



Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER
En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux
Présenté par :

NANOU Ikram & YOUSFI Hadjer

Thème

**ETUDE COMPARATIVE SUR LES COMPOSITES A
FIBRES DU PALMIER DATTIER**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HOCINE Mustapha	MCB	Président
BENHAMADOUCHE Lamia	MAA	Encadreur
MOUSSAOUI Nafissa	MAA	Examineur

Remerciements

Au nom de Dieu le Clément, le Miséricordieux. Et que la paix et le salut soient sur notre prophète Mohamed. En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de la vertu de sa grâce et de nous avoir donné la force pour achever ce modeste travail.

Nous adressons un très grand remerciement aux Mm.

BENHAMADOUCHE Lamia pour ses orientations et ses précieux conseils.

Nous souhaitons aussi remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et de participer à la soutenance.

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes, enseignants et collègues qui nous ont soutenus soit par leurs orientations, conseils ou bien prières.

Nous avons également une pensée affectueuse et nostalgique pour tous nos enseignants durant les trois cycles (Primaire, moyen et secondaire), qui ont contribué à notre éducation et enseignement dès notre plus jeune âge, que le bon Dieu leur accorde son vaste paradis

Sommaire

Chapitre I	4
Introduction.....	5
Les fibres naturelles	5
Fibres végétales	6
I.3.1. Définition de la fibre végétale.....	6
I.3.2. Classification des fibres végétales.....	6
I. 3.3. Différentes fibres végétales.....	7
I.3.4. Méthodes d'extraction	13
I.3.5 Morphologie de la fibre végétale	21
I.3.6. Structure de la fibre végétale	22
I.3.7. Composition chimique de la fibre végétale.....	23
I.3.8. Propriétés mécaniques de la fibre végétale.....	24
CONCLUSION	25
Chapitre II	26
INTRODUCTION	27
Généralités sur les matériaux composites	27
Classification des matériaux composites.....	33
II.3.1. Classement suivant la nature des constituants.....	33
II.3.2. Classement suivant la morphologie	34
Mise en œuvre et architecture des matériaux composites	35
II.4.1. Moulage au contact.....	35
II. 4. 2. Moulage par projection simultanée	35
II.4.3. Moulage sous vide.....	36
II.4.4. Moulage par projection de résine	36
II.4.5. Moulage par centrifugation	36
Structure du composite	37
II.5.1. Les monocouches	37
II.5.2. Les stratifiées.....	37
II.5.3. Les sandwichs	38
Procédés de fabrication des composites.....	39
COMPOSITES A BASE FIBRES NATURELLES.....	40
Propriétés des matériaux composites renforcés par des fibres végétales.....	41

II. 8.1. Propriétés mécaniques des composites	41
II. 8. 2. Propriétés thermiques	48
II. 8.3. Le composite matrice polymère / fibre naturelle	49
II.2.4. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales.....	51
II.2.5. Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales.....	52
II.2.6. Application des composites à base des fibres végétales.....	52
CONCLUSION	53
Chapitre III	54
Introduction.....	55
Etude morphologique du palmier dattier	55
III.2.1.Composants de palmier dattier.....	56
Caractéristiques thermophysiques des fibres de palmier dattier	57
III.3.1. Structure et morphologie	57
III.3.2. Propriétés physiques	58
III.3.3 Propriétés thermo-physiques.....	58
les travaux réalisés sur les fibres des palmiers dattiers	59
Conclusion	61
Références.....	63
Conclusion générale	77

Introduction générale

L'utilisation croissante de fibres végétales comme renforts dans les composites à matrices thermodurcissables ou thermoplastiques fournit des avantages environnementaux très intéressants. Les caractéristiques marquantes de ces fibres sont leur faible coût, faible masse, haut module spécifique. Le défi majeur dans l'utilisation de ces fibres comme éléments de renforcement dans les matériaux composites est de réaliser une bonne liaison entre les fibres et la matrice polymère. Les fibres naturelles sont de nature hydrophile, car elles sont dérivées de la cellulose, qui contient des groupes hydroxyles fortement polarisés. La mauvaise adhérence interfaciale fibre/matrice et les difficultés dans le mélange en raison de mauvais mouillage de la fibre avec la matrice limitent l'utilisation de ces fibres comme matière de renforcement dans les matériaux bio-composites.

L'Algérie possède des ressources naturelles renouvelables très importantes et parmi ces ressources, les palmiers dattiers. Plus de 18 millions de palmiers dattiers qui produisent plus de 800 variétés de dattes existent dans les oasis du sud Algérien. Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse, avec cinq types de fibres : fibres de feuilles dans le pédoncule, fibre de la tige de pédoncule, badigeonner fibres de la tige, les fibres de bois dans le tronc et les fibres de surface autour du tronc.

L'objectif de ce mémoire est de parler sur la fibre extraite du palmier dattier ensuite faire une étude comparative entre les différentes références disponibles qui fournissent un lien direct avec le sujet.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré, à l'étude bibliographique sur les fibres naturelles (définition, caractéristiques générales, classification, avantages et inconvénients...).

Le deuxième chapitre, on s'intéresse à une étude sur les composites à base de fibre naturelles, nous apportons une connaissance des matériaux composites en présentant les différents constituants des composites.

Le troisième chapitre est de parler sur les travaux réalisés sur les fibres des palmiers dattiers

Le mémoire se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives à envisager lors d'étude complémentaires.

Chapitre I :

Généralités sur les fibres naturelles

I. 1. INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, l'homme a élaboré des matériaux composites par combinaison de matières de natures différentes dans le but d'obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques.

De nombreux matériaux naturels lui ont fourni des modèles, tel que l'os rigide mais léger, formé de fibres de collagène dans une matrice minérale d'apatite dure et fragile, ou le bois, souple mais résistant formée d'un réseau de microfibrille de cellulose cimentée dans une matrice d'hémicellulose et lignine [1, 2].

La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940 n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'application Dans des domaines varies ; l'industrie aérospace, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration etc [3].

Toutefois, même si le développement des composites est qualifié de prometteur cette progression est néanmoins jalonné de quelques contraintes à surmonter dont par exemple celles liées à l'environnement, l'hygiène et la sécurité.

La valorisation des matériaux composites classiques avec leur armature en fibres de verre, d'aramide, ou bien de carbone pose un grand problème à leur fin de vie. Pour y palier les fibres naturelles sont mises.

Elles sont issues de ressources renouvelables elles sont biodégradables. Elles sont moins irritantes pour la peau et le système respiratoire des personnes qui les manipulent. Par ailleurs les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres minérales [4, 5].

Le faible coût et les propriétés mécaniques spécifiques élevées (résistance et rigidité) des fibres végétales sont des avantages essentiels. Au contraire, leur propension à absorber de l'eau en grande quantité et leur faible tenue en température tendent à les dévaloriser [6].

I. 2. LES FIBRES NATURELLES

Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine. Il est donc possible de distinguer trois grandes familles [7] :

- Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok) ;

- Les fibres animales : elles peuvent émaner des poils (toison animale) ou encore des sécrétions (soie) ;

- Les fibres minérales (amiante).

La figure I-1 illustre la classification des fibres naturelles

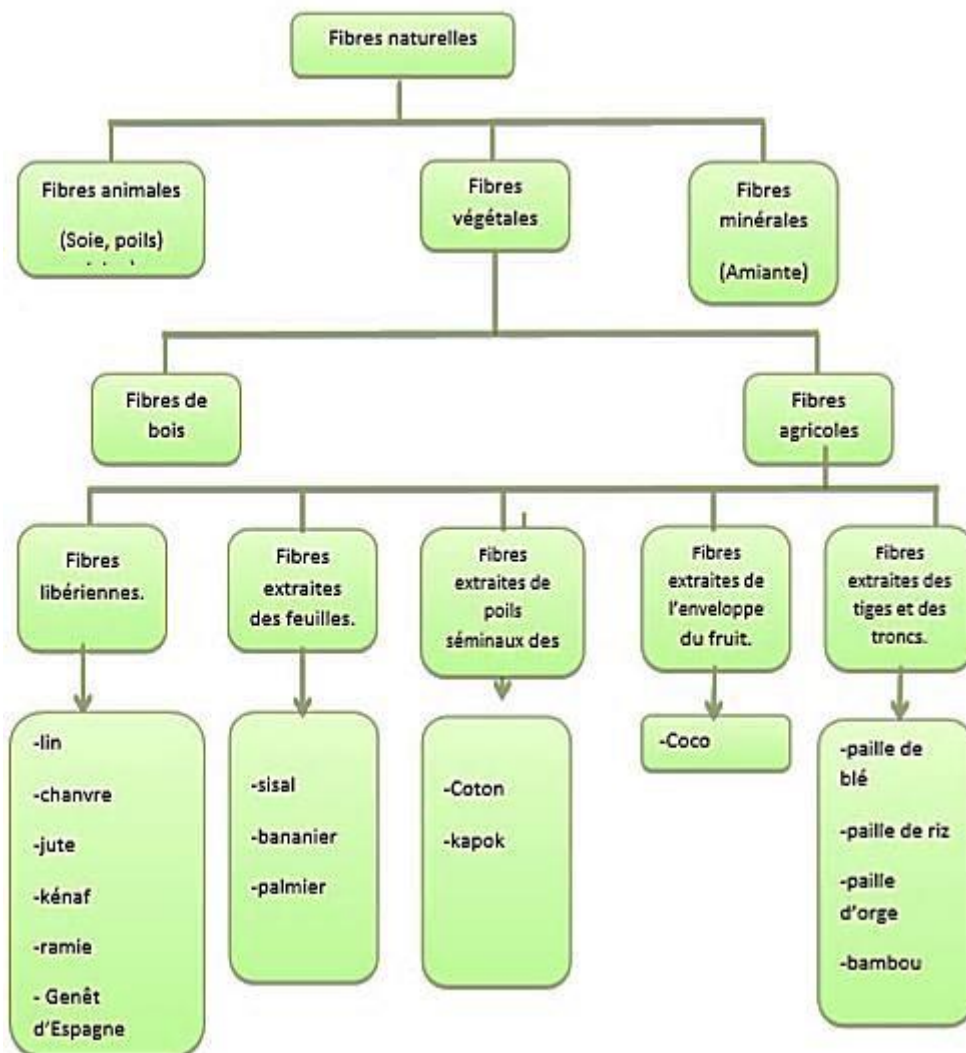


Fig. I.1. Classification des fibres naturelles et quelques exemples [8].

I. 3. FIBRES VEGETALES

I. 3. 1. Définition de la fibre végétale :

-Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [9].

I. 3. 2. Classification des fibres végétales :

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

✓ Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénaf, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca, paille de graminée) [10].

✓ Suivant leur teneur en (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kéraf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [9].

✓ Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine [10].

I. 3. 2. Différentes fibres végétales

Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux de constructions. Elles constituent en effet une ressource renouvelable, naturellement biodégradable, et disposant de nombreuses qualités mécaniques et hydriques. Les plus utilisées sont les fibres libériennes, comme le Kéraf, le jute, la ramie, le palmier et surtout le chanvre et le lin [10].

I. 3. 2. 1. L'abaca

L'abaca ou chanvre de manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudotrunc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, et aussi de rabanes, nappes, stores, vêtements [11].



Fig. I. 2. Fibre de l'abaca

I. 3. 2. 1. Le lin

Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines (Fig. I. 3). L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. Cette fibre est utilisée pour fabriquer des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier bible.



Fig. I. 3. Fibre de lin

Les fibres du lin permettent de faire des cordes, du tissu, ou plus récemment des charges isolantes pour des matériaux de construction. Les graines sont utilisées pour produire de l'huile de lin pour l'industrie de l'encre et de la peinture, pour la consommation humaine et animale, à cause de sa richesse en oméga 3. Le lin est une des rares fibres textiles végétales européennes. Elle a la particularité d'être une fibre longue (plusieurs dizaines de centimètres), par rapport aux fibres courtes (coton, chanvre) ou moyennes (laine).

I. 3.3. 3. Le chanvre

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le Kénaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses (Fig.I.4). Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie. La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre. Les fibres libériennes sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et dur emplissage ce qui constitue d'ailleurs le principal emploi actuel et à venir de la fibre de chanvre. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique. Ses caractéristiques physiques lui confèrent une grande force, ainsi qu'une excellente rentabilité dans le domaine des composites et du papier.



Fig. I. 4. Fibre de chanvre

Le chanvre est originaire d'Asie centrale mais on trouve sa trace en Chine 5000 ans avant JC. Au tour du bassin méditerranéen sa culture a été prospère pendant plusieurs siècles. On l'utilise pour faire des toiles de maison, des cordages maritimes, des vêtements et plus tard du papier.

I. 3. 3. 4. Le coton

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut (Fig. I.5). Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage.



Fig. I. 5. Fibre de coton

I. 3. 3. 5. Le Kénaf

Le Kénaf est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du sud. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux (Fig. I. 6).



Fig. I. 6. Fibre de le kénaf

Le Kenaf porte de nombreux noms autour du monde : chanvre de Deccan, chanvre de Bombay, chanvre de Guinée, Pokaeo. Cette plante ne supporte pas le gel, on la trouve dans les

régions tropicales et subtropicales. Africaine d'origine, elle est cultivée aussi en Asie et en Amérique du Sud, là où les conditions climatiques lui conviennent.

I. 3. 3. 6. Le jute

Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kénaf (Fig. I. 7)



Fig. I. 7. Fibre de jute

Le jute est fortement lignifié, robuste, sert à fabriquer des sacs solides (pour le charbon, les pommes de terre), et des semelles d'espadrilles.

I. 3. 3. 7. Le sisal

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2m de long (Fig. I. 8). Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm.



Fig. I. 8. Fibre de Sisal

Le sisal provient d'un agave originaire du Mexique dont les feuilles possèdent de longues fibres très résistantes utilisées pour la fabrication de cordages, tissus grossiers, tapis, sacs et autres objets artisanaux ou à usage domestique, destinés le plus souvent à l'exportation. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. Le Sud Malgache est une zone de culture de cette plante. Les conditions climatiques font que ces fibres

de sisal sont bien classées sur le marché international des fibres dures.

Son nom provient de la ville de Sisal, située dans l'état mexicain du Yucatán. C'est à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier. Elle était jusque dans les années 1970 bien connue des agriculteurs européens sous forme de ficelle servant à lier les bottes de foin. Elle a, depuis l'apparition des presses à bottes haute densité, été remplacée par de la ficelle en polypropylène.

Actuellement encore, les mouvements scouts et éclaireurs utilisent beaucoup ce type de ficelle pour assembler les constructions du mobilier de camp, assemblage selon la méthode Froissart où ni clous ni vis ne sont utilisés. Elle est également utilisée dans la fabrication des cibles traditionnelles de jeu de fléchettes ou de tir à l'arc. On l'utilise également pour fabriquer des disques de polissage.

Elle trouve aussi son utilité dans le bâtiment (construction), en effet les fibres de cette plante sont utilisées comment stabilisateurs (par armature) dans le béton de terre (terre crue).

Le sisal peut être teint et on le trouve parfois associé à d'autres fibres végétales. Il absorbe l'humidité des pièces dans lequel il se trouve. Il convient particulièrement aux chambres. Très doux, le tissage du sisal est très agréable. Les Aztèques savaient déjà utiliser le sisal pour en faire du papier, du fil à coudre, des cordes, des nattes et des chaussures

I. 3. 3. 8. La ramie

La ramie est une plante arbustive. Originale d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 μm . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides la figure (I. 9) représente fibre de ramie.



Fig. I.9.Fibre de ramie

Les fibres des tiges de la ramie (*Boehmerianivea* (L.) Gandisch, Urticaceae, "ortie de Chine") sont constituées de cellulose quasi pure de très bonne qualité et utilisées pour le tissage et la fabrication de papiers résistants. Les fibres sont longues (50 à 250 mm), très solides (un fil

ne peut être cassé à la main), imputrescibles, brillantes de sorte que les étoffes rappellent la soie et ont été qualifiées de "soie végétale".

I. 3.3. 9. Le coco

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau (Fig. I. 10). Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.



Fig. I. 10. Fibre de coco

I. 3. 3. 10. L'alfa

L'alfa, *Stipa tenacissima* L., est une plante herbacée (Graminées) d'Afrique du Nord et d'Espagne (ou spart) utilisée pour la fabrication de cordages, d'espadrilles, de tissus grossiers, de papier, tapis, paniers. D'une façon générale, la fabrication d'objets en fibres végétales se nomme sparterie.



Fig. I. 11. Fibre d'alfa

I. 3. 3. 11. Palmier dattier

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties à savoir : les palmes, la jeune palme, le régime de dattes, les dattes, le gourmand, Le stipe, les cicatrices annulaires, le rejet, le bulbe, les racines [2]. Figure (I. 12) illustre la fibre de palmier dattier.



Fig. I. 12. Fibre de palmier dattier.

I. 3. 4. Méthodes d'extraction

Le processus d'extraction consiste à extraire des faisceaux de fibres de la tige récoltée. Selon la littérature, l'extraction des fibres végétales peut être effectuée par un procédé mécanique, biologique, chimique ou par Combinaison entre les trois méthodes [12].

I. 3. 4. 1. L'extraction mécanique

L'extraction mécanique des fibres comprend diverses étapes, développées depuis l'Antiquité, principalement pour récupérer les fibres de chanvre et de lin. Aujourd'hui, ce traitement est un processus complètement automatisé mais les étapes n'ont pas changé [12].

1. Par teillage

Il s'agit d'un procédé permettant de rompre l'adhésion et séparer les fibres entre elles du corps de la tige en ouvrant les faisceaux de fibres pour aboutir à des faisceaux plus fins. Durant ce processus le cœur de la tige est brisé à plusieurs reprises en petits morceaux tout en gardant les propriétés des fibres. Ils existent deux méthodes principalement utilisées pour cet effet : les rouleaux tournants et les broyeurs à marteau [13, 14].

Cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre, les tiges sont prises par leurs extrémités et insérées dans le tilleul ou l'écang (instrument manuel à levier) si l'opération est manuelle. Les tiges sont battues pour enlever le bois, et cette opération est répétée jusqu'à ce que les fibres soient le plus souples possible.

Les morceaux de bois récupérés sont appelés les "anas". Cette méthode ancestrale a été toujours effectuée manuellement avant de laisser la place aux machines, nous retrouvons aujourd'hui des systèmes complètement automatisés qui engagent, maintiennent et dégagent automatiquement les tiges sans aucune intervention humaine grâce à des systèmes de roues cannelées à grosses dentures au début puis à plus fines denture (Figure I.13). Par la suite, elles passent sous la cannelure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace. L'opération est effectuée successivement côté pied et côté tête. Les fibres courtes appelées aussi étoupes, moins résistantes, Et les anas sont récupérées par aspiration et séparées.

Cette technique est améliorée si les tiges au départ sont dures et sèches, d'où la nécessité d'une étape préliminaire qui consiste à chauffer les tiges dans un four ou par un fumage. Enfin, pour donner aux fibres obtenues un meilleur aspect, les faisceaux de fibres sont divisés et parallélisés par une opération de peignage et séparés selon leur longueur [15].



**Fig. I. 13. a) Ecang pour teillage manuel
b) cylindres cannelés pour teillage mécanique [16].**

2. Par déflexion

L'extraction des fibres se fait par action combinée de grattage et de battage, les machines s'appellent "raspadores" (grattoir en langue espagnole), elles râpent les feuilles de la plante et libèrent les fibres. Ces machines principalement constituées par un axe rotatif entraîné par un moteur, sur lequel des supports maintiennent des batteurs en acier ont été fixés. Les tiges insérées en amont de la machine, sont prises entre ces batteurs et une table à ciseaux, râpées et guidées vers le côté opposé [17]. La poudre et le bois passent à travers des cribles. La distance qui sépare les lames est réglable en fonction du lot [18].

3. Par laminage

Les tiges sont découpées en morceaux qui sont ensuite écrasés sous presse ou par laminage ou encore par combinaison des 2 traitements. Ceci est effectué plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient le plus possible séparées [19].

4. Par explosion à la vapeur

L'explosion à la vapeur connue également sous l'appellation anglaise "Steam explosion" parue en 1924 est un procédé thermo mécanochimique qui permet la déstructuration de la matière lignocellulosique par l'action combinée de la chaleur issue de la vapeur, des hydrolyses induites par la formation d'acides organiques et du cisaillement résultant de la chute brutale de pression [20].



Le procédé est composé de deux phases distinctes :

- **Le vapocraquage** : cette 1^{ère} phase consiste à faire pénétrer la vapeur sous haute pression par diffusion à l'intérieur de la structure du matériau. La vapeur va ainsi se condenser et en présence d'une haute température va initier l'hydrolyse des groupements acétylés et méthylglucuroniques contenus dans les xylanes et dans certaines fraction galactomannanes. Les acides organiques libérés augmentent l'acidité du milieu et catalysent la dépolymérisation de la lignine [16].

- **La décompression explosive** : cette 2^{ème} phase consiste à une chute brutale de pression ce qui va provoquer la vaporisation d'une partie de l'eau présente dans le matériau. Cette expansion brutale de la vapeur d'eau va créer des forces de cisaillement assez importantes pour réussir un éclatement mécanique dans la structure du matériau. Ces actions combinées vont, selon les conditions, modifier les propriétés physiques du matériau (surface spécifique, rétention d'eau, coloration, taux de cristallinité de la fraction cellulosique,...), améliorer l'hydrolyse des fractions hémicellulosiques et induire des modifications dans la structure des lignines, ce qui facilite leur extraction. Le schéma de principe de la ligne d'explosion à la vapeur est composé d'un générateur de vapeur qui alimente un réacteur, celui-ci sera soumis à une dépressurisation brutale. Lors de la dépressurisation, la matière est éjectée du réacteur et est récupérée au niveau d'un éclateur [21].

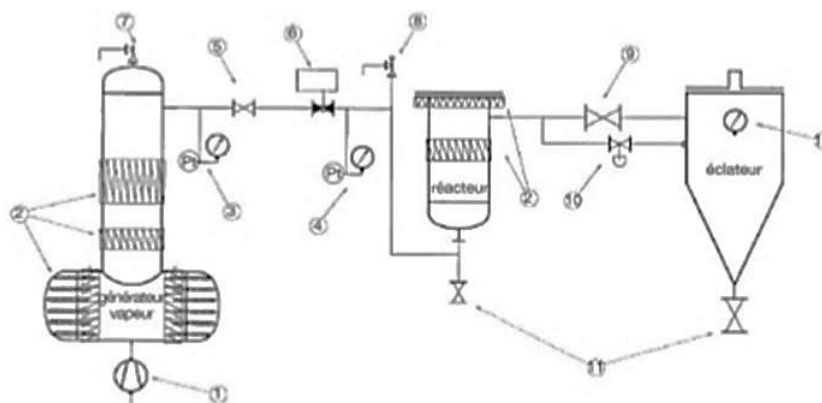


Fig. I. 14. Schéma général d'une installation de Steam explosion [16]

- 1 : pompe haute pression
- 2 : colliers chauffants
- 3 : mesure de pression et de température du générateur
- 4 : mesure de pression et de température du réacteur
- 5 : vanne d'isolement
- 6 : vanne de mise en charge
- 7 : soupape de sécurité du générateur
- 8 : soupape de sécurité du réacteur
- 9 : vanne d'éclatement
- 10 : vanne de purge lente
- 11 : vannes de récupération des produits
- 12 : manomètre éclateur

Tous ces procédés d'extraction mécanique souffrent de deux problèmes majeurs. Le

premier réside au niveau du risque élevé de chute de propriétés mécaniques des fibres suite aux sollicitations mécaniques qui peuvent être agressives et altérer les caractéristiques intrinsèques de fibre et ceci quel que soit le mode de séparation suivi [19]. Le deuxième étant le prix élevé des lignes d'extraction et leur encombrement, ce qui n'est pas toujours rentable quand il s'agit de petites productions. Selon une étude faite par ATB (Agrartechnik Bornim – Allemagne), le seuil de rendement est estimé à 3 tonnes/heure [16].

I. 3. 4. 2. L'extraction chimique :

Plusieurs méthodes basées sur la séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulodiques existent dans la bibliographie. Elles permettent d'éviter les inconvénients de l'extraction mécanique, et surtout un gain de temps et d'énergie considérables. En ce qui concerne le rouissage à l'eau à terre, les processus chimiques sont parfois préférables, car ils produisent des fibres caractérisées par une qualité constante et élevée, quelles que soient les conditions climatiques, généralement dans des durées plus courtes [12]. De nombreux traitements chimiques peuvent être effectués sur les fibres en fonction de leur type, du processus de rouissage à appliquer et des applications finales [16, 18, 22].

1. Procédé Kraft :

Ce procédé alcalin visant à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'Hydroxyde de Sodium (NaOH) et de Sulfure de Sodium (Na_2S), ce dernier est un réducteur, il protège la cellulose et évite son oxydation. La température de cuisson est comprise entre 170° et 175°C pour une durée de 2 à 4 heures. Lors de la cuisson, le sulfure de sodium est hydrolysé en soude, en NaHS et en H_2S . Les différents composés soufrés présents réagissent avec la lignine pour donner des thiolignines plus facilement solubles. La soude joue aussi un rôle de délignification qui s'associe à celui du sulfure et de ses dérivés. La liqueur appliquée au matériau est appelée liqueur blanche. La liqueur extraite du réacteur contenant les composés éliminés de la paroi est appelée liqueur noire [16, 23].

2. Procédé au bisulfite :

Le procédé au bisulfite permet de séparer la lignine des fibres de cellulose en utilisant divers sels de l'acide sulfureux. Les sels utilisés dans le processus de réduction sont en fonction du Ph: des sulfites (SO_3^{2-}) ou bisulfites (HSO_3^-). Il est basé sur la réaction sur la lignine de l'hydrogénosulfite de calcium, sodium, ammonium ou magnésium contenant de l'anhydride sulfureux libre. L'anhydride sulfureux est préparé par combustion à partir du soufre dans un excès d'air. Le bisulfite est directement obtenu par réaction de l'anhydride sulfureux. Le pH

est situé entre 1.5 et 5 (sulfites ou bisulfites), la durée est entre 4 et 14 heures et la température de 130° jusqu'à 160°C qui sont aussi en fonction de la base utilisée [16].

3. Procédé acide :

Les composants non cellulotiques sont éliminés par l'action d'un acide de préférence fort tel que l'acide sulfurique qui transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou l'acide chlorhydrique qui, grâce à ses ions chlorates, forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium [16].

4. Procédé Soude-Anthraquinone :

Le procédé Soude-Anthraquinone ou Kraft-Anthraquinone utilise un catalyseur tel que les composés qu'ioniques dont fait partie l'anthraquinone. De ce fait, le temps de cuisson peut être réduit et le rendement en pâte augmenté. Les propriétés de ces pâtes sont comparables à celles des pâtes kraft. L'indice kappa est comparable à celui des pâtes kraft. L'effet de l'anthraquinone est plus marqué sur le procédé à la soude (procédé n'utilisant que la soude comme agent de délignification) [12].

5. Procédé à la soude :

Ce procédé n'utilise que la soude NaOH pour dissoudre les substances non cellulotiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les différents constituants formant la réserve et la paroi extérieure de la tige de plante. La température, la pression, la concentration et la durée du traitement sont à définir en fonction du lot, l'âge et le type de la plante de telle façon à ne pas dégrader les fibres cellulotiques. Il est conseillé de contrôler le pH de la solution et l'ajuster autour de 7. Des réducteurs peuvent être rajoutés pour empêcher l'oxydation de la cellulose [24] [16].

I. 3. 4. 2. L'extraction biologique :

1. Le rouissage à terre :

Le rouissage à terre (au champ) est un procédé naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres, il consiste à étaler les tiges dans un champ après sa récolte, afin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie ce qui va favoriser le développement de microorganismes capables de dissocier les éléments non cellulotiques de la partie fibreuse de la plante par élimination des liaisons qui les relient ensemble. Cette opération peut durer 6 à 8 semaines en fonction de la météo [25]. Malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs handicaps qui résident dans sa dépendance entière des conditions météorologiques, le

moindre problème tel qu'un excès d'humidité ou un manque peut affecter directement la qualité des fibres obtenues. En effet si les tiges sont trop rouies, elles doivent être brûlées obligatoirement car elles pourrissent difficilement et lentement, et favorisent ainsi l'éclosion de maladies pour la culture suivante. Si la récolte n'est pas assez rouie, elle n'est pas transformable, et donc invendable. Un autre paramètre difficile à contrôler et qui nécessite un bon dosage, c'est le vent qui peut être à la fois un ennemi et un allié lors du rouissage [26].

Quand il souffle trop fort, les tiges sont emportées vers l'extrémité du champ, mais il est nécessaire au séchage, c'est donc l'alternance des périodes de sec et d'humidité avec un vent léger qui favorise un bon rouissage. Une autre difficulté de ce procédé est sa durée très longue. Donc le rouissage à l'air est un procédé efficace si la météo est bonne mais qui reste très lent, par conséquent c'est un procédé aléatoire [16]. La rouille récoltée est dispersée dans les champs où des microorganismes indigènes, principalement des champignons filamenteux, se développent sur la plante et dégradent en partie les polysaccharides dans les parois cellulaires et les lamelles moyennes, libérant ainsi les fibres pour un traitement ultérieur. Toutefois, le rouissage à terre présente plusieurs inconvénients : seules quelques régions du monde ont un climat approprié, une qualité de fibre variable et inférieure est produite par rapport au rouissage à l'eau, des risques de dépassement de la surface se produisent et une terre inutilisable pendant de longues périodes. La poussière et les contaminants fongiques peuvent également causer des problèmes de santé [27].

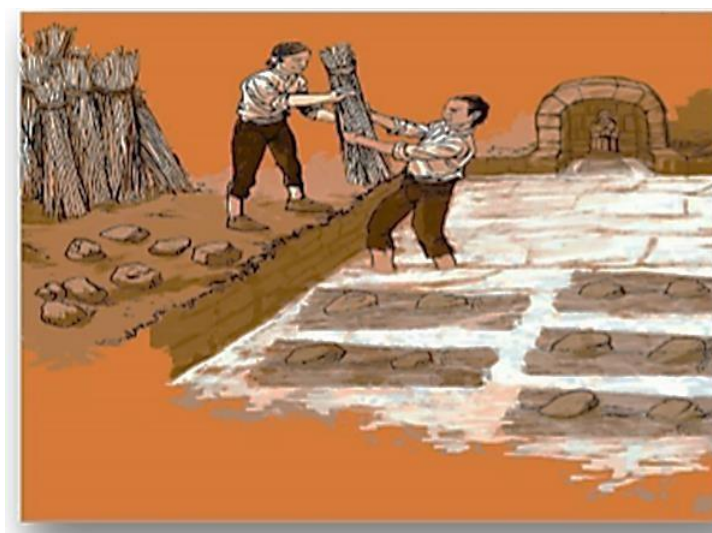


Fig. I. 15. Rouissage du lin

2. Le rouissage à l'eau :

Ce type de rouissage repose sur le même principe de développement de microorganismes que le rouissage à l'air, la différence est que les tiges sont plongées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les bottes de 5 à 7 Kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres

se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne des résultats moins aléatoires que la première mais elle présente un handicap majeur : la pollution de l'eau. Le rouissage à l'eau est effectué en général en cuve, dans de l'eau tempérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non adhérentes. Cette technique est en régression au profit du rouissage à terre [16]. Voir (Figure. I. 16) La quantité considérable de recherches investies dans l'amélioration du procédé montre clairement que le rouissage constitue une limite majeure à la production efficace de fibres de lin. Le rouissage à l'eau, qui dépendait de la fermentation des polysaccharides de la matrice par les bactéries anaérobies, était la principale méthode utilisée auparavant. La pollution résultant de ce processus de fermentation ainsi que les coûts élevés liés à la dessiccation et à l'assèchement de la nappe phréatique sont remplacées par la formation de rosée comme principale méthode d'isolement des fibres au cours des dernières décennies [27].



Fig. I. 16. Rouissage à l'eau de tiges de jute.

3. Par action microbienne (enzymatique) :

L'extraction microbiologique est une méthode d'extraction traditionnelle et très répandue. Elle est généralement effectuée à l'aide d'enzymes de la pectine sécrétées par la microflore [28].

Trois groupes d'agents microbiens sont capables de dégrader les composants non cellulotiques présents dans les tiges ou les feuilles des plantes : les bactéries, les protozoaires et les champignons. Dans la première catégorie de bactéries, il existe trois espèces, une qui possède une activité dépolymérase et une autre glycosidasique capables d'hydrolyser la chaîne principale et de couper les chaînes latérales en utilisant les oligosaccharides et les oses libérés. La deuxième possède uniquement une activité dépolymérase mais incapable d'utiliser les produits d'hydrolyse des hémicelluloses. Enfin la troisième, qui possède des activités glycosidasiques mais dépourvue d'activité dépolymérase. Plusieurs espèces des protozoaires

sont capables de dépolymériser les hémicelluloses, ainsi que pour les substances pectiques, mais elles n'ont qu'une capacité limitée à utiliser les produits d'hydrolyse comme source d'énergie. Concernant les champignons, ils sont capables de dépolymériser les hémicelluloses et d'utiliser les oligosaccharides et les oses libérés, et de solubiliser partiellement la lignine. Cependant, elles ne peuvent pas dépolymériser les pectines [18].

I. 3. 4. 3. L'extraction combinée :

Ce procédé d'extraction consiste à la combinaison de plusieurs procédés d'extraction des procédés cités auparavant, pour avoir des fibres de meilleures qualités. Les types d'extractions choisis dépendent de plusieurs facteurs, entre autres le type de plante et les qualités voulues [14].

Ces procédés de séparation des fibres généralement utilisés de nos jours sont schématisés dans le diagramme de la figure (I.17).

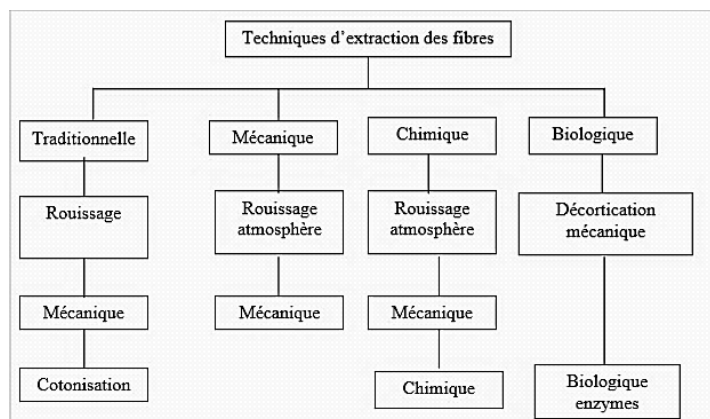


Fig. I. 17 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales [29].

I. 3. 5. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (Fig. I. 18) [30].

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [31].

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice. (Fig. I. 18) présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton.

D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la



micromécanique des composites renforcée par de telles fibres [32].

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (µm)	Angle micro fibrillaire (°)	Référence
Cotton	35	10-45	-	[40]
Lin	4-77	5-76	10	[30]
Chanvre	5-55	10-51	6.2	[41]
Kénaf	2.5-4.5	14-33	-	[42]
Jute	2.5	5-25	8	[42]
Sisal	900	8-50	20	[40]
Rami	900-1200	20-80	7.5	[40]
Noix de coco	03-1	12-24	45	[30]

Tab. I. 1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.

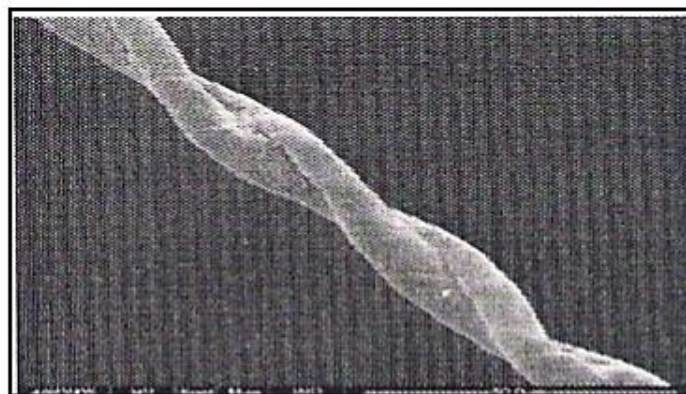


Fig. I. 18 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [32]

I. 3. 6. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine [33].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de

microfibrilles (S1, S2, S3) (Fig. I. 19).

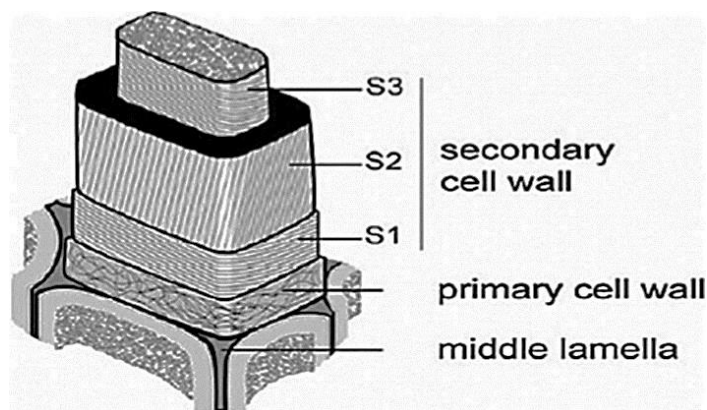


Fig. I. 19. Structure du bois (observations multi échelles) [34].

Les microfibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente [2].

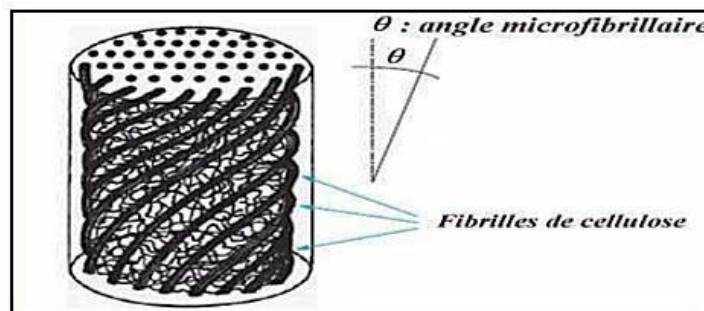


Fig. 1. 20 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [33].

I. 3. 7. Composition chimique de la fibre végétale

Les différents constituants des fibres végétales (Fig.I.21) sont :

- **La Cellulose** : La cellulose est le principal composant dans la quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse) [10]. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne des fibres en cellulose [35].

- **Hémicellulose** : Les hémicelluloses représentent le 3^{ème} composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids à peu près 25% de la biomasse [10]. L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [35].



- **Lignine** : La lignine forme avec la cellulose et l'hémicellulose la grande majorité de la biomasse, elle est 2^{ème} après la cellulose en termes d'abondance. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition (barrière de protection biologique) [36]. La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel [35].

- **Pectines** : Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois) [36].

- **Extractibles** : Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques [36].

Le tableau I. 2. illustre la composition chimique (en %) de différentes fibres végétales

Fibres	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Pectine	Cire
Coton	85-90	5,7	0,7-1,6	0-1	0,6
Lin	71	18,6-20,6	2,2	2,3	1,7
Chanvre	70-74	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9	0,8
Jute	61,1-71,5	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5
Ramie	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9	0,3
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2
Coco	32-43	0,15-0,25	40-45	3-4	-
Alfa	45	24	24	5	2

Tab. I. 2 : Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales.

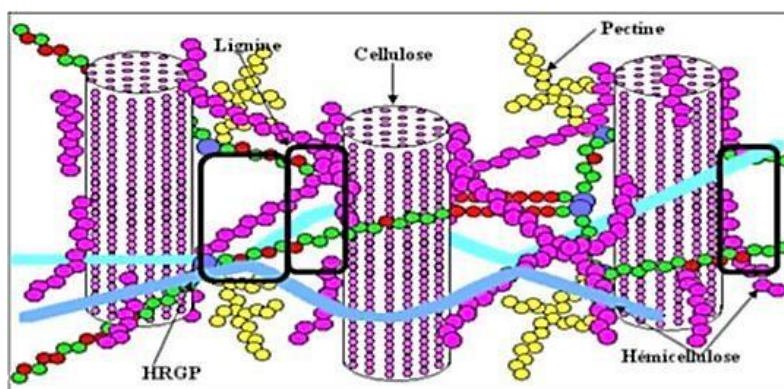


Fig. I. 21 : Exemple Représentation schématique d'une fibre de bois [37].



I. 3. 8. Propriétés mécaniques de la fibre végétale

Il est très difficile de présenter un tableau qui répertorie toutes les propriétés des fibres lignocellulosiques. La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques.

La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales ($1,2$ à $1,5 \text{ g/cm}^3$) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.

La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant un module d'élasticité relativement plus élevé (90 - 137 GPa), comparé à celui de la fibre de verre qui est de 75 GPa .

Les fréquents défauts structuraux (Fig. I. 22) observés de la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres.

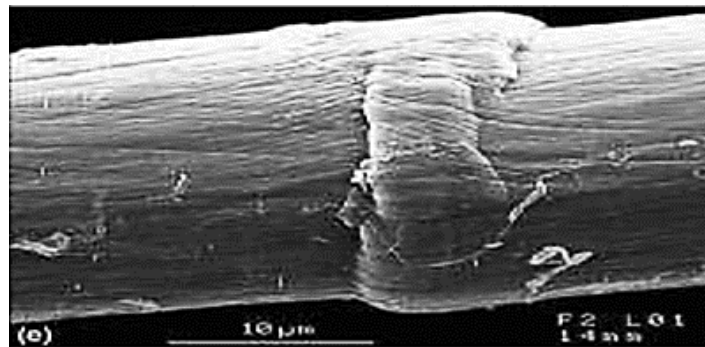


Fig. I. 22 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [38].

Le tableau I. 3 ci-dessous présente les propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec certaines fibres de renforcement conventionnelles

Fibre	Densité (g/cm^3)	Allongement (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393-773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345-1035	27.6
Chanvre	—	1.6	690	—
Ramie	—	3.6-3.8	400-938	61.4-128
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511-635	6.4-22.0
Coco	1.2	30.0	175	4.0-6.0
Verre E	2.5	2.5	2000-3500	70.0
VerreS	2.5	2.8	4570	86.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000-3150	63.0-67.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	230.0-240.0

Tab. I. 3 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [39].

I. 3. 9. Avantages et inconvénients :**✓ Avantage :**

- ❖ Faible cout.
- ❖ Propriétés mécaniques spécifiques importants (résistance et rigidité).
- ❖ Biodégradabilité.
- ❖ Non abrasif pour les outillages.
- ❖ Neutre pour l'émission de co2.
- ❖ Demande peu d'énergie pour être produite.
- ❖ Pas de résidus après incinération.
- ❖ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.
- ❖ Bonne isolation thermique et acoustique.
- ❖ Ressource renouvelable.

✓ Inconvénients :

- ❖ Absorption d'eau.
- ❖ Faible stabilité dimensionnelle.
- ❖ Biodégradabilité.
- ❖ Faible tenu thermique (20 à 30°C max).
- ❖ Fibres anisotropes.
- ❖ Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo.
- ❖ Pour des applications industrielles demande la gestion d'un stock.

I. 4. CONCLUSION

L'utilisation des fibres naturelles au niveau industriel permet de réduire le cout et le poids des pièces, et d'améliorer les perspectives de recyclage et d'impact environnemental, en particulier sur les applications automobiles. Dans le domaine du bâtiment, l'intérêt est économique et technique avec des niveaux d'isolation thermique largement supérieurs aux matériaux courants.

Références :**Chapitre I**

- [1] A. Y. Nenonene, "Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [2] F. Laurans, A. Déjardin, J. Pilate, "Physiologie de la formation des parois de fibres de bois", composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39, 2006.
- [3] N. Anil "composite get greener", Material today, Vol 45, pp12, 2001.
- [4] E. BODROS, C. BALEY, "Etude des propriétés de biopolymère renforcés par des fibres de lin aléatoirement dispersées dans le plan de stratification", propriété aux interfaces et composites, Université de Bretagne-Sud, 2006
- [5] F. Gouanvé, S. Marais, M. Métayer, "composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin", composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.117-128, 2006
- [6] M. Nardin, "interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales", revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006.
- [7] C. Baley. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Technique de l'ingénieur, traité génie des procédés, Vol. AM5, 2004, pp. 130.
- [8] J.E.G. Van Dam et H.L. Bos, «Consultation sur l'impact environnemental des fibres naturelles dans les applications industrielles», Congrès de Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, 2004, 263p
- [9] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [10] Zapata Massot Céline, « synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux », institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004.
- [11] <http://www.ac-nice.fr/>
- [12] Kalia S. Lignocellulosic Composite Materials: Springer; 2017.
- [13] Bouzouita S. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel: Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir; 2011.
- [14] Zakikhani P, Zahari R, Sultan M, Majid D. Bamboo fibre extraction and its reinforced polymer composite material. Int J Chem, Mater Sci Eng 2014;8:54-7.
- [15] Msahli S, Chaabouni Y, Sakli F, Drean J. Mechanical behavior of Agave Americana L. Fibres: Correlation between fine structure and mechanical properties. Applied Sci 2007;7:3951-7.
- [16] Dallel M. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil: Université de Haute Alsace-Mulhouse; 2012.
- [17] Das P, Nag D, Debnath S, Nayak L. Machinery for extraction and traditional spinning of plant fibres. 2010.
- [18] Msahli S, Sakli F, Drean J-Y. Study of textile potential of fibres extracted from Tunisian Agave Americana L. AUTEX Research Journal 2006;6:9-13.
- [19] Do Thi VV. Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non: Université de Grenoble; 2011.
- [20] Labidi K, Cao Z, Zrida M, Murphy A, Hamzaoui AH, Devine DM. Alfa fiber/polypropylene composites: Influence of fiber extraction method and chemical treatments. Journal of Applied Polymer Science 2019; 136:47392.
- [21] Kessler R, Becker U, Kohler R, Goth B. Steam explosion of flax—a superior technique for upgrading fibre value. Biomass and Bioenergy 1998; 14:237-49.
- [22] Sayeb S, Marzoug I, Hassen MB, Sakli F, Rodesli S. Study of water sorption properties for esparto grass ultimate fibre (ALFA fibre). Journal of the Textile Institute 2010; 101:19-27.
- [23] Maafi EM, Tighzert L, Malek F. Elaboration and characterization of composites of castor oil based polyurethane and fibers from alfa stems. Journal of Applied Polymer Science 2010; 118:902-9.
- [24] Marzoug IBA, Sayeb S, Hassen MB, Sakli F, Rodesli S. Study of Some Properties of the Esparto Grass Fiber Waste (ALFA Fiber). Journal of Textile and Apparel, Technology and Management 2011;7.
- [25] Hakeem KR, Jawaid M, Rashid U. Biomass and bioenergy: Springer; 2016.
- [26] Fila G, Manici L, Caputo F. In vitro evaluation of dew-retting of flax by fungi from southern Europe. Annals of applied biology 2001; 138:343-51.
- [27] Henriksson G, Akin DE, Hanlin RT, Rodriguez C, Archibald DD, Rigsby LL, et al. Identification and retting efficiencies of fungi isolated from dew-retted flax in the United States and Europe. Appl Environ Microbiol 1997; 63:3950-6.

- [28] Sisti L, Totaro G, Vannini M, Celli A. Retting process as a pretreatment of natural fibers for the development of polymer composites. *Lignocellulosic composite materials*: Springer; 2018. p. 97-135.
- [29] Ntenga, R. (2007). Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II; Université de Yaound
- [30] K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, "Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin" revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.
- [31] C.Ververis, K.Georgiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas." Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production. *Industrial Crops and Products* 19: 245–254, 2004
- [32] M.Nardin,"interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales", revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006
- [33] A.K. Bledzki, J. Gassan,"Composites reinforced with cellulose based fibres", *Prog. Polym. Sci.* 24 221–274, 1999
- [34] J. H. Meshram and P. Palit, "Biology of Industrial Bast Fibers with Reference to Quality," (in English), *Journal of Natural Fibers*, Article vol. 10, no. 2, pp. 176-196, Jan 2013.
- [35] A. Bouarissa, Comportement mécanique d'un matériau fibre jute/époxy : Elaboration et caractérisation, mémoire de master, université de Boumerdes. 2013.
- [36] Mustapha Malha, « Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de Doum », Université Mohammed V –AGDAL, Mars 2013.
- [37] C Couhert. Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno- cellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse", Thèse de pour obtenir le de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Energétique.2007.
- [38] K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina,"Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin" revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.
- [39] G.Satyanarayana, G.C.Arizaga, F.Wypych, "Biodegradable composite based on lignocellulosique Fibers- An overview ", *progress in polymer Science*, 34, pp 982-1021, 2009
- [40] A. Y. Nenonene,"Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [41] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques Sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.

Chapitre II :
Composites en particulier à fibres
naturelles

II. 1. INTRODUCTION

Un matériau composite est constitué d'un ensemble de fibres résistantes noyées dans une matrice dont les propriétés mécaniques sont nettement plus faibles. Les fibres jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres [1].

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions du dioxyde de carbone CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites [2].

Aujourd'hui, la transition vers une économie durable et plus respectueuse de l'environnement s'effectue tout d'abord par un changement dans les cultures des plantes, la consommation alimentaire, la production d'énergie, la quête de ressources renouvelables, ainsi que l'incitation aux cultures non vivrières, afin de réduire la production pétrochimique et l'émission des gaz à effet de serre. C'est dans cette perspective que l'intérêt pour les fibres lignocellulosiques provenant de tissus végétaux s'est accru, tenant compte du fait qu'elles constituent des ressources renouvelables. Ces dernières se voient ainsi très prometteuses pour la transition vers une économie durable [3].

II. 2. GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

II. 2. 1. Définition

Les matériaux composites sont des matériaux solides constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède (**Fig. II. 1**). Le renfort généralement de nature fibreuse permet de supporter la charge de la structure, réduit les contraintes thermiques et assure la rigidité et la résistance macroscopique. La matrice permet de lier le renfort, assurer une protection face aux agents extérieurs et transférer les charges au renfort via la liaison entre la fibre et la matrice [4].

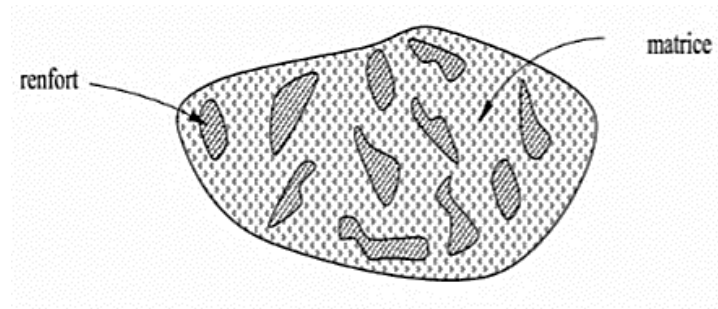


Fig. II. 1 : Matériaux composite [4].

II. 2. 2. Constituants des matériaux composites :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.

II. 2. 2. 1. Le renfort :

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté.

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les plus employées sont les fibres de verre. Les fibres de carbone sont privilégiées [6].

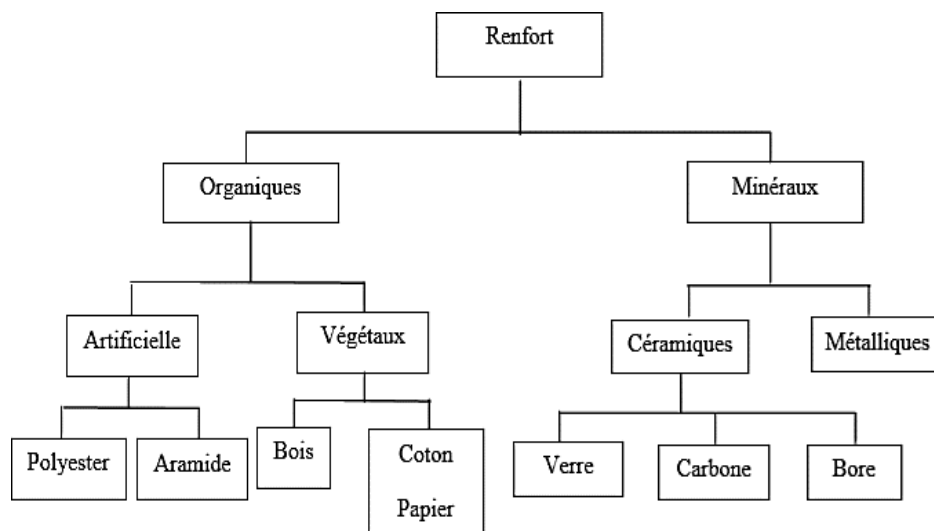


Fig. II. 2 : Les différents types de renfort de base.



Architecture des renforts : [7]

Il existe différentes géométries et textures de renforts

- **Les unidirectionnels (UD) :**

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

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

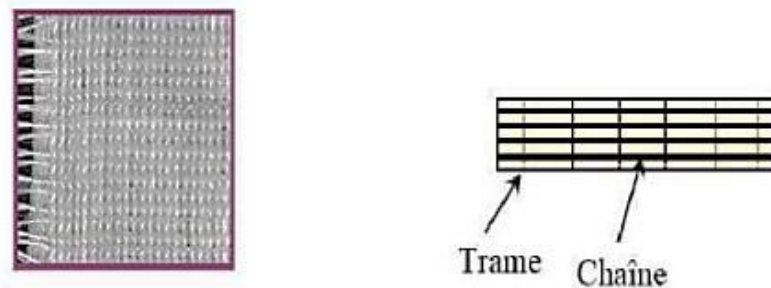


Fig. II. 3 : Fibres unidirectionnelles

- **Toile ou taffetas :**

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

- **Serge :**

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

- **Satin :**

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

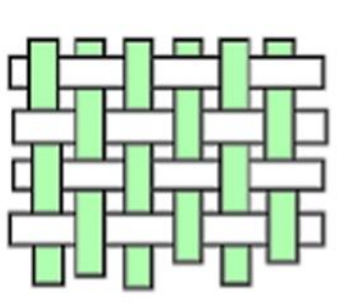


Fig.II .4 : toile

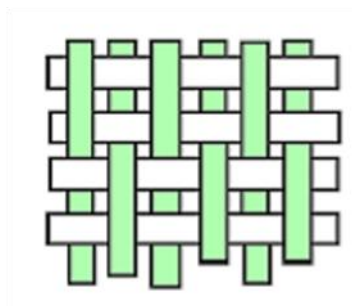


Fig.II .5 : serge

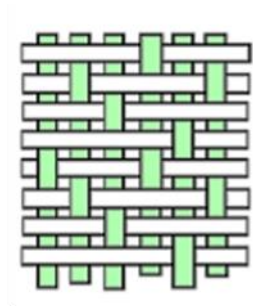


Fig.II .6 : satin

**a) Fibre de verre :**

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [7] :

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



Fig. II. 7 : fibre de verre

b) Fibre de carbone :

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue à partir de PAN (PolyAcryloNitrile) ou à partir de Brai.



Fig. II .8 : fibre de carbone

c) Fibre d'aramide :

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes

- Les fibres à bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- Les fibres à haut module : employées dans le renforcement pour les composites à hautes performances.



Fig. II. 9 : fibre d'aramide

d) Fibre de bore :

Fibre de haut module et insensible à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène [8].

e) Fibres de silicium :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [8].

II. 2. 2. 1. La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (II. 10)

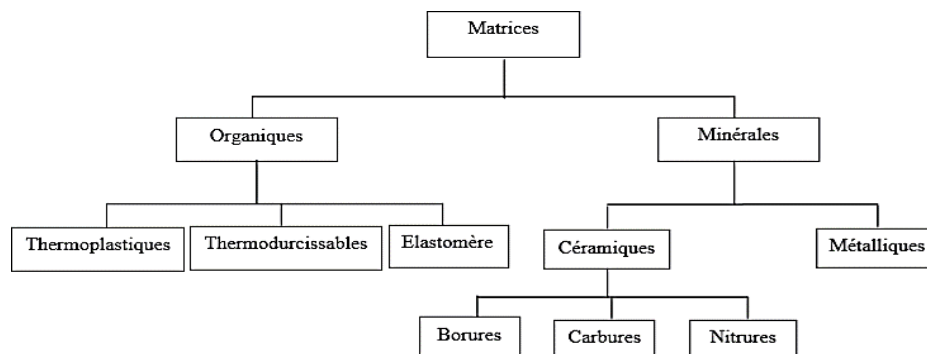


Fig. II. 10 : Différentes familles de matrices

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques

a) Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement



thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes

Les résines époxydes [9]

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [10].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique 1 100 à 1 500 kg/m³
- Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- Allongement à la rupture 2 à 5 %
- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- Température de fléchissement sous charge 290 °C

b) Résines thermoplastiques :

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [10].

c) Résines thermostables :

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000 h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [10]

II. 2. 2. 3. Les charges et les additifs [8] :

1. Les charges :[10]

➤ Charges renforçantes :

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les



caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en charges sphériques et charges non sphériques.

➤ **Charges non renforçantes :**

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

Parmi ces classes on trouve :

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

2. Les additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme : [10]

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

II. 3. CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES :

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures [4, 5].

II. 3. 1. Classement suivant la nature des constituants

- **Composites à matrice organique :** (résine, charges) avec :
 - Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
 - Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
 - Fibres métalliques : bore, aluminium, etc. ;
 -
- **Composites à matrice métallique :** (alliages légers et ultralégers 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 (BSiC).



- **Composites à matrice minérale** : (céramique), avec :
 - Des fibres métalliques : bore ;
 - Des particules métalliques : cermets ;
 - Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

II. 3. 2. Classement suivant la morphologie

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (**Fig. II. 11**) :

- **Composites à renforts de particules** : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

- **Composites à renforts de paillettes** : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces "particules minces" est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- **Composites à renforts de fibres** : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).

- **Composites stratifiés** : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification

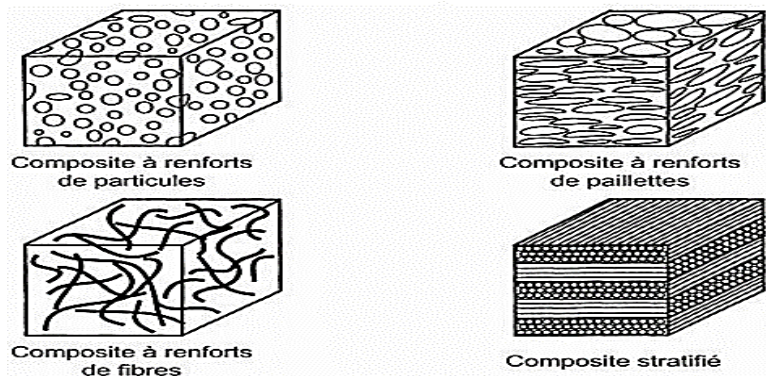


Fig. II. 11 : Classification des matériaux composites [5].



II. 4. MISE EN ŒUVRE ET ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES :

II. 4. 1. Moulage au contact : [7]

Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

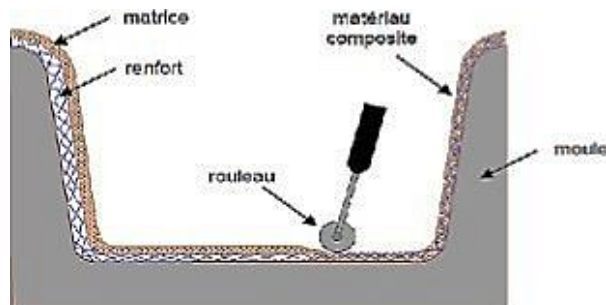


Fig. II. 12 : Principe du moulage au contact [10]

II. 4. 2. Moulage par projection simultanée :

Principe [7]

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant : un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre), un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

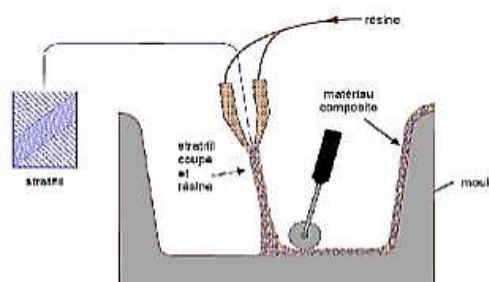


Fig. II. 13 : Principe du moulage par projection simultanée [10].

II. 4. 3. Moulage sous vide :

Principe [7]

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est



versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

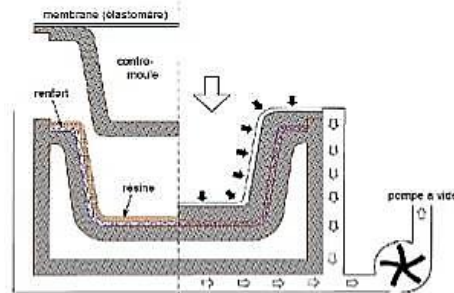


Fig. II. 14 : Principe de moulage par infusion [10]

II. 4. 4. Moulage par projection de résine :

Principe :

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse

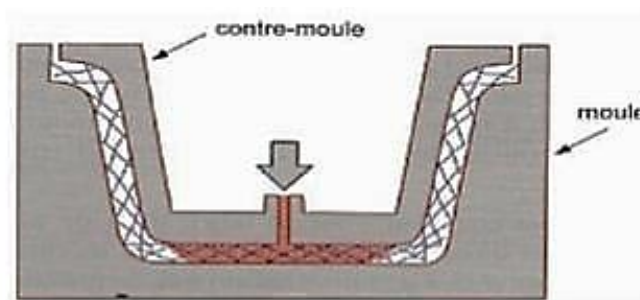


Fig. II. 15 : Principe de moulage par injection de résine [10].

II. 4. 5. Moulage par centrifugation :

Principe : [7]

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse.

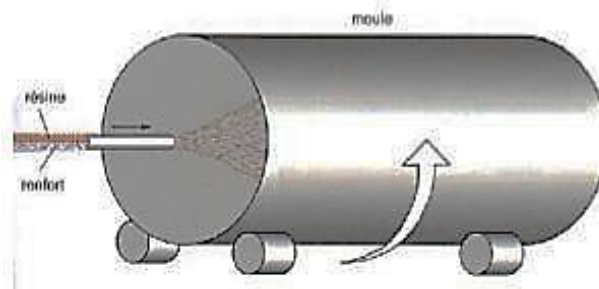


Fig. II. 16 : Principe de moulage par centrifugation [10].



II. 5. STRUCTURE DU COMPOSITE

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

II. 5. 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 longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes

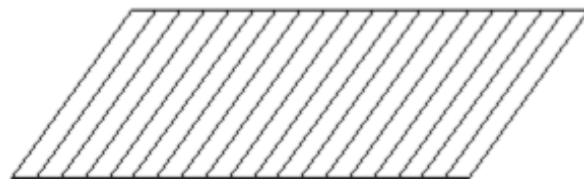


Fig. II. 17 : composite monocouche [11]

II. 5. 2. Les stratifiées

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques [11].

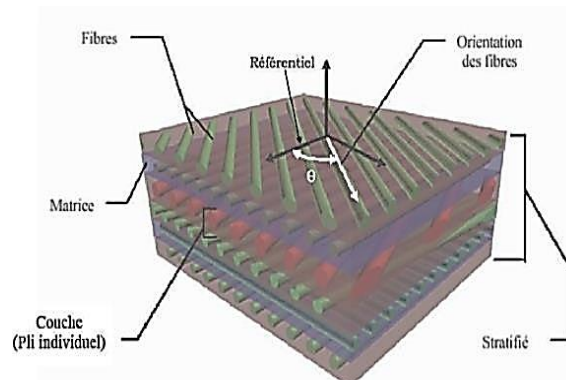


Fig. II. 18 : composite stratifié [12]

II. 5. 3. Les sandwichs

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux Composants nommés : peau et noyau (Fig.II.19)

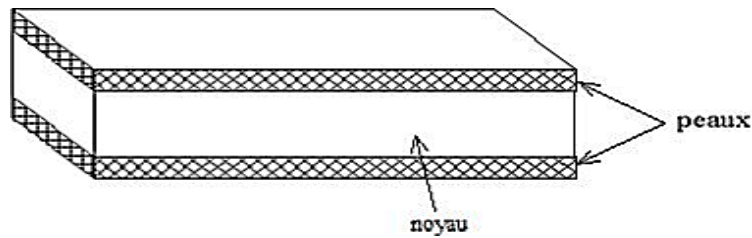


Fig. II. 19 : Composite sandwichs [13]

- **Le noyau**

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme noyau. Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- Matériaux solides à faible densité : balsa et d'autres types de bois.
- Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

- **La peau**

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, ...etc.

Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [13].

II. 6. PROCÉDES DE FABRICATION DES COMPOSITES

Trois opérations sont indispensables :

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

Le cycle de vie d'un matériau composite est présenté sur la figure (II. 20):

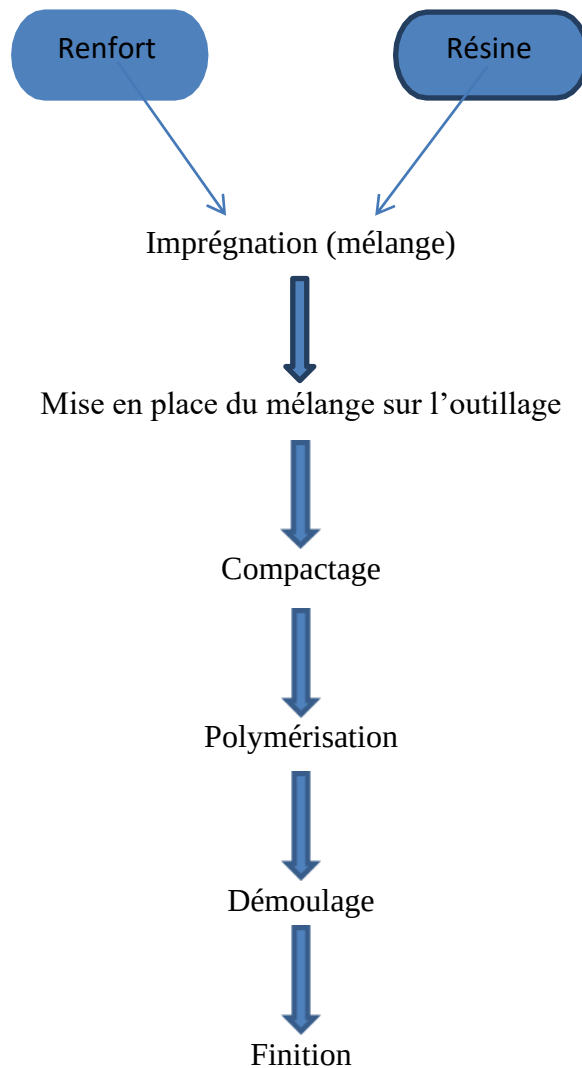


Fig. II. 20 : Cycle de vie d'un matériau composite [14]

II. 7. COMPOSITES A BASE FIBRES NATURELLES

De nombreuses technologies modernes font appel à des matériaux composites dotés de propriétés que ne peuvent pas offrir les matériaux traditionnels (métaux, céramiques et polymères).

Ces technologies trouvent une application dans des domaines tels que l'industrie aéronautique, la construction automobile, la fabrication d'appareils de plongée ou d'objets sportifs, ou des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion [15].

Le but de la fabrication d'un matériau composite est de profiter des propriétés reconnues de chaque composant afin d'en constituer un qui sera mieux adapté à certaines applications. Un composite est un matériau qui essaie de combiner les propriétés de ses composants (généralement une matrice polymérique et un renfort) pour permettre d'améliorer certaines

caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité, pour des composites à usages mécaniques. Auparavant, les matériaux composites étaient le plus souvent des matrices thermoplastique ou thermodurcissable renforcées de fibres de carbone, de verre,

Toutefois, ces dernières années, les matériaux composites renforcés avec des fibres naturelles attirent l'attention des chercheurs parce qu'ils pourraient être une solution efficace pour résoudre les problèmes d'environnement, de biodégradabilité et d'épuisement du pétrole, tout en développant des composites à moindre prix [16, 17]. Le domaine des composites est vaste et ceux-ci peuvent être divisés en trois types. La figure 2.8 présente une classification schématique des matériaux composites. Nous y distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux. Chacune de ces catégories se divise en au moins deux sous catégories. Des études ont montré que les composites à base de fibres naturelles sont bien plus respectueux de l'environnement que ceux à fibres synthétiques. Les composites à fibres naturelles utilisent, au cours de leur cycle de vie, 45% de moins d'énergie que les composites à fibre de verre, et conduisent à moins d'émissions atmosphériques [18]. La production des fibres naturelles a un impact environnemental plus faible que celles des fibres de verre : le taux de renfort en fibres naturelles plus élevé que pour les fibres de verre conduit à l'utilisation de moins de matériau polluant (polymère). Leur légèreté permet, notamment dans le secteur automobile, des économies de carburant et des émissions polluantes moindres, et enfin leur incinération permet de récupérer de l'énergie. Un autre point important est le potentiel de recyclage et de biodégradabilité des composites à fibres naturelles ainsi que le caractère renouvelable des fibres.

Plusieurs fibres végétales ont été étudiées pour renforcer les polymères comme par exemple le lin, le chanvre, le palmier, le jute, le bananier, le bambou, le coton, le bois, le jute, le kenaf, le chanvre, le sisal, l'ananas, le coco, etc [19, 20].

Les composites polypropylènes renforcés fibres de bambou sont connus pour avoir les propriétés suivantes : légèreté, bonne résistance aux agents extérieurs, esthétique et facilité de mise en œuvre et résistance moyenne, ce qui autorise leur utilisation dans les industries du meuble et de la construction.

Grâce aux avantages mentionnés ci-dessus, de nombreuses études ont été réalisées sur des composites PP avec plusieurs sortes de fibres naturelles : fibres de bambou [21, 22], fibres de luffa [23], fibres de jute [19, 20, 24, 25], fibres de lin [26, 17, 27], fibres de bois [28, 29, 30, 31], fibres de sisal [32, 33, 34], fibres d'abaca [27], etc.

II. 8. PROPRIETES DES MATERIAUX COMPOSITES RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES

II. 8. 1. Propriétés mécaniques des composites

Les propriétés mécaniques constituent les principales propriétés étudiées des composites renforcés par des fibres naturelles. Ces propriétés comprennent la résistance, la rigidité, la ténacité, le cisaillement, la compression, la fatigue et le fluage [35].

La résistance mécanique des matériaux composites est évaluée par un certain nombre de méthodes d'essai qui sont mécaniquement simples du point de vue concept mais elles sont extrêmement sensibles à la préparation de l'échantillon et la procédure d'exécution du test.

Les tests mécaniques incluent principalement les essais de traction, de compression, de cisaillement, de flexion et de fatigue. Ces méthodes d'essai sont régies par les normes élaborées par la société américaine pour les essais des matériaux (ASTM), l'organisation internationale de normalisation (ISO) et l'association des matériaux composites avancés (SACMA). Dans la présente étude nous nous limitons à l'étude des propriétés de traction des composites. Les tests de traction sont réalisés dans le but de déterminer la résistance à la traction uniaxiale, le module de Young et l'allongement à la rupture du matériau [36].

1. Rupture des composites sous une charge en traction

A une échelle macroscopique, un composite sous une charge en traction peut présenter une rupture ductile ou fragile. Ces deux termes décrivent le degré de déformation plastique macroscopique précédant la rupture.

✓ La rupture ductile se produit par la coalescence des micro vides qui entraînent une fissure interne par rupture normale. Ce mode de rupture est accompagné par une déformation plastique brutale qui conduit à un aspect fibreux de la surface fracturée.

✓ La rupture fragile est caractérisée par une propagation rapide des fissures sans déformation plastique brutale ; le comportement d'un matériau fragile est presque exclusivement élastique jusqu'à la rupture. Dans ce type de matériau, la surface de rupture est caractérisée par la présence de stries radiales à la surface de rupture qui sont parallèles à la direction de propagation de la fissure. Il est à noter qu'une strie est produite lorsque deux fissures, qui ne sont pas coplanaires, deviennent connectées par déchirement du matériau intermédiaire. La rupture fragile en traction présente un aspect granuleux avec peu ou pas de striction [36, 37].

A l'échelle microscopique, deux mécanismes de rupture peuvent avoir lieu selon les propriétés de l'interface, à savoir un décollement à l'interface fibre/matrice ou un déchaussement des fibres de la matrice (**Fig. II. 21**). Si l'interface se décolle facilement, la propagation de la fissure est interrompue par le processus de décollement et au lieu que la

fissure passe à travers la fibre, elle se propage le long de la surface de la fibre, ce qui permet à la fibre de supporter des charges plus élevées. Le déchaussement des fibres se produit du fait que les fibres se rompent à des emplacements aléatoires loin du plan de la fissure. L'une des extrémités de fibres brisées se déchausse de la matrice quand la fissure s'ouvre avec l'augmentation de la charge appliquée [38].

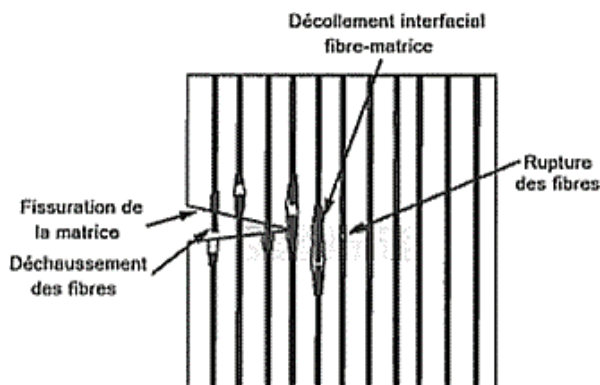


Fig. II. 21 : Mécanisme de rupture d'un composite renforcé par des fibres unidirectionnelles [38]

2. Effet des traitements chimiques des fibres sur la résistance mécanique des composites

La performance mécanique à long et à court terme des composites renforcés par des fibres courtes dépend principalement de trois facteurs : la résistance et le module de la fibre, la résistance et la stabilité chimique de la résine ainsi que l'efficacité de la liaison interrassiale qui assure le transfert de la charge de la matrice à la fibre. Cependant, la qualité de l'interface fibre-matrice reste le facteur clé à optimiser pour avoir un composite performant.

En raison de la forte dépendance entre la polarité des fibres et l'adhésion interrassiale, les équipes de recherche se sont intéressées à la modification chimique des fibres par plusieurs traitements tels que l'acylation, l'éthérification, le greffage par copolymérisation, le traitement alcalin, le traitement aux silanes et le traitement aux isocyanates dans le but d'améliorer la performance des composites. Ces traitements ont réussi à atteindre divers niveaux de succès dans l'amélioration de l'adhésion fibre-matrice des composites à base de fibres lignocellulosiques.

L'acétylation est le traitement le plus étudié pour améliorer la qualité de l'interface fibre végétale/matrice polymérique [39,40]. Comme mentionné dans le chapitre I, l'acétylation est basée sur la substitution des groupements hydroxyles des polymères de la paroi cellulaire des fibres par des groupements acétyles moins polaires présentant une meilleure affinité avec les matrices apolaires [41, 42]. Les études antérieures ont montré que l'acétylation affecte non seulement la structure chimique des fibres, mais également leur morphologie de surface [43,

44]. En effet, des études menées par Kabîr et al. **[45]** et Li et al. **[46]** ont révélé que l'acétylation augmente la rugosité de la surface des fibres conduisant ainsi à un meilleur accrochage mécanique avec la matrice. Ismail et al. **[47]** ont observé une amélioration du module de Young, de la contrainte et l'allongement à la rupture du composite kenaf /poudre de soja/PEHD respectivement de 9%, 19% et 34%. Une amélioration de la résistance au cisaillement interfaciale des composites coton/polystyrène et fibres de bois/polystyrène a été observée grâce à l'amélioration de la mouillabilité des fibres acétylées au polystyrène fondu **[48]**. Une amélioration de 18% de la résistance à la traction du composite lin/polypropylène a été observée par Bledzki et al. **[49]**. Cette augmentation a été attribuée à l'élimination de la lignine et des extractibles ainsi qu'une légère augmentation de la teneur en cellulose et hémicelluloses acétylés. De même une augmentation du module de Young et de la contrainte à la rupture du composite lin/biopolyester respectivement de 31 % et 45%, et une réduction de 21 % de l'allongement à la rupture ont été relevées grâce à une amélioration de l'adhésion interfaciale **[50]**. Il est à noter que les équipes de recherche ont été principalement intéressées par l'étude de l'effet de l'acétylation sur les propriétés des composites à matrice thermoplastique. Par contre, peu d'études ont porté sur le pouvoir renforçant des fibres acétylées dans les composites à matrice thermodurcissable **[49]** ; probablement en raison de la faible interaction entre les fibres acétylées et ce type de matrice.

En effet, Khalil et al. **[51]** ont étudié la variation du pouvoir renforçant des fibres du palmier et du coco acétylées en fonction de la nature de la matrice polymérique. Les résultats ont montré que les composites à matrice polystyrène présentent le plus haut degré d'amélioration de la résistance au cisaillement interfaciale, suivi de l'époxy et du polyester. Ce comportement a été lié à l'amélioration de la mouillabilité des fibres acétylées à la matrice polystyrène.

Pour améliorer davantage les propriétés mécaniques des composites, des équipes de recherche ont procédé à un traitement alcalin des fibres lignocellulosiques avant de les faire réagir avec les dérivés de l'acide acétique. En effet, les études antérieures ont montré que cette combinaison améliore l'adhérence entre le sisal et le polystyrène **[52]**, le sisal et l'époxy **[109]** ainsi que le lin et le polyester insaturé **[53]** et ce en raison de la forte modification de la topologie des fibres qui favorise l'accrochage mécanique ainsi que l'adhésion par inter diffusion entre les fibres et la matrice.

Il convient de noter que la résistance mécanique des matériaux augmente avec le taux d'acétylation **[43, 54]**. Cependant, à partir d'un degré de substitution spécifique, la résistance du composite diminue en raison de la dégradation des fibres et la création de fissures internes dans la fibre **[49]**. En effet, l'acétylation modifie non seulement l'interface entre les fibres et les

matrices polymériques mais également les propriétés physiques et mécaniques des fibres naturelles. Ces propriétés sont influencées par la composition chimique et les paramètres structurales des fibres, principalement l'orientation des chaînes (de cellulose nanocristalline et de fibrilles cristallines), la structure supramoléculaire (degré de cristallinité), le degré de polymérisation et la structure du cristal (teneur en pores, interface spécifique et la taille des pores). Ces paramètres se trouvent modifiés après traitement chimique de la fibre. La plupart des traitements chimiques réduisent la résistance mécanique de la fibre à cause de la rupture des liaisons et l'extraction des composants amorphes, qui jouent le rôle de ciment dans la structure des fibres. Quant à l'allongement à la rupture, il se trouve augmenté après traitement chimique.

En effet, à leur état natif les fibres présentent une structure tridimensionnelle réticulée qui diminue leur allongement à la rupture. Le traitement chimique brise cette structure de réseau donnant à la fibre un allongement supérieur et des propriétés de résistance inférieures [55]. Une étude menée par Gassan et al. [56] a montré la forte dépendance entre les propriétés mécaniques des composites lin/époxy et la structure de la fibre de lin.

En raison de l'endommagement des fibres après acétylation, la résistance mécanique des composites renforcés par ces fibres se trouve réduite. En effet Mwaikambo et al. [57] ont montré que l'acétylation réduit la cristallinité des fibres de coton et de kapok entraînant ainsi une détérioration des propriétés de traction des composites à matrice polypropylène.

L'effet négatif de l'acétylation des fibres sur la résistance mécanique de certains composites peut être lié également à une faible interface fibre-matrice. En effet, Taib et al. [58] ont rapporté dans leur étude que les groupements acétyles présents à la surface des fibres d'Acacia Mangium sont probablement trop courts pour diffuser et former des enchevêtrements avec la matrice PEHD. Ceci conduit à une faible adhésion fibre-matrice et par la suite une résistance en traction inférieure du composite résultant. Par ailleurs, la substitution des groupements hydroxyles par des groupements acétyles peut réduire la résistance des composites à matrice thermodurcissable telle que les phénoliques et ce en raison de la diminution des interactions chimiques au niveau des sites hydrophiles de la résine phénol/formol [59]. En outre, Luz et al. [44] ont attribué la diminution de la résistance en traction des composites bagasse/polypropylène à la réduction de la taille des fibres après acétylation.

Par ailleurs, l'acylation des fibres par des réactifs autres que les dérivés de l'acide acétique apporte également de nouvelles propriétés aux fibres végétales, induisant ainsi une amélioration des propriétés mécaniques des composites renforcés par ces fibres. En outre, le traitement aux silanes et aux isocyanates des fibres a montré un effet positif sur la résistance en traction de diverses combinaisons fibre/matrice. Le Tableau (II.1) présente des exemples de matériaux composites dont la résistance mécanique a été améliorée par des traitements autres

que l'acétylation. Par ailleurs, les études antérieures ont montré que globalement le traitement alcalin des fibres améliore également la résistance mécanique des composites en raison de l'élimination de la lignine intra et intercrystalline et autres substances cireuses. Ceci produit une surface rugueuse qui augmente considérablement la possibilité d'enchevêtrement mécanique entre les fibres et les matrices polymériques [60, 61, 62]. L'effet positif du traitement alcalin sur les propriétés mécaniques des composites à différents types de matrices a été mentionné par Bisanda (sisal/époxy) [62], Moyeenuddin et al. (Chanvre/polyacide) [63], Shinoj et al. (Fibres de palmier/caoutchouc naturel) [73] et plusieurs équipes de recherche (lin/époxy) [61, 64, 65]. Il est à noter que le traitement alcalin a été combiné avec d'autres traitements chimiques pour améliorer davantage la qualité d'adhésion fibre/matrice.

Parmi ces traitements on cite l'acylation [66, 67], le traitement aux silanes [68], le traitement aux isocyanates [60] et le traitement au peroxyde [69].

En outre, divers traitements spécifiques ont été étudiés afin d'améliorer l'adhérence entre les fibres de lin et la matrice époxy tels que l'imprégnation de la fibre avec la résine polymérique, la modification au latex et le caoutchouc naturel époxyde [64]. La pré-imprégnation de fibres a été également rapportée par d'autres équipes de recherche [70, 71]. Récemment, une attention particulière a été accordée à la formation de liaisons covalentes continues entre les fibres et les matrices polymériques en utilisant des agents de couplage tels que les silanes, les maléates, les titanates et les zirconates [46, 70, 72].

Type de traitement	Combinaison fibre/matrice	Observations	Référence
Acylation			
Anhydride propénoïque	Fibres de palmier/résine phénolique	Formation d'une région interfaciale continue qui assure un transfert efficace de contrainte	[73]
Dérivés de l'anhydride maléique	Sisal/polystyrène	Amélioration significative de la résistance à la traction des composite	[74]
	Fibre de palmier/polypropylène		[73]
	lin/poly(E caprolactane)		[75]
Chlorure de benzoyle	Fibres de Palmier /polychlorure de vinyle	Augmentation de la rugosité de la surface et la porosité des fibres, enchevêtrements mécaniques fibre- matrice amélioration des propriétés mécaniques des composites	[38]
	Sisal/polyester		[76]
	Sisal/polystyrène		[74]

Tableau II. 1 : Effet des traitements chimiques des fibres sur les propriétés mécaniques de divers composites.



Type de traitement	Combinaison fibre/matrice	Observations	Référence
Traitement aux silanes			
3-aminopropytriéthoxysilane	Lin/époxy	Amélioration significative des propriétés mécaniques	[64]
Vinyltris 2-méthoxy -éthoxysilane	Lin/polypropylène		[77]
Méthyl-triéthoxysilane et triéthoxyoctyle silane	Sisal/polystyrène		[74]
Vinyl tri (2-éthoxy méthoxy) silane	Sisal/polyester		[76]
Vinyltris (2 methoxyethoxy) silane	Agave/PEHD		[71]
-	Bambou/époxy		[78]
Traitement auxisocyanates			
Phényle isocyanate	Lin/époxy	Améliorer la résistance à la traction des composites	[64]
Toluène disocyanate et hexaméthylène disocyanate	Fibres de palmier/polyuréthane		[79]
Toluène disocyanate	Sisal/polystyrène		[74]

Tableau. II. 1 : Effet des traitements chimiques des fibres sur les propriétés mécaniques de divers composites (suite).

II. 8. 2. Propriétés thermiques

L'interaction de l'énergie thermique avec les atomes d'un matériau détermine certaines de ses propriétés physiques les plus importantes. Les propriétés décrivant cette interaction sont appelées propriétés thermo-physiques qui comprennent la capacité calorifique, la diffusivité thermique et la conductivité thermique [80]. Dans le cas des composites renforcés par des fibres lignocellulosiques, la stabilité thermique est la propriété la plus étudiée par les équipes de recherche. Parmi les principales méthodes utilisées pour l'analyse thermique des composites on cite la différence de température entre un échantillon et une référence (DT A), la perte de poids mesurée par thermogravimétrie (ATG), son dérivé (DTG) et la détermination du flux de chaleur par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Cependant, l'analyse A TG/DTG reste la technique la plus utilisée pour caractériser la stabilité thermique des composites renforcés par des fibres végétales [81, 82]

La dégradation des fibres lignocellulosiques sous l'effet de la température est le paramètre principal qui gouverne la stabilité thermique des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. Le comportement thermique des fibres dépend des températures de dégradation des polymères de la paroi cellulaire (cellulose, hémicelluloses et lignine). La décomposition thermique de la cellulose débute par la déshydratation à une température comprise entre 210 et 260 °C suivie par une dépolymérisation entre 310 et environ 450 °C.

Quant aux hémicelluloses, elles se décomposent à 290 °C, tandis que la lignine se décompose entre 280 et 520 °C [81, 83]. La qualité de l'interface fibre-matrice influence également le comportement thermique des composites. En effet, une bonne adhésion fibre-matrice permet d'avoir des composites stables thermiquement. Comme mentionné précédemment, les traitements chimiques des fibres peuvent améliorer l'adhésion interfaciale et donc augmenter à la fois la résistance mécanique et thermique des composites résultants. À cet égard les équipes de recherche ont testé plusieurs traitements chimiques tels que l'acétylation, le traitement aux silanes et aux isocyanates.

Nair et al. ont montré que l'acétylation améliore la stabilité thermique des composites sisal/polystyrène non seulement en raison de la stabilité thermique élevée des fibres acétylées mais également à l'amélioration de l'adhésion interfaciale [52]. En outre, l'acétylation améliore la stabilité thermique des composites sisal/polypropylène et sisal/polypropylène/polyéthylène haute densité toujours en raison de la meilleure qualité de l'interface fibre-matrice [84]. Un comportement similaire a été observé pour le composite kapok/coton/polypropylène [57].

En raison de la dépendance entre la qualité de l'interface et la stabilité thermique des composites, on doit s'attendre à une amélioration de cette stabilité par tout traitement capable de renforcer les interactions fibre-matrice. En effet, les études antérieures ont montré que le traitement aux silanes augmente la température de dégradation des composites fibres d'ananas/polyéthylène, sisal/époxy et lin/époxy. Un comportement identique a été obtenu par un traitement aux isocyanates des fibres de lin renforçant la matrice époxy et par la benzylation des fibres de sisal combinées avec une matrice polystyrène. Le greffage du polyéthylène traité à l'anhydride maléique et le méthacrylate glycidique a également eu un effet positif sur la stabilité thermique des composites chanvre/polypropylène et jute/polyéthylène haute densité. Par ailleurs, le traitement alcalin peut avoir un effet aussi bien positif que négatif en fonction de la concentration du milieu alcalin utilisé [57, 64, 81]. Il est à noter que tout traitement chimique des fibres peut augmenter ou diminuer la stabilité thermique des composites en fonction de l'effet du traitement sur l'ordre cristallin des fibres [55].

Par ailleurs, plusieurs travaux de recherche portant sur la stabilité thermique des composites à matrice polymérique renforcés par des fibres lignocellulosiques ont montré que

ces matériaux se dégradent à des températures comprises entre 240 °C et 355 °C qui est attribuée à la décomposition des fibres lignocellulosiques [83]. Selon les études antérieures et indépendamment de l'état des fibres utilisées (natives ou traitées) les composites se dégradent généralement à des températures inférieures à celles de la dégradation des matrices polymériques et ce en raison de la faible température de dégradation des fibres. Un tel comportement a été observé pour les composites kenaf/époxy, lin/époxy, coton/matrice phénolique, sisal/matrice phénolique et chanvre/polypropylène [81]. Les courbes DTG des composites montrent également des pics à des températures comprises entre 422°C et 463°C, qui correspondent à la dégradation de la matrice polymérique. Cependant, pour la détermination de la stabilité thermique des composites, cette plage de température présente moins d'importance comparée à la température du début de dégradation [83].

II. 8. 3. Le composite matrice polymère / fibre naturelle

Les biomatériaux renforcés en fibres constituent un nouveau débouché pour les fibres du palmier dattier. Ils se déclinent aujourd'hui sous des objets aussi variés que des hélices de refroidissement, des tableaux de bord de scooter ou des matériaux d'emballage [SAP05]. Plus généralement, un véhicule peut contenir plusieurs kilos de ces matériaux à base de fibres végétales comme les feuilles de palmier, le chanvre, le lin ou le sisal : accoudoirs, tablettes arrière, médaillon de porte, dossier de siège [86].

L'élaboration de matériaux composites chargés fibres naturelles se fait en général par plusieurs techniques, les plus utilisées sont :

➤ Le moulage par compression :

Qui domine largement, des investissements importants sont notés en moulage par compression, utilisant des fibres naturelles, en Chine, Inde et Iran [87] [88]. La compression fait généralement appel à des feuilles de non-tissé, ou mat, composées de fibres végétales seules, ou en mélange avec des fibres synthétiques. Le procédé est aujourd'hui bien connu, et l'on sait qu'il ne convient pas aux pièces de grande taille, au design complexe, et qu'il génère beaucoup de déchets [89].

➤ Le moulage par injection :

Qui est avantageux par rapport au moulage par compression. C'est la technique qui progresse le plus pour les fibres végétales, en les associant à des thermoplastiques comme le PP, PEHD ou ABS [90] [91] [92]. Elle convient bien aux pièces de structures et aux pièces techniques.

➤ **Le moulage par transfert de résine RTM :**

Technique utilisée généralement pour les résines thermodurcissables. Elle consiste en l'injection à basse pression en amont et/ou assistance du vide à l'aval, de résine liquide réactive (exemple : époxy/amine) dans un moule fermé contenant des assemblages de fibres.

La pièce est ensuite polymérisée dans le moule, suivi éventuellement d'une post cuisson. Toutes les formes classiques de renforts (unidirectionnels, mats à fibres longues ou courtes ...) peuvent être utilisés en RTM [93] [94] [95].

Après avoir utilisé les fibres naturelles dans des thermoplastiques, plusieurs recherches ont été faites ces dernières années avec les thermodurcissables [96] [97] [98]. Composites, le centre technique basé au Bourget-du-Lac (Savoie), s'est chargé des études avec des résines thermodurcissables [87] [95]. Les essais menés ne sont pas concluants : les pièces, réalisées par imprégnation (injection RTM et BMC) de résines époxy ou polyester dans un feutre non tissé de fibres végétales (chanvre, lin, jute, sisal/coco), ont des propriétés mécaniques très inférieures à celles des thermodurcissables renforcés de fibres de verre. [99] [86] la résistance au choc est réduite de plus de 50 % [86] [95]. La principale cause reste toujours l'incompatibilité fibre matrice polymère et les recherches récentes visent de surmonter cette difficulté par les modifications envisagées pour les fibres. Une étude a été faite par Biswas et al. [87] sur l'utilisation des fibres du bambou dans un système époxy et sa comparaison avec le composite époxy/fibres de verre. Les propriétés mécaniques sont inférieures à celles du composite à base de fibres de verre tandis qu'une forte amélioration de la résistance à l'usure a été remarquée quand les fibres de verres sont remplacées par des fibres de bambou.

Les résultats sont optimisés pour les composites à base de thermodurcissables chargés de fibres naturelles après les modifications apportées aux fibres. Les travaux de Towo et al. Montrent que les propriétés mécaniques des composites Sisal/polyester insaturé sont améliorées après traitement des fibres de sisal par traitement alcalin dans la soude [100].

II. 8. 4. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales

Différents travaux ont été réalisés afin de pallier à la dégradation des composites à base de fibres végétales. On peut distinguer deux familles de solutions, soit par modification des propriétés des fibres (par imprégnation avec des agents bloquants ou traitants), soit en diminuant l'agressivité de la matrice envers les fibres.

a) Traitement de la Fibre

Les principales méthodes utilisées dans le traitement de l'état de surface des fibres sont :

- Les imprégner d'agents chimiques comme le silicate de sodium, le sulfate de

magnésium et d'autre pour constituer une protection contre l'attaque chimique des alcalins.

- Imperméabiliser la fibre avec des produits comme la résine ou la bitume protégeant ainsi la surface de ces dernières contre l'attaque des alcalins libérés par les ciments lors de l'hydratation [101]. La combinaison des deux méthodes. Cette méthode a donné les résultats les plus satisfaisants [101]. On conclue ces procédés offrent une bonne protection aux fibres mais elles augmentent le coût de leur exploitation [101].

b) Traitement de la Matrice

La modification de la matrice a été traitée par les méthodes suivantes :

➤ Obturation des pores de la matrice avec différents produits.

D'après GRAM [102], la limitation des pores peut se faire par l'augmentation de la proportion des fines ou la quantité de chaux, ou par diminution du rapport E/C pour limiter ainsi le transport de l'eau et donc l'alcalinité.

➤ Réduction de l'alcalinité par différents procédés.

Les méthodes les plus utilisées pour la réduction de l'alcalinité de la matrice, sont : La carbonatation à jeune âge de la matrice par le gaz carbonique. L'objectif de cette technique est de réduire le taux de la chaux libérée lors des premiers jours d'hydratation [103,104]. L'utilisation d'un ciment ayant une faible teneur en alcalis spécialement la chaux libérée lors de la réaction d'hydratation. Ainsi plusieurs chercheurs préconisent le remplacement d'une partie de ciment par l'ajout de laitier, de cendres volantes ou bien des produits pouzzolaniques. Seuls les produits à base de pouzzolane naturelle, tel que le métakaolin, ont contribué à l'amélioration de la durabilité [103,104,101].

II. 8. 5. Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales

L'utilisation des matériaux composites à fibres végétales sous différentes conditions environnementales est devenue populaire ces dernières années. Beaucoup de fibres végétales ont été employées en tant que renfort efficace dans des matrices polymériques [105,106,107].

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

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.

- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant, certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- Faible stabilité dimensionnelle.
- Absorption de l'eau.

II. 8. 6. Application des composites à base des fibres végétales

L'utilisation des matériaux composites s'inscrit dans une démarche d'éco-conception. On note enfin le développement de granulés thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles végétales est utilisé dans différents domaines (cosmétique, automobile, horticulture, électroménager, mobilier urbain, outillage...) [2].

a) En automobile

L'utilisation des fibres naturelles dans les matériaux composites est de plus en plus courante, notamment, chez l'équipementier automobile Faurecia, le projet de recherche Nafi (Natural fibre for injection), lancé en 2008, a permis de mettre au point des pièces en composites de lin ou en chanvre avec un gain de masse de 25%. Aussi qu'Alstom Transport équipera en 2014 ses nouvelles rames TGV de panneaux et de cloisons en lin composite et en 2016 le "nez" des locomotives sera fabriqué à partir du même matériau, avec d'autres éléments extérieurs [107].

Les principales applications sont les suivantes: garnissage des coffres, revêtements pour plancher, revêtement pour paroi intérieure (habillage des toits d'habitacle par la technique de contre collage/compression), revêtement pour avant et arrière, revêtement pour passage de roue, revêtements de garnissage pour plage arrière, habillage de sièges, garnitures, housse, rembourrages en mousse, filtre à huile (pour la transmission), moquette de garnissage des panneaux de portières, capitonnage des panneaux de portières routières et ferroviaires, tableaux de bord (injection de granulés).

Mercedes-Benz à Bayer, utilisait des composites à fibres de lin et de sisal pour les garnitures intérieures des portières de la Mercedes classe.

Mégane : Les constructeurs Français présentent la tablette arrière de la Mégane, les panneaux de portes de l'habillage du coffre de la Xantia.

AUDI : Dossier de siège, panneaux des portières latérales et arrières, garnitures de coffre, revêtement de roue de secours dans les modèles suivants : A3, A4, A6, A8, A4.

BMW : Panneaux de portière, garnitures de pavillon, garnitures de coffre, dossiers de



siège dans les modèles suivants : séries 3, 5 et 7.

Volkswagen : Panneaux de portières, dossiers de siège, panneau de finition du couvercle du coffre, garnitures de coffre dans les modèles suivants : Golf, Passat, Bora.

OPEL GM : Panneaux de pavillon, panneaux de portières, panneau de revêtement des montants, groupe d'instruments, dans les modèles suivants : Vectra, Astra.

Ford : Panneaux de portières, montant central, garnitures de coffre dans les modèles suivant ; Mondeo, Focus, Zafira.

Fiat : Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156.

b) En construction

Les fibres végétales sont utilisées comme renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment.

c) Autres applications

Les palettes, le mobilier (table de camping Lafuma ou chaise IKEA), et FUTURAMAT, une société Française, produit des pièces techniques en résine thermoplastique renforcée de fibres de bois (ainsi que des matériaux biodégradables à base de farines céréalières).

La recherche porte sur la caractérisation des fibres, la capacité à les utiliser à des conditions économiques comme renforts de composites structuraux tels que des hublots d'avion, et les moyens permettant d'améliorer l'interaction entre les fibres et la matrice dans laquelle elles sont noyées [108].

II. 9. CONCLUSION :

Les composites en particulier à fibres naturelles sont utilisés dans la plupart des industries modernes comme l'automobile et la constructionetc, car ils sont peu coûteux et très résistants, notamment après traitement la matrice et le renfort, car ils peuvent être recyclés et possèdent plusieurs propriétés mécaniques et physiques.

Références ChapitreII:

- [1] M. Brandt. "Fibre reinforcedcement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering». Composite Structures., Vol. 86, 2008, pp. 3- 9.
- [2] C. Baley. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Technique de l'ingénieur, traité génie des procédés, Vol. AM5, 2004, pp. 130.
- [3] A. Mahfoudh, « Étude de la production et de la caractérisation de composites boisplastiques», Mémoire de Maître ès sciences, Département de Génie Chimique, Université Laval, Québec, 2013, 101p.
- [4] Rokbi. M, «Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre», thèse Magister, M'sila, 2001.
- [5] Prombut. P, «caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels», thèse Doctorat, Toulouse, 2007.
- [6] A. BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [7] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [8] V.Pauchard, H.Boulharts, F.Grosjeani, P.Odru, A.Chateau Minois, « Développement d'un modèle de durabilité de poutres composites unidirectionnelles renforcées par des fibres de verre »,Rev, IFP, Vol.56, No.6, pp.581-595, 2001
- [9] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A346
- [10] Jean Marie. Berthelot, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structure», édition TEC et DOC, 1999.
- [11] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>.
- [12] S. BENSAD, "CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A LA MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ANISOTROPES," l'Université de Nantes, 2006.
- [13] N. Gupta, "CHARACTERIZATION OF SYNTACTIC FOAMS AND THEIR SANDWICH COMPOSITES: MODELING AND EXPERIMENTAL APPROACHES," The GraduateFaculty of the Louisiana State University and Agricultural and MechanicalCollege, 2003.
- [14] D. Gay, Matériaux composites, 5ième édition ed, 2005
- [15] David Sedan; Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite; Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges, 2007.
- [16] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, 2007; Short natural-fibre reinforcedpolyethylene and naturalrubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; Composites Science and Technology 67, 1627-1639.
- [17] Arbelaiz, B. Fernandez, J.A. Ramos, I. Mondragon, 2006; Thermal and crystallizationstudies of short flax fibre reinforcedpolypropylene matrix composites: Effect of treatments; Thermochimica Acta 440, 111-121
- [18] S.V. Joshia, L.T. Drzalb, A.K. Mohanty, S. Arora, 2004; Are natural fiber composites environment allysuperior to glass fiber reinforced composites?; Composites: Part A 35, 371376.
- [19] Thi-Thu-LoanDoan, Shang-Lin Gao, Edith Mäde, 2006; Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification; Composites Science and Technology 66, 952-963.
- [20] A. K. Rana, B. C. Mitra, A. N. Banerjee, 1999; Short jute fiber-reinforcedpolypropylene composites: dynamic mechanical study; Journal of Applied Polymer Science, Vol. 71, 531539.
- [21] Nguyen Huy Tung, Hiroshi Yamamoto, Takashi Matsuoka, Toru Fujii, 2004; Effect of surface treatment on interfacialstrengthbetweenbamboofiber and PP resin; JSME International Journal, Series A, Vol. 47, No. 4, 561-565.
- [22] Yongli Mi, Xiaoya Chen, Qipeng Guo, 1997; BambooFiber-reinforcedPolypropylene Composites: Crystallization and InterfacialMorphology; Journal of appliedpolymer science, Vol. 64, No. 7, 1267-1273.
- [23] H. Demir, U. Atikler, D. Balköse, F. Tihminlioglu, 2006; The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene–luffa fiber composites; Composites: Part A 37, 447-456.
- [24] Tran Vinh Dieu, Le ThiPhai, Phan Minh Ngoc, Nguyen Huy Tung, Le Phuong Thao, Le Hong Quang, 2004; Study on preparation of polymer composites based on polypropylenereinforced by jute fibers; JSME International Journal, Series A, Vol. 47, No. 4, 547-550

- [25] Md. Rezaur Rahman, Md. Monimul Huque, Md. Nazrul Islam, Mahbub Hasan, 2008; Improvement of physico-mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites by post-treatment; *Composites: Part A* 39, 1739-1747.
- [26] A. K. Bledzki, A. A. Mamun, M. Lucka-Gabor, V. S. Gutowski, 2008; The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites; *eXPRESS Polymer Letters* Vol.2, No.6, 413-422.
- [27] A. K. Bledzki, A. A. Mamun, O. Faruk, 2007; Abaca fibre reinforced PP composites and comparison with jute and flax fibre PP composites; *eXPRESS Polymer Letters* Vol.1, No.11, 755-762
- [28] Jingshen Wu, Demei Yu, Chi-Ming Chan, Jangkyo Kim, Yiu-Wing Mai, 2000; Effect of Fiber Pretreatment Condition on the Interfacial Strength and Mechanical Properties of Wood Fiber/PP Composites; *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 76, 1000-1010.
- [29] Fernanda M.B. Coutinho, Thais H.S. Costa, 1999; Performance of polypropylene– wood fiber composites; *Polymer Testing* 18, 581-587.
- [30] Mohammad Dalour Hossen Beg; The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites; Thèse de doctorat, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2007.
- [31] Wenjie Dang, Yongming Song, Qingwen Wang, Weihong Wang, 2008; Improvement in compatibility and mechanical properties of modified wood fiber/polypropylene composites, *Front. For. China* 3(2), 243-247.
- [32] P.V. Joseph, K. Joseph, S. Thomas, C.K.S. Pillai, V.S. Prasad, G. Groeninckx, Mariana Sarkissova, 2003; The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites; *Composites: Part A* 34, 253-266.
- [33] K. L. Fung, R. K. Y. Li, S. C. Tjong, 2002; Interface Modification on the Properties of Sisal Fiber-Reinforced Polypropylene Composites; *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 85, 169-176.
- [34] P.V. Josepha, Marcelo S. Rabellob, L.H.C. Mattosoc, Kuruvilla Josepha, Sabu Thomasd, 2002; Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites; *Composites Science and Technology* 62, 1357-1372.
- [35] Salit, M.S. (2014). *Tropical Natural Fibre Composites : Properties, Manufacture and Applications*, (p. 53-103). Springer. Singapore.
- [36] Davis, J.R. (2004). *Tensile Testing*, 2nd Edition, (p. 4-183). ASM international
- [37] Bazergui, A. (2002). *Résistance des matériaux*, troisième édition. (p. 258). Presses Internationales Polytechnique
- [38] Mallick, P.K., M. Dekker (1997). *Composites Engineering Handbook*, (p. 1-129). Marcel Dekker Inc. United States of America.
- [39] Zafeiropoulos, N.E., Vickers, P.E., Baillie, C.A., Watts, J.F. (2003). An experimental investigation of modified and unmodified flax fibres with XPS, ToF-SIMS and ATR FTIR. *Journal of Materials Science*, 38(19), 3903 - 3914.
- [40] Zafeiropoulos, N.E., Williams, D.R., Saillie, C.A., Matthews, F.L. (2002). Engineering and characterisation of the interface in flax fibre/polypropylene composite materials. Part 1. Development and investigation of surface treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8), 1083-1093.
- [41] Callum, A.S., Hill, H.P.S., Abdul Khalil, M.D.H. (1998). A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products*, 8(1), 53-63.
- [42] John, M.J., Anandjiwala, R.D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 29(2), 187-207.
- [43] Furqan, A., Choi, H.S., Myung, K.P. (2015). A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials Engineering*, 300 (1), 10-24.
- [44] Luz, S.M., Del Tio, J., Rocha, G.J.M., Goncalves, A.R., Del'Arco Jr., A.P. (2008). Cellulose and lignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), 1362-1369.
- [45] Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883-2892.
- [46] Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Polymer and Environment*, 15(1), 25-33.

- [47] Ismail, H., Hamid Abdullah, A., Abu Bakar, A. (2011). Influence of Acetylation on the Tensile Properties, Water Absorption, and Thermal Stability of (High-Density Polyethylene)/(Soya Powder)/(Kenaf Core) Composites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 17(2), 132-137.
- [48] Liu, F.P., Wolcott, M.P., Gardner, D.J., Rials, T.G. (1995). Characterization of the interface between cellulosic fibers and a thermoplastic matrix. *Interfaces*, 2(6), 419-432. *Composites*
- [49] Bledzki, A.K., Mamun, A.A., Lucka-Gabor, M., Gutowski, V.S. (2008). The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites. *Express Polymer Letters*, 2(6), 413-422.
- [50] Baiardo, M., Zini, E., Scandola, T.G. (2004). Flax fibre-polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(6), 703-710.
- [51] Khalil, H.P.S.A., Ismail, H., Rozman, H.D., Ahmed, M.N. (2001). The effect of acetylation on interfacial shear strength between plant fibres and various matrices. *European Polymer Journal*, 37(5), 1037-1045.
- [52] Manikandan Nair, K.C., Thomas, S., Groeninckx, G. (2001). Thermal and dynamic mechanical analysis of short sisal fibre reinforced polystyrene composites. *Composite Science and Technology*, 61(16), 2519-2529.
- [53] Baley, C., Busnel, F., Grohens, Y., Sire, O. (2006). Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre-polyester resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(10), 1626-1637.
- [54] Zhu, J., Zhu, H., Njuguna, J., Abhyankar, H. (2013). Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices. *Materials*, 6(11), 5171-5198.
- [55] Kalia, S., Kaith, B.S., Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites- A review. *Polymer Engineering And Science*, 49(7), 1253-1272.
- [56] Gassan, J., Mildner, L., Bledzki, A.K. (1999). Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites. *Mechanics of Composite Materials*, 35(5), 435-440.
- [57] Mwaikambo, L.Y., Martuscelli, E., Avelia, M. (2000). Kapok/cotton fabric polypropylene composites. *Polymer Testing*, 19(8), 905-918.
- [58] Mat Taib, R., Ramarad, S., Mohd Ishak, Z.A., Rozman, H.D. (2010). Effect of acetylation and MAPE on the properties of steam-exploded Acacia mangium fiber HDPE composites. *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 29(3), 431-444.
- [59] Sreekala, M.S., Kumaran, M.G., Seena, J., Jacob, M., Thomas, S. (2000). Oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites: influence of fibre surface modifications on the mechanical performance. *Applied Composite Materials*, 7(5), 295-329.
- [60] Kuruvilla, J., Sabu, T., Pavithran, C. (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Polymer*, 37(23), 5139-5149.
- [61] Van de Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., Verpoest, I. (2003). Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composite Science and Technology*, 63(9), 1241-1246.
- [62] Bisanda, E.T.N. (2000). The effect of alkali treatment on the adhesion, characteristics of sisal fibres. *Applied Composite Materials*, 7(5), 331-339.
- [63] Moyeenuddin, A., Sawpan, Pickering, K.L., Femyhough, A. (2011). Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(3), 310-319.
- [64] George, J., Ivens, J., Verpoest, I. (1999). Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 272(1), 41-45.
- [65] Van de Weyenberg, I., Chi Truong, T., Vangrimde, B., Verpoest, I. (2006). Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1368-1376.
- [66] Faulstich de Paiva, J.M., Frollini, E. (2006). Unmodified and modified surface sisal fibers as reinforcement of phenolic and lignophenolic matrices composites: thermal analyses of fibers and composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291(4), 405-417.
- [67] Botaro, V.R., Siqueira, G., Megiatto Jr., J.O., Frollini, E. (2010). Sisal fiber treated with NaOH and benzophenonetetracarboxylic dianhydride as reinforcement of phenolic matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 115(1), 269-276.
- [68] David, N., Hon, S. (1996). *Chemical Modification of Lignocellulosic Materials*, (p. 98-107). Marcel Dekker, USA.

- [69] Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., Crerar, W. (2007). Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 26(5), 447-463
- [70] Herrera-Franco, P.J., Valadez-Gonzalez, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 36(8), 597-608.
- [71] Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J.M., Olayo, R., Herrera-Franco, P.J. (1999). Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 30(3), 309-320.
- [72] Belgacem, M.N., Gandini, A. (2005). The surface modification of cellulose fibres for use as reinforcing elements in composite materials. *Composite Interfaces*, 12(1-2), 41-75
- [73] Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., Kochubabu, M. (2010). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 7-22.
- [74] Jandura, P., Riedl, B., Kokta, B.V. (2000). Thermal degradation behavior of cellulose fibers partially esterified with some long chain organic acids. *Polymer Degradation and Stability*, 70 (3), 387-394.
- [75] Ichhaporia, P.K. (2008). *Composites from Natural Fibers*, thèse de doctorat de l'université du nord Carolina
- [76] Brigante, D. (2014). *New Composite Materials Selection, Design, and Application*, (p. 2-20). Springer. United Kingdom.
- [77] Biagiotti, J., Puglia, D., Torre, L., Kenny, J.M. (2004). A systematic investigation on the influence of the chemical treatment of natural fibers on the properties of their polymer matrix composites. *Polymer Composites*, 25(5), 470-479.
- [78] Lu, T., Jiang, M., Jiang, Z., Hui, D., Wang, Z., Zhou, Z. (2013). Effect of surface modification of bamboo cellulose fibers on mechanical properties of cellulose/epoxy composites. *Composites: Part B*, 51, 28-34.
- [79] Rozman, H.D., Hilme, K.R.A., Abubakar, A., (2007). Polyurethane composites based on oil palm empty fruit bunches: effect of isocyanate/hydroxyl ratio and chemical modification of empty fruit bunches with toluene diisocyanate and hexamethylene diisocyanate on mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(4), 2290-2297.
- [80] Kalia, S., Kaith, B.S., Kaur, I. (2011). *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology*. (p. 8-87). Springer Heidelberg, London
- [81] Monteiro, S.N., Calado, V., Rodriguez, R.J.S., Margem, F.M. (2012). Thermogravimetric behaviour of natural fibres reinforced polymer composites-an overview. *Materials Science and Engineering A*, 557, 17-28
- [82] Nwabunma, D., Kyu, T. (2008). *Polyolefin Composites*, (p. 238). Wiley Edition. Canada.
- [83] Monteiro, S.N., Calado, V., Rodriguez, R.J.S., Margem, F.M. (2012). Thermogravimetric stability of polymer composites reinforced with less common lignocellulosic fibers - an overview. *Journal of Material Research and Technology*, 1(2), 117-126
- [84] Albano, C., Gonzalez, J., Ichazo, M., Kaiser, D. (1999). Thermal stability of blends of polyolefins and sisal fiber. *Polymer Degradation and Stability*, 66(2), 179-190.
- [85] Sapuan, S. M., Maleque, M.A. Design and fabrication of natural woven fabric reinforced epoxy composite for household telephone stand. *Materials and Design*, 2005, v.26, p.65-71.
- [86] Quelenis, N. Les matériaux composites à base de fibres végétales. fiche technique Agro- industrie, 2005, v. fiche n°12.
- [87] Biswas, S., Satapathy, A. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites. *Materials and Design*, 2010, v.31, p.1752-1767.
- [88] Chand, N., Jain, D. Effect of sisal fibre orientation on electrical properties of sisal fibre reinforced epoxy composites. *Composites: Part A*, 2005, v. 36, p.594-602.
- [89] D'anselme, T. Matériaux composites renforcés par des fibres végétales en particulier par des fibres de lin. Thèse, Université de Rennes 1, Rennes, 1997. 59 p.
- [90] Haseena, A. P., Unnikrishnan, G., Kalaprasad, G. Dielectric properties of short sisal/coir hybrid fibre reinforced natural rubber composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.763-786.
- [91] Bendahou, A., Kaddami, H., Sautereau H., Raihane M., Erchiqui F. Dufresne, A. Short Palm Tree Fibers Polyolefin Composites : Effect of Filler Content and Coupling Agent on Physical Properties. 2008, *Macromolecular Materials & Engineering*, v.293, p.140-148.
- [92] Bendahou, A., Kaddami, H., Dufresne, A. Investigation on the effect of cellulose nanoparticles morphology on the properties of natural rubber based nanocomposites. *European Polymer Journal* 2010, v.46, p.609-620.

- [93] Nguyen-Thuc, B. H., & Maazouz, A. Elastomer-modified epoxy/amine systems in a resin transfer moulding process. *Polymer International*, 2004, v.53, p.591–602.
- [94] Bréard, J., Bizet, L., Montrelay, N., Baley, C. Comparaison des propriétés de composites mats verre/polyester et lin/ polyester pour faisabilité par procédé RTM. *Revue des composites et des matériaux avancés, Renforcement des polymères par des fibres végétales* 2006, v.16, n.1, p.101-113.
- [95] Sbiai, A., Maazouz, A., Fleury, E., Sautereau, H., Kaddami, H., .Short Date Palm Tree Fibers / Polyepoxy Composites Prepared using RTM Process: Effect of TEMPO Mediated Oxidation of the Fibers. *BioResources*, 2010, v.5, n.2, p.672-689.
- [96] Kaddami, H., Dufresne, A., Khelifi, B., Bendahou, A., Taourirte, M., Raihane, M., Issartel, N., Sautereau, H., Gérard, J.-F., Sami, N. Short palm tree fibers - Thermoset matrices composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. 2006, v.37 p.1413 – 1422.
- [97] Sbiai, A., Kaddami, H., Fleury, E., Maazouz, A., Erchiqui, F., Koubaa A., Soucy J., Dufresne, A. Effect of the Fiber Size on the Physicochemical and Mechanical Properties of Composites of Epoxy and Date Palm Tree Fibers. *Macromolecular Materials & Engineering* 2008, v.293, p.684-691.
- [98] Harish, S., Michael D.P., Bensely, A., Mohan Lal, D., Rajadurai, A. Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. *Materials Characterization*, 2009, v.60, p.44-49.
- [99] Towo, A. N., Ansell, M.P. Fatigue of sisal fibre reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture. *Composites Science and Technology*, 2008, v.68, p.915- 924.
- [100] MOKHTARI, F., Contribution à l'étude des composites à base de liants pouzzolaniques et de bambou. Thèse de docteur, INSA Lyon, 1991.
- [101] GRAM, H.E., ?Durability of natural fibers in concrete, *Swedish cement and concrete research Fo.1:83*, p.255, 1983.
- [102] TOLÈDO, F.R.D., SCRIVENER, K., ENGLAND, G.L., GHAVAMI, K., Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites , *ELSEVIER, Cement and concrete composite*, volume 22, pp.127-143, 2000.
- [103] TOLÈDO, F. R.D, GHAVAMI, K., ENGLAN, D. G. L, SCRIVENER, K. Development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability, *ELSEVIER, Cement and concrete composite*, volume 25, p.12 ,2003
- [104] A. Fadel et H. Hazam, « Etude des propriétés d'agromatériaux composites PEBD/farine de Genêt d'Espagne avant et après mercerisation ». Mémoire d'ingénieur d'Etat, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2010, 74 p.
- [105] D. El Hadji Babacar LY, « Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose », Thèse de Doctorat, L'INP de Grenoble, France, 2008, 218 p. [En ligne], disponible sur http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/26/88/28/PDF/these_BLY.pdf
- [106] C. Zamprognio et P. Hourçourigaray, « Nautisme et Composites BioSourcés », [en ligne], 2012. 31p, S. A. Paul, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph et S. Thomas. « Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials », *Compos. Part A: Applied Science and Manufacturing.*, Vol.39, 2008, pp. 1582–1588.
- [107] Rong, M.Z., Zhang, M.Q., Liu, Y., Yang, G.C., Zeng, H.M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61(10), 1437- 1447

Chapitre III

Les fibres des palmiers dattiers



III. 1. INTRODUCTION

Le palmier dattier a été dénommé *Phoenix dactylifera* par Linne en 1934. *Phoenix* dérivé de *Phoinix*, nom du dattier chez les grecs de l'antiquité qui le considéraient comme arbre des Phéniciens. *Dactylifera* vient du latin *dactylis*, dérivant du grec *dactylus*, signifiant doigt (en raison de la forme du fruit), associé au mot latin *fero*, porté, en référence aux fruits. Le *Phoenix dactylifera* résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient, plus précisément dans les Oasis du Sahara. Les phoenix sont des palmiers dioïques, il existe donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces dernières donnent une multitude de variétés de dattes [1, 2, 3].

Dans le sud de notre pays, il y'a plus de 800 variétés de palmier dans les oasis d'après des statistiques universitaires [19]. Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale) [4,5]

III. 2. ETUDE MORPHOLOGIQUE DU PALMIER DATTIER

Le palmier dattier appartient à la classe des monocotylédones (une feuille embryonnaire dans la graine). Les monocotylédones ont une organisation différente, ils n'ont pas de cambium (une couche mince située entre le bois et l'écorce), alors que le bois de palmier présentant une structure et des propriétés bien différentes de celle des autres arbres [7, 8]. En effet, le palmier est une herbe géante de 20 à 30 m de hauteur (Figure III.1), au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7 m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles [9].

Le palmier dattier produit entre 5 à 15 bouquets de dattes par arbre. Chaque bouquet peut contenir jusqu'à 1000 dattes correspondant à un poids approximatif entre 6 à 8 Kg. Un arbre de palmier commence à produire des dattes à partir de 3 ans, mais généralement entre 3 à 5 ans. Il peut rester vivant et productif pendant 150 ans environ [9]. La forme, la taille et la couleur des fruits varient selon la variété.

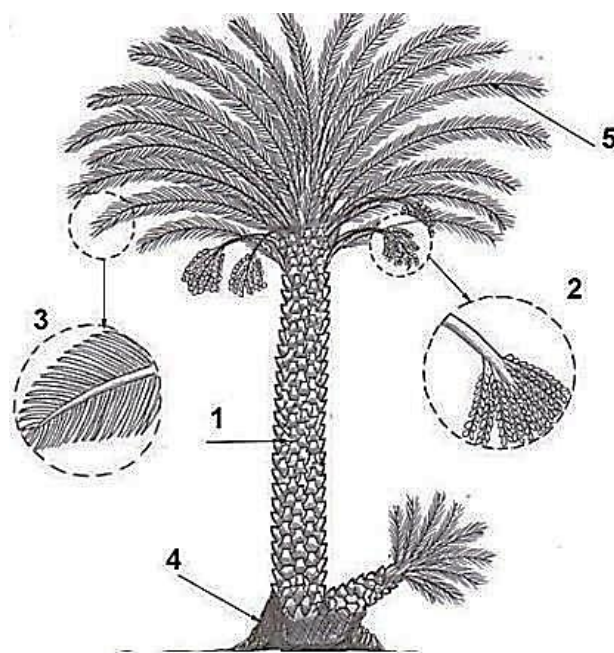


Fig. III. 1 : Arbre de palmier dattier.

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant cinq types de fibres [4]:

- 1)Fibres de bois du tronc ;
- 2)Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe) ;
- 3)Fibres de feuilles au niveau des pédoncules ;
- 4)Fibres de surface autour de son tronc ou de base de palmes (pétiole) ;
- 5)Fibres de liffe (entre les Kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

III. 2. 1. Composants de palmier dattier

III. 2. 1. 1. Le tronc

Le palmier dattier a un tronc unique colonnaire sans branche appelé stipe. Le stipe se termine par un bourgeon terminal unique produisant des feuilles appelées palmes (frondes), il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles [10]. Les fibres des pétioles ne forment point un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignées (elles sont placées sans ordre, les unes à côté des autres). Le tronc n'est composé que des fibres pétiolaires superposées les unes sur les autres de l'intérieur à l'extérieur [8].



III. 2. 1. 2. La couronne

On appelle la couronne, l'ensemble des palmes vertes. Le nombre de palmes chez un palmier dattier adulte peut atteindre de 50 à 200 palmes. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou phallophores.

III. 2. 1. 2. La palme

La palme ou Djérid est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole (Figure III.2). Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide [10].

Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [10].

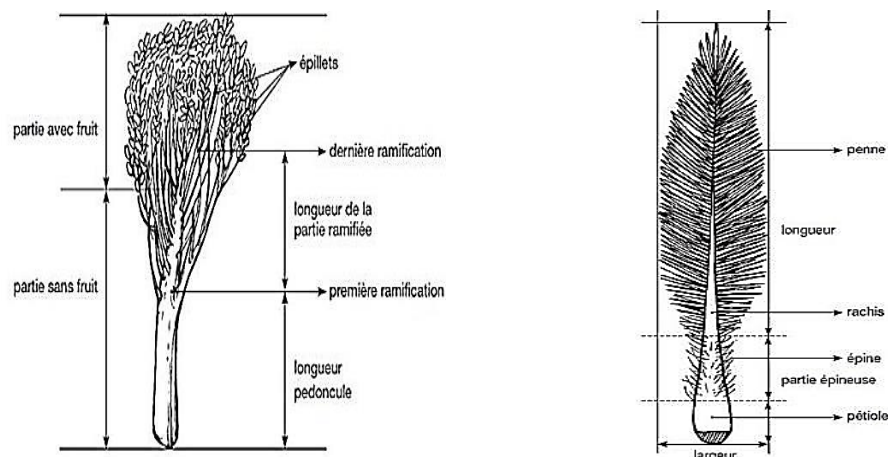


Fig. III. 2 : (a) Régime et hampe (b) Palme (feuille) de palmier dattier [15]

III. 3. CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES FIBRES DE PALMIER DATTIER

III. 3. 1. Structure et morphologie

D'après les études d'Agoudjil et al [1], (figure III. 3) présente des images MEB d'échantillon typique de pétiole (Deglet-Nor) dans une direction transversale des fibres. Ces images montrent que la surface d'échantillon n'est pas lisse, elle est irrégulière avec beaucoup de filaments, des impuretés, des cellules et des pores qui lui permettent une bonne adhérence à d'autre matériau (matrice).

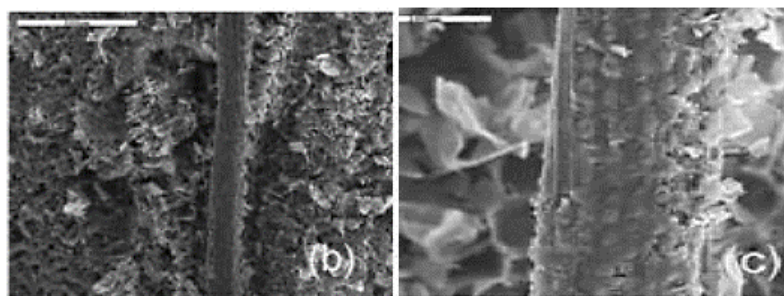


Fig. III. 3: Des images MEB d'échantillon de DN pétiole dans une direction transversale des fibres [1]

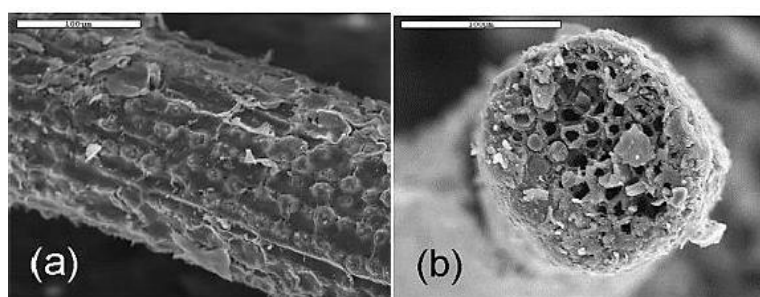


Fig. III. 4: Des images MEB pour une seule fibre de pétiole : (a) une coupe longitudinale, (b) une coupe transversale.

Pour plus d'informations sur cette morphologie, trois micrographies MEB montrant la forme d'une seule fibre de palmier dattier (pétiole) ont été présentées (Figure III. 4). Une coupe transversale d'une fibre de pétiole (Fig.III.4 b et c) montre un grand nombre de fibres creuses individuelles collectées et collée par une couche. De ce fait, comme il est montré dans ces figures, cette fibre a une section poreuse, ce qui explique son grand pouvoir hydrophile (absorption de l'eau) [6].

III. 3. 2. Propriétés physiques

Le tableau (III.1) présente les principales propriétés physiques de fibres de palmiers dattiers (Dokar, Elghers, D-Nour et D-Bida) [4,5]

Propriété	Minimum-Maximum	Moyenne –CV (%)
Diamètre(mm)	0.1-1.00	0.54-54.43
Densité Absolu(kg/m ³)	1300-1450	1383-5.52
Densité Apparente(kg/m ³)	900-17.64	900-17.64
Teneur en eau naturelle	9.50-10.00	10-5.00

Tableau III. 1 : Propriétés physiques de fibres de palmiers dattiers.



III. 3. 3. Propriétés thermo-physiques

Le tableau (III.2) montre les propriétés thermophysiques et diélectriques de diverses variétés de palmier dattier [1]. Selon le tableau (III.2), les propriétés thermiques des différentes variétés de bois de palmier dattier présentent des valeurs faibles, la conductivité thermique varie entre $0.072 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0.085 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Echantillon	P (mbar)	K ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	a ($\times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$)	ϵ_r
PDN//	10^{-4}	0.046 ± 0.003	1.65 ± 0.10	-
PDN	10^{-4}	0.042 ± 0.003	2.16 ± 0.15	-
PDN//	1000	0.084 ± 0.003	3.31 ± 0.31	10.38 ± 0.52
PDN	1000	0.083 ± 0.003	2.29 ± 0.20	8.09 ± 0.26
PMD	1000	0.073 ± 0.003	3.13 ± 0.49	24.70 ± 1.61
PEG	1000	0.072 ± 0.002	2.76 ± 0.24	2.58 ± 0.02
BDN	1000	0.085 ± 0.004	2.76 ± 0.24	5.81 ± 0.08
BMD	1000	0.084 ± 0.005	2.76 ± 0.24	5.70 ± 0.10
BEG	1000	0.074 ± 0.004	2.29 ± 0.30	5.13 ± 0.09

Tableau. III.2: Propriétés thermo-physiques et diélectriques du palmier dattier (Pétioles et grappes) [1].

Avec :

K : la conductivité thermique a: la diffusivité thermique

ϵ_r : la permittivité diélectrique relative

III. 4. LES TRAVAUX REALISES SUR LES FIBRES DES PALMIERS DATTIERS

A titre d'exemple on cite quelques travaux qui sont en relation étroite avec notre étude :

- Dans le travail de Al-Kaabi et al [14], les fibres naturelles extraites du palmier dattier (mat naturel) ont été utilisées comme renfort pour des composites à matrice polymère. Des échantillons de polyester ont été soumis à de divers types de tests mécaniques (flexion 3- points, essai d'impact "Charpy") et physiques pour avoir l'effet de la longueur et l'état de la surface des fibres sur les propriétés mécaniques. Les résultats obtenus montrent que ces fibres peuvent donner des propriétés raisonnables et pourraient être utilisées pour des applications à faible coût qui exigent peu de force moyenne.

- Taha et al [12], ont présenté une étude expérimentale qui permet de déterminer les propriétés mécaniques des fibres qui sont extraites de la tige spadice de palmier dattier DPSS



de la région Ezbet El-Nakhl en Egypte. Ces tiges sont ensuite divisées en fibres longues de 50 cm avant de subir un traitement chimique par l'hydroxyde de sodium (NaOH) avec des concentrations de 2 et 5% avec des durées de traitement de 2, 4, 6 et 24 heures à une température de 23°C. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une solution de NaOH de concentration de 2% pendant une durée de traitement de 2 heures. Les valeurs de la contrainte à la rupture des fibres traitées et non traitées sont respectivement de l'ordre de 400 et 600 MPa, ce qui représente une augmentation de 50%.

- Al-Khanbashi et al. [11] ont présenté une étude expérimentale des fibres de palmier dattier sollicitées en traction, les fibres ont été traitées avec une solution de NaOH ayant une concentration de 5% pendant les durées de (1, 2 et 3h) à une température de 100°C. Les résultats de ces travaux montrent que la résistance moyenne à la rupture est égale à 275MPa (figure III.4 a).

Figure III.4. b montre l'effet du diamètre de la fibre sur le module de Young, les valeurs trouvées varient entre 5 à 12 GPa.

Le traitement avec une concentration de 5% de NaOH à 100°C pour une durée de 2h a amélioré la contrainte à la rupture de 45% (figure III.5). Les résultats de ces travaux montrent que les fibres de palmier dattier sont comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort à matrice polymère. Elles sont principalement constituées de 46% de cellulose, 20% de lignine et 18% de hémicelluloses.

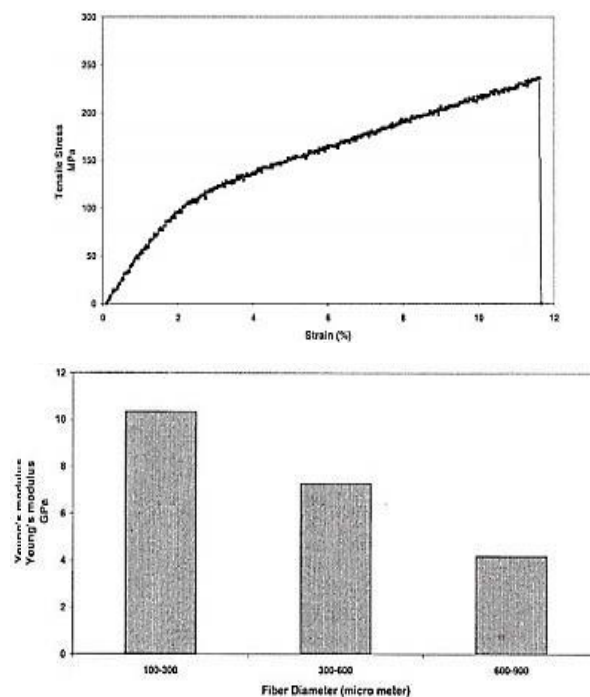


Fig. III. 4 : (a) courbe moyenne contrainte-déformation des DPF (b) Le module d'Young du DPF en fonction du diamètre de la fibre.

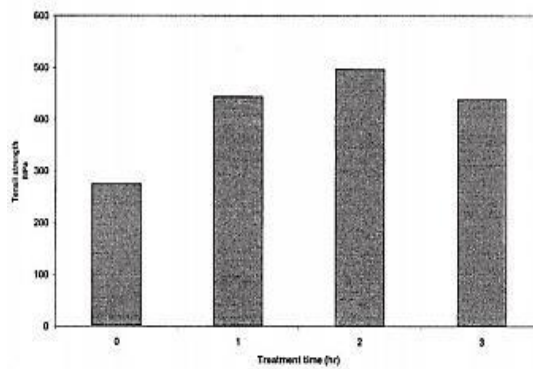


Fig. III. 5 : Effet de la durée de traitement de la soude sur la résistance à la traction de DPF (5% de solution de NaOH à 100 °C.

• Alawar et al. [13] ont déterminé les propriétés mécaniques, des fibres de surface du tronc de palmier dattier, avant et après le traitement chimique avec différentes concentrations de NaOH soit : 0,5%, 1%, 1,5%, 2,5% et 5% pendant une durée d'une heure à une température de 100°C. Les résultats obtenus (Figure III. 6) sont très positifs et montrent bien l'amélioration de la résistance à la traction des fibres du palmier dattier traitées chimiquement pour différentes concentrations de NaOH.

La résistance maximale en traction a été obtenue pour un traitement avec une concentration de 1% de NaOH où la contrainte maximale obtenue est de l'ordre de 4 fois plus importante que dans le cas des fibres non traitées mais avec une dispersion beaucoup plus importante.

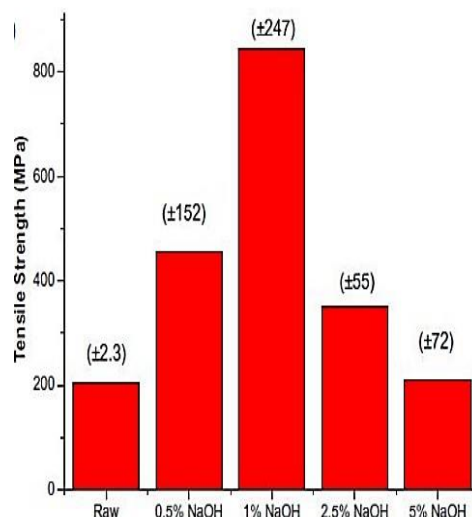


Fig. III. 6 : Propriétés mécaniques pour certaines fibres végétales.

• Agoudjil et al. [1], présentent les résultats d'une étude expérimentale de trois variétés de bois de palmier dattier (*Phoenixdactylifera* L.). Cette étude a pour objectif la caractérisation de différents échantillons de parties renouvelables de bois de palmier provenant de l'oasis de Biskra (Algérie), en vue de l'utiliser dans des matériaux isolants. Les résultats de ce travail



expérimental ont montré que les parties renouvelables du palmier dattier (pétiole et grappe) constituent un bon isolant thermique présentant une faible masse volumique

III. 5. CONCLUSION

D'après l'étude bibliographique faite sur les fibres naturelles et plus particulièrement ceux issues des plantes (végétales), les principales conclusions peuvent :

Les palmiers dattiers possèdent cinq types de fibres à savoir : fibres de bois du tronc ; fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe) ; fibres de feuilles au niveau des pédoncules ; fibres de surface autour de son tronc ou de base de palmes (pétiole) et fibres de liffe.

Les fibres de palmier dattier ayant des propriétés mécaniques et thermiques significatifs et leurs propriétés varient selon la variété du palmier. En plus, les fibres végétales possèdent une structure poreuse capable d'absorber une grande quantité d'eau. L'incorporation de fibres de palmier dans les matrices thermoplastiques ou thermodurcissables peut améliorer les propriétés mécaniques du matériau.



Référence Chapitre III

- [1] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011
- [2] K. Riahi, B. BenThayer, "Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, pp. 608- 613, 2009.
- [3] G. Peyron, "Cultiver le palmier dattier," G.R.I.D.A.O, Montpellier, pp. 109-129, 2000.
- [4] A. Kriker, "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec", Thèse de Doctorat d'Etat, ENP, 2005, PP166.
- [5] A. Kriker, G. Debicki, A. BALI, M.M.Khenfer, M. Chabannet, "Valorization of date palm fibers in reinforcement of concrete at hot dry climate", pp20 –22 Sept. Vienna, ITALY 2004.
- [6] N. Benmansour, "développement et caractérisation de composites naturels" locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, docteur en physique de l'université hadj lakhdar de batna option : énergies renouvelables Soutenu le 18/05/2015
- [7] KARECHE Abdelhak (2014). Etude des matériaux à base de bois de palmier dattier durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert. Mémoire de magister, Faculté de Technologie, Université El Hadj Lakhdar (Algérie).
- [8] Benmansour, N. (2011). Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment. Mémoire de magister, Faculté des sciences, Université El Hadj Lakhdar (Algérie).
- [9] Alaoui S. B., 2005. Référentiel pour la Conduite Technique du palmier dattier. In "Référentiel de Conduite Technique des Principales Cultures au Maroc". Éditeurs: Si Bennasseur Alaoui et Ajiro Yasuhei. 102-112.
- [10] Al?Khanbashi, A., Al?Kaabi, K., & Hammami, A. (2005). Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization. *Polymer composites*, 26(4), 486- 497.
- [11] Taha, I., Steuernagel, L., & Ziegmann, G. (2007). Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 14(7-9), 669- 684.
- [12] Alawar, A., Hamed, A. M., & Al-Kaabi, K. (2009). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606.
- [13] AlKaabi, K., AlKhanbashi, A., & Hammami, A. (2005). Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: DPF/polyester composite properties. *polymer composites*, 26(5), 604-613.

Conclusion générale

Les matériaux composites apportent de nombreux avantages fonctionnels : résistance mécanique et chimique, légèreté, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue à la traction. L'essai de traction est utilisé pour déterminer la résistance des matériaux à la rupture cette résistance à la traction est inversement liée à la nature du matériau. Le composite élaboré montre des bonnes performances a la traction comparons avec un composite à renfort de fibre de verre.

Résumé

Les composites à base de fibres végétales se trouvent de plus en plus dans des applications industrielles et leurs utilisations augmentent de jour en jour. Les principales raisons sont la disponibilité d'un grand éventail de fibres végétales, le respect de l'environnement et la recyclabilité quand ils sont combinés avec des polymères adéquats. L'incorporation des fibres végétales dans des matériaux thermoplastiques ou thermodurcissables pour remplacement des fibres de verre est un concept qui commence à être industrialisé et commercialisé. Les matériaux composites renforcés par des fibres végétales trouvent leur application dans la fabrication des habitacles de plusieurs marques de voitures, de petits bateaux, de kayaks et même dans la boiserie et les constructions en génie civil ou bien dans des structures secondaires de divers applications qui répondent au souci de préservation de l'environnement.

Mots Clés : matériaux composites, fibres naturelles, fibres végétales, palmier dattier.

Abstract

Composites based plant fibers be find more and more in industrial applications and their uses are increasing day by day. The main reasons are the wide range availability of plant fibers, echo-freindly and recyclability when they are combined with suitable polymers. The incorporation of plant fibers in thermoplastics or thermosetting materials to replace glass fibers is a concept that is beginning to be developed and marketed. Composite materials reinforced with plant fibers find their applications in the manufacturing such interiors cars mark, small boats and kayaks and even the woodwork and civil constructions engineering or in secondary structures for applications that concern the meet of the environment preservation.

Keywords : composite materials, Natural fibers, vegetable fibers, Date Palm

ملخص

تمثل دراسة المواد المركبة المعززة بألياف نباتية أهمية كبيرة لدى الباحثين والصناعيين واستعمالاتها تتزايد من يوم لأخر في جميع المجالات وذلك لأسباب بيئية واقتصادية ولكثرة تواجدها وتجدها كل سنة مع قابلية تحليلها. يوجد الكثير من الألياف النباتية التي يمكن استخدامها لتعزيز المواد المركبة، وذلك لتعويض ألياف الزجاج. إن المواد المركبة المعززة بألياف نباتية يتم الآن استخدامها في تصنيع القطع المتواجدة بداخل السيارات وبعض القوارب وحتى في مجالات الهندسة المدنية والهياكل الثانوية التي لا تتطلب قوى كبيرة وتخضع لشرط المحافظة على البيئة.

الكلمات الأساسية : المواد المركبة، الألياف الطبيعية، الألياف نباتية، الألياف النخيل