenus pour l'essai de résilience dans le tableau V.4.

Tableau V.4. Résilience des matériaux composites élaborés.

Résine + charge	Résilience J/cm ²
Résine seule	17.59
résine + copeaux bois rouge 2 mm	26.39
résine + copeaux bois rouge 1 mm	26.91
résine + copeaux bois rouge 0.8 mm	10.86
résine + copeaux bois blanc 2 mm	19.20
résine + copeaux bois blanc 1 mm	13.97

Chapitre V: Résultats et discussions

Matériau composite	Résilience J/cm ²
Résine + fibre de verre	452,60
résine +fibre tissée + copeaux bois rouge 2mm	970.49
résine +fibre tissée + copeaux bois rouge 1mm	988.61

La résine polyester seule possède un comportement fragile, son énergie absorbée lors de l'essai de résilience est faible, elle est de 17,57 J/Cm².

L'ajout de la charge de bois rouge à la résine augmente sa résilience considérablement, lorsque la granulométrie du bois est supérieure à 2mm (26.39 J/Cm²) et aussi dans le cas où la granulométrie est entre 2mm et 1mm (26.91 J/Cm²).

La troisième granulométrie choisie pour le bois rouge est entre 1mm et 0,8mm, l'ajout de ce bois à la résine polyester fait chuter sa résilience jusqu'à 10.86 J/Cm².

Le bois rouge à l'état de poudre fine fragilise la résine, alors qu'il augmente la résistance aux chocs quand il à l'état de copeaux.

L'ajout du bois blanc à la résine (avec les deux granulométries ne donne pas de résultats concluants pour l'essai de résilience.

Conclusion

L'étude des caractéristiques physiques et mécanique des matériaux composites élaborés au travers des différents essais réalisés, nous a permis d'avoir des résultats qui nous indiquent les différents domaines possibles d'application des matériaux et leur comportement lors de leur utilisation.

- D'après les résultats obtenus lors des essais de traction, nous remarquons qu'il n'y a pas une grande augmentation de la résistance à la rupture en traction entre l'éprouvette de traction composée de résine et les éprouvettes de traction chargées avec des granulats de bois. Nous pouvons donc en conclure que le bois apporte une très faible amélioration.
- Dans le cas des éprouvettes de traction de la résine chargée en bois et renforcé en fibre de verre, la résistance à la rupture est significativement plus grande, ce qui est principalement dû à la présence du renfort.
- D'après les résultats obtenus lors des essais de flexion, dans le cas des éprouvettes de flexion, les résultats obtenus montrent une amélioration significative de la résistance à

Chapitre V: Résultats et discussions

la rupture avec l'ajout du bois à la résine. Ce qui est dû à la nature fibreuse du bois, donnant une meilleure résistance à la rupture en flexion.

- On remarque une augmentation considérable de la résistance à la rupture en flexion ayant triplé dans le cas du composite renforcé en fibre de verre et chargé en granulats de bois rouge de 2 mm et quadruplé dans le cas du composite renforcé en fibre de verre et chargé en granulats de bois rouge entre 1mm et 2 mm
- Le même phénomène est ainsi remarqué pour l'essai de résilience. La résilience du composite renforcé en fibre de verre et chargé en granulats de bois rouge est environ 2 fois plus grande que celle du matériau résine+ fibre de verre.

Conclusion générale

L'objectif général de ce travail est l'étude de l'influence de l'ajout de la sciure de bois sur le comportement mécanique de la résine polyester et du matériau composite résine polyester/fibre de verre.

Les échantillons ont été élaborés par moulage au contact. La sciure de bois est de deux natures : Bois rouge (hêtre) et bois blanc d'usage courant. La sciure est récupérée des déchets de l'industrie du bois. Les granulométries utilisées pour la sciure de bois sont :

Bois rouge : Copeaux de dimensions supérieurs à 2 mm

Copeaux de dimensions comprises entre 2 mm et 1 mm

Copeaux de dimensions comprise entre 1 mm et 0.8 mm

Bois blanc : Copeaux de dimensions supérieurs à 2 mm

Copeaux de dimensions comprises entre 2 mm et 1 mm

Des éprouvettes de traction, de flexion et de résilience ont été découpées selon les différentes normes, les essais mécaniques ont été effectués à température ambiante.

A travers cette étude nous avons constaté ce qui suit :

L'ajout de la sciure de bois influence négativement les propriétés mécaniques en traction quelque soit la nature du bois et quelque soit la granulométrie.

L'ajout de la sciure de bois rouge améliore le comportement mécanique en flexion de la résine polyester, ainsi que du composite résine polyester/fibre de verre ; les deux natures de bois ainsi que toutes les granulométrie de la sciure de bois sont concernées par cette amélioration, surtout la granulométrie supérieur à 2mm.

Pour le comportement mécanique vis-à-vis de la résistance aux chocs, on note que seul le bois rouge apporte une amélioration notable pour les granulométries de supérieures à 2 mm et entre 1mm et 2 mm. La résistance aux chocs du matériau composite est nettement améliorée par l'ajout du bois rouge.

En perspective, nous envisageons une analyse approfondie des différents bois afin de comprendre cette différence de comportement en qualité de renfort. Une observation au microscope électronique à balayage des faciès de rupture en traction, flexion et résilience pour voir la répartition des charges au niveau matériau composite ainsi qu'un aperçu sur l'interface charge/matrice.