

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES ET  
SCIENCES DE LA MATIERE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de Master

Domaine : Science et Technique

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et productique

Présenté par :

Bouhoreira Abdelmoumene & Skander Mohammed Fouad

**Theme:**

---

Influence de la fraction massique d'un matériau bio-composite sur les comportements mécaniques

---

Soumis au jury composé de :

Pr. BOUAKBA Mustapha	Professeur	Président	UKM Ouargla
Dr. AMEUR Toufik	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
Dr. KAREK Rabie	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022



# Remerciements

*Nous remercions*

*Allah pour nous détenir permis la puissance pour amener  
de vraiment ce fonctionnement*

*Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à ce  
travail :*

*Tout d'abord le comité responsable pour la réussite de  
travail, **Dr. BOUAKBA Mustapha** et **Dr. KAREK Rabie***

*Nous remercions également, notre encadreur, **Dr. AMEUR  
Toufik** pour sa présence, ses précieux conseils, ses critiques,  
son aide précieuse et ses encouragements qui nous ont  
permis de faire ce travail.*

*Ainsi que tous nos professeurs du Département de Génie  
Mécanique Ouargla, de même **Dr. DJOUDI Tarek** et **Mr  
SMAAL Oussama** la famille de l'Université de Biskra. Et  
tous ceux qui ne peuvent être cités trouvent ici notre  
profonde gratitude.*

*Bouhoreira Abdelmoumene*

*Skander Mohammed fouad*



# *Dédicace*

*Ce petit ouvrage est dédié à*

*À ma mère chérie, source de tendresse, qui veillait toute la nuit pour moi, qui n'hésitait pas à me pousser en avant à chaque occasion, tu es restée pour moi le phare de ma vie.*

*À mon père aimant, mon modèle dans la vie, qui m'a toujours et pour toujours tout donné et qui a été patient avec moi.*

*À mes chers frères et sœurs, et au reste de ma famille qui m'ont soutenu.*

*Toujours et éternellement reconnaissant à tous mes amis proches pour tout leur soutien. Ahmed, Islam, Abdelsattar, Abdelkarim, Belkacem, vous êtes toujours les meilleurs, surtout Seddik,*

*Bouhoreira Abdelmoumene*



# *Dédicace*

*Je remercie Allah tout puissant pour m'avoir aidé  
à accomplir ce travail.*

*Je dédie ce mémoire*

*A mes parents pour leur amour inestimable, leur  
soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils  
ont su m'inculquer.*

*A mes frères, et cousine qui sont pour moi une  
source de motivation et me donne toujours l'envie  
de me surpasser. Et à qui j'espère que la vie  
réserve le meilleur.*

*A toute ma famille ainsi qu'à mes amis.*

*Skander Mohammed Fouad*

## Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Sommaire .....	iv
Liste des figures .....	vi
Liste des Tableaux .....	vii
Les symboles.....	viii
Introduction Générale .....	1
Chapitre I Palmier dattier et utilité de ses matériaux .....	2
I.1 Historique.....	2
I.2 Description morphologique du palmier dattier.....	2
I.2.1 Les racines .....	3
I.2.2 Le stipe ou tronc.....	3
I.2.3 La Palme.....	4
I.2.4 Les organes floraux .....	5
I.2.5 Fruit « la dattes ».....	5
I.3 Répartition géographique du palmier dattier .....	6
I.4 Matériaux extraits du palmier dattiers .....	7
I.5 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier .....	9
I.5.1 L'utilisation traditionnelle des déchets de palmier dattier.....	9
I.5.2 Utilisation avancée des déchets de palmier dattier.....	10
I.6 Synthèse des travaux utilisant des fibres de palmier dattier .....	11
Chapitre II Initiations sur les matériaux composites.....	13
II.1 Introduction .....	13
II.2 Définitions .....	13
II.2.1 Composition d'un matériau composite .....	14
II.3 Classification des matériaux composites .....	17
II.3.1 Classification selon le type de matrice.....	17
II.3.2 Classification selon la catégorie du renfort.....	17
II.3.3 Classification selon la forme du renfort.....	17
II.3.4 Classification selon le marché.....	18
II.4 Procédés d'élaboration des composites .....	19

II.4.1 Le moulage au contact .....	19
II.4.2 La projection simultanée (PS) .....	20
II.4.3 Le BMC (Bulk Molding Compound).....	20
II.4.4 Le SMC (Sheet Molding Compound).....	21
II.4.5 Le procédé RTM (Résine Transfer Molding) .....	21
II.4.6 Le moulage sous vide et l'infusion .....	21
II.4.7 Le moulage par compression à chaud .....	22
II.5 Matériaux bio-composites .....	23
II.5.1 Fibres végétales.....	23
II.5.2 Matrice .....	29
II.6 Conclusion .....	31
Chapitre III Etude expérimentale .....	32
III.1 Introduction.....	32
III.2 Présentation et élaborations des matériaux .....	32
III.2.1 Fibres de rachis .....	32
III.2.2 Matrice.....	36
III.2.3 Mise en œuvre du mélange .....	37
III.2.4 Préparation des éprouvettes.....	38
III.3 Essai de flexion trois points .....	38
III.3.1 Caractéristiques de la machine .....	39
III.3.2 Résultats et discussion .....	39
III.4 Conclusion.....	42
Conclusion générale .....	43
Références bibliographiques .....	44

## Liste des figures

Figure I.1 : Schéma du Palmier Dattier.....	2
Figure I.2 : Les Quatre Types de Racines .....	3
Figure I.3 : Schéma d'une Palme.....	4
Figure I.4 : Inflorescence Mâle et Femelle.....	5
Figure I.5 : Répartition Géographique du Palmier Dattier dans Le Monde .....	6
Figure I.6 : Répartition des Palmiers Dattiers en Algérie en 2014.....	7
Figure I.7 : Structure Schématique d'une Fibre Végétale.....	7
Figure I.8 : Comparaison des Paramètres Structuraux des Fibres de Palmier Dattier.....	8
Figure II.1 : Matériau Composite.....	14
Figure II.2 : Classification des Matrices.....	15
Figure II.3 : Classification des Renforts.....	16
Figure II.4 : Classification des Composites Selon La Nature de La Matrice.....	17
Figure II.5 : Classification des Composites Selon La Forme des Renforts.....	18
Figure II.6 : Schéma de Principe du Moulage au Contact.....	19
Figure II.7 : Schéma de Principe de La Projection Simultanée.....	20
Figure II.8 : Schéma de Principe de BMC.....	20
Figure II.9 : Schéma de Principe de SMC.....	21
Figure II.10 : Schéma de Principe de RTM.....	21
Figure II.11 : Schéma de Moulage Sous Vide.....	22
Figure II.12 : Méthode de Moulage Par Compression A Chaud.....	22
Figure II.13 : Classification des Fibres Végétales.....	24
Figure II.14 : Molécule de La Cellulose .....	25
Figure II.15 : Structure Chimique de La Lignine.....	25
Figure II.16 : Structure d'un Type de Xyloglucane.....	26
Figure II.17 : Structure du Bois (Observations Multi Echelles) .....	26
Figure II.18 : Microstructure d'une Fibre Végétale.....	27
Figure II.19 : Techniques d'extraction des Fibres Végétales.....	27
Figure II.20 : Structures Moléculaires des Polymères.....	29
Figure III.1 : Parties de La Palme.....	33
Figure III.2 : Séchage Naturel.....	33
Figure III.3 : Procédé de Broyage.....	33
Figure III.4 : Procédé de Tamisage.....	34
Figure III.5 : Procédé de Lavage.....	34
Figure III.6 : Procédé de Séchage Electrique.....	34
Figure III.7 : Evolution du Taux d'humidité.....	35
Figure III.8 : Fibres Courtes.....	36
Figure III.9 : Résine Epoxyde Avec Durcisseur.....	36
Figure III.10 : Protocole de Préparation des Plaques.....	38
Figure III.11 : Protocole de Préparation des Eprovettes.....	38
Figure III.12 : Flexion Trois Points.....	39
Figure III.13 : Résultats du Matériau de Fraction 4 % .....	40
Figure III.14 : Résultats du Matériau de Fraction 10 % .....	40
Figure III.15 : Résultats du Matériau de Fraction 16 % .....	40
Figure III.16 : Comparaison des Résultats.....	42

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Composition chimique de quelques types de bois de palmier dattier. ....	8
Tableau II.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables .....	15
Tableau II.2 : Caractéristiques des thermoplastiques .....	16
Tableau III.1 : Processus de séchage de fibre. ....	35
Tableau III.2 : Massiques des composants de mélange. ....	37
Tableau III.3 : Caractéristique du composite de fraction 4 % . ....	41
Tableau III.4 : Caractéristique du composite de fraction 10 % .....	41
Tableau III.5 : Caractéristique du composite de fraction 16 % .....	41



## Les symboles

H	humidité	
$m_h$	La masse initiale	(g)
$m_s$	La masse stable	(g)
$\rho$	La masse volumique	(g/cm <sup>3</sup> )
$V_{\text{moul}}$	La volume de moule	(cm <sup>3</sup> )
$E_f$	La module d'élasticité	
L	Porté (distance entre les deux appuis)	(mm)
b	Épaisseur de l'éprouvette	(mm)
h	Hauteur de l'éprouvette	(mm)
F	La charge	(N)
S	La section	(mm)

## Introduction Générale

L'utilisation des bio-composites s'est généralisée en raison de leur faible coût, de leur faible densité, de leur biodégradabilité, de leur disponibilité, de leur facilité de mise en œuvre et de leur recyclabilité. Le palmier produit annuellement de grandes quantités de déchets qui sont exploités de manière traditionnelle qui ne correspond pas à un usage industriel contemporain, bien qu'il puisse être utilisé plus efficacement comme renfort dans les matériaux composites.

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite biosourcé à base d'une matrice de résine époxy et de fibres de palmier dattier (Rachis). L'étude est concentrée sur l'effet de la fraction massique de fibres sur les améliorations apportées aux matériaux. Dans ce but, des éprouvettes de matériaux composites élaborés en se basant sur de différentes fractions sont testés à l'aide de l'essai de flexion trois points. L'analyse et la comparaison des résultats permettent de présenter l'effet de cette importante caractéristique sur les propriétés mécaniques du matériau.

Ce travail est présenté, sans compter l'introduction et la conclusion, en trois chapitres.

Le premier chapitre fournit des informations générales sur le palmier dattier et les composants qui en sont extraits.

Le deuxième chapitre examine les matériaux composites en général. Il présente aussi les différentes classifications et les techniques d'élaboration de ce type de matériaux.

Le troisième chapitre comporte la partie expérimentale en commençant par les techniques utilisées pour la préparation des matières premières ainsi que celles d'élaboration des échantillons. Dans une deuxième étape, le principe de l'essai de flexion trois points, la mise en œuvre et la discussion des résultats sont présentées.

# Chapitre I

## Palmier dattier et utilité de ses matériaux

## I.1 Historique

L'absence de palmiers à bosse en raison de leur dispersion et de l'hybridation naturelle entre les différentes espèces de dattes dans le monde demeure aujourd'hui inconnue, mais ils sont considérés comme les plus anciens arbres exploités par les anciennes civilisations du Moyen-Orient. Ceci est indiqué par des inscriptions et des monuments sumériens et babyloniens dans l'ancien Irak vers 4000 avant JC, ainsi que dans l'Egypte ancienne à 3000 avant JC, où de nouvelles techniques agricoles se sont formées. Actuellement la culture du dattier s'étend dans l'Hémisphère Nord préférentiellement dans les régions arides et semi-arides chaudes. Elle s'est propagée à pays maghrébins par l'intermédiaire de convois de marchands arabes à travers le désert [22].

## I.2 Description morphologique du palmier dattier

Le palmier dattier est une espèce de plantes monocotylédones de la famille des Arécacées et de la sous-famille des Coryphoideae. Il pousse individuellement ou forme un bloc d'une racine, avec un torse lourd formé de marchés contenant des épines et des feuilles plumeuses (frondes). Le palmier dattier a un taux de croissance lent et peut avoir jusqu'à 100 ans avec de bons soins, jusqu'à 30 mètres de hauteur. L'espèce est dioïque, les fleurs mâles et femelles portent des individus différents. Les fruits de forme ovale sont appelés dattes et sont récoltés en grappe. [21]

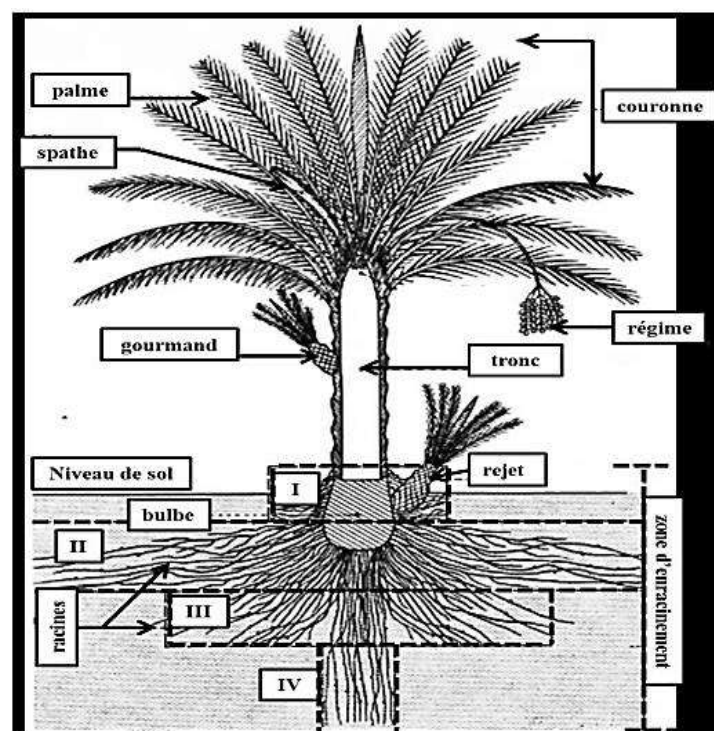


Figure I.1 : Schéma du palmier dattier [21]

### I.2.1 Les racines

Le système racinaire du palmier est axial, c'est-à-dire sans racine principale, émergeant de la base de la tige. Il se compose de faisceaux de racines fourchues d'une épaisseur de 1,5 cm. La profondeur des racines est d'environ 8 à 10 m. Il existe quatre principaux types de racines [19] (Figure : I.2) :

1. Racines respiratoires,
2. Racines de nutrition,
3. Racines d'absorption,
4. Racines formant un Faisceau.

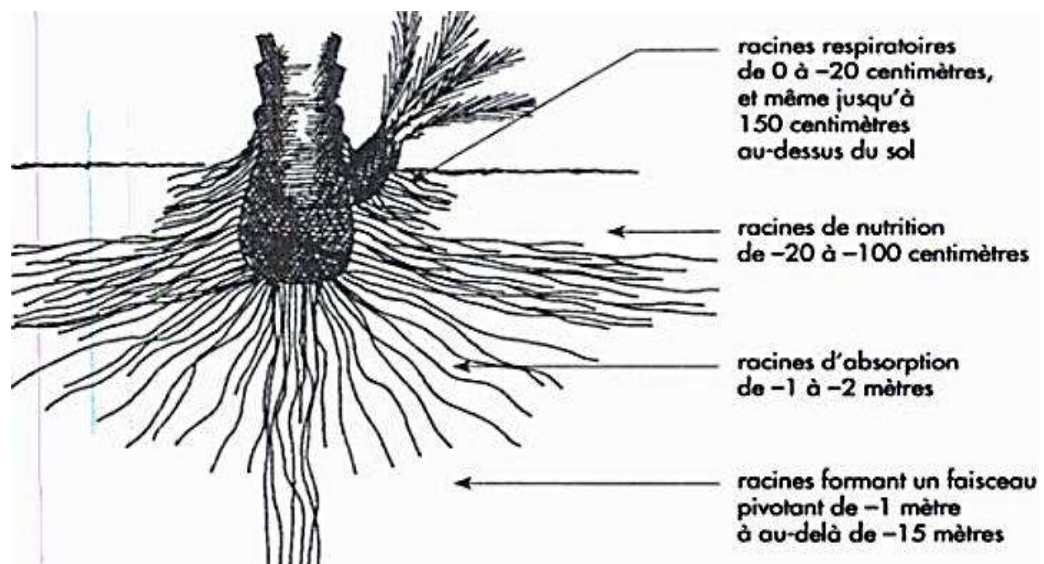


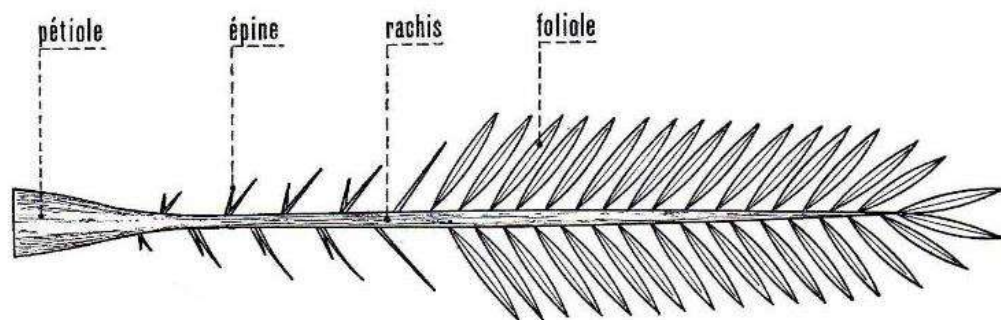
Figure I.2 : Les quatre types de racines [12].

### I.2.2 Le stipe ou tronc

Le tronc est de forme cylindrique d'un même diamètre de bas en haut sans branches latérales. Il a un diamètre compris entre 40 et 90 cm et une hauteur de 10 à 30 m, varie selon les espèces, et recouvert d'une fibre entre les bases des palmiers. Le tronc peut présenter de nombreuses traces de rétrécissement et d'écrasement des bases pétiolaires indiquent les périodes de défaut de nutrition, sécheresse, accidents divers [12].

### I.2.3 La Palme

C'est une feuille pennée avec des folioles placées en oblique le long de la partie supérieure du rachis. Les segments inférieurs deviennent des épines, plus ou moins nombreuses et de longueur variable. Le nombre de palmes varie entre 30 et 150, et ils sont organisés en spirale de 350 à 450 mm de long. Selon le cultivar et la stratégie de culture, le palmier produit 10 à 20 palmes chaque année. La figure I.3 présente les différentes parties d'une palme [3].



**Figure I.3** : Schéma d'une palme [21].

a. Pétiole

Sont les bases pétiolaires de la palme qui restent attachées au stipe après la mort du palmier. Ils sèchent en fin de vie et protègent le tronc (Figure I.3).

b. Les épines et les folioles

Sont organisées plus ou moins régulièrement dans une posture oblique le long du rachis, soit seules, soit par groupes de trois au maximum. Il existe un gradient entre les premières épines et les épines supérieures, qui finissent par se transformer en folioles. La rigidité et la couleur des folioles varient selon le cultivar. Une fine couche cireuse recouvre l'épiderme des folioles. Cependant, la teinte peut changer en fonction des circonstances de croissance [3].

c. Rachis

Le rachis est une structure semi-cylindrique, plus ou moins ailée, qui porte des piquants ou encore des épines, des folioles, et un pétiole dur et inflexible.

### I.2.4 Les organes floraux

Le palmier dattier est une plante dioïque. Parce que les sexes sont séparés, les pieds mâles produisent du pollen et les pieds femelles produisent des fruits, qui sont des dattes. Les fleurs sont portées sur des pédicelles, ou épillets, qui sont portés par un axe charnu appelé hampe ou spadice. La structure entière est enfermée dans une énorme bractée à membrane fermée connue sous le nom de spathe [3].

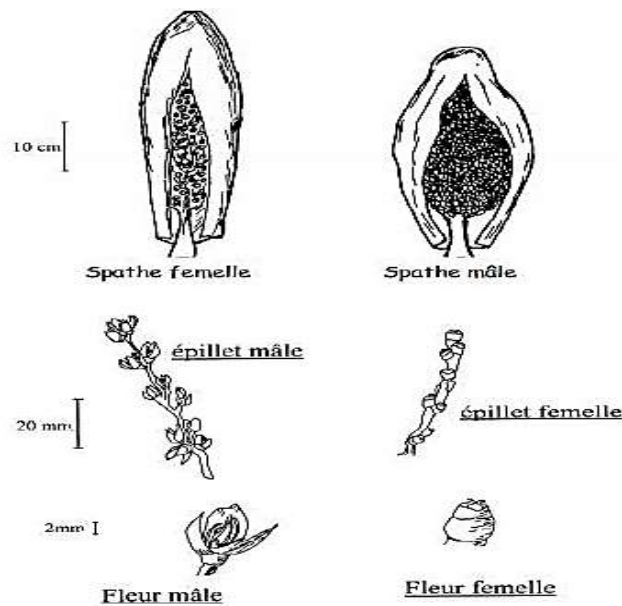


Figure I.4 : Inflorescence mâle et femelle [3].

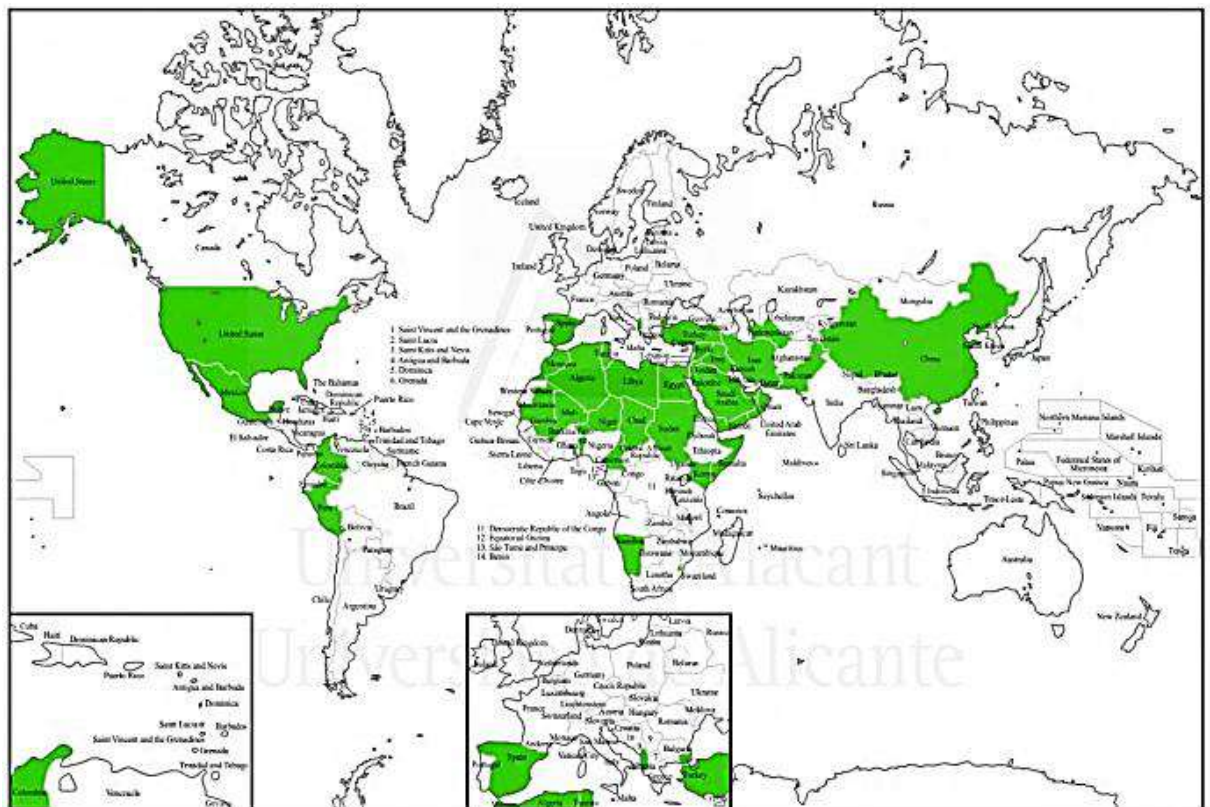
### I.2.5 Fruit « la datte »

Le fruit du palmier dattier est une baie oblongue ou sphérique. La taille et le poids de la datte varient considérablement selon les variétés, allant de 2 à 8 cm de longueur et de 2 à 8 grammes de poids. Sa couleur varie du jaune pâle au brun foncé, avec des nuances plus prononcées, plus rouges et plus foncées. Il est constitué d'un noyau dur entouré de chaises. La partie comestible, aussi appelée chair ou pulpe est constituée des composants suivants :

1. Une fine enveloppe cellulosique appelée peau,
2. Un mésocarpe carbonisé dont la fermeté varie selon la concentration en sucre et la couleur vive,
3. Un endocarpe plus clair à structure fibreuse, parfois réduit à une membrane parcheminée autour du noyau [1].

### I.3 Répartition géographique du palmier dattier

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le nombre total de palmiers dattiers dans le monde en 2005 était estimé à plus de 180 millions, dispersés dans une trentaine de nations sur trois continents (Asie, Afrique et Amérique). L'Asie est en tête des trois continents avec 125,5 millions de palmiers dattiers (70 % du patrimoine mondial), avec une grande partie concentrée principalement en Iran avec 25 millions et en Irak avec 21 millions de palmiers, tandis que l'Afrique compte 52,6 millions de palmiers concentrés principalement en Afrique du Nord. Il y a environ 6 millions de palmiers au Mexique et aux États-Unis [26]. La figure I.5 présente, en couleur vert, les régions de forte concentration de palmiers dattier.

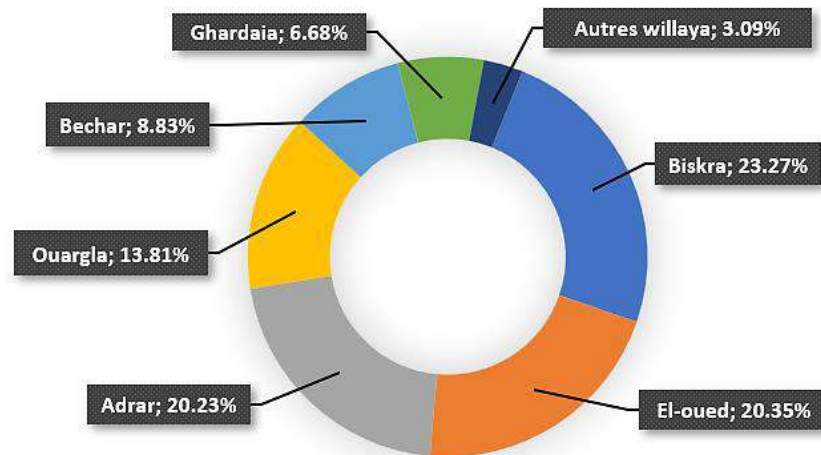


**Figure I.5 :** Répartition géographique du palmier dattier dans le monde [28].

Selon les statistiques de 2014, il y avait environ 18,4 millions du palmier en Algérie, couvrant une superficie occupée de 168,8 mille hectares, répartis dans les différents Wilayas, la majorité d'entre eux étant concentrée dans la partie sud du pays dans le désert. La Wilaya de Biskra détient la plus grande partie avec environ 24 % de l'acquisition totale, suivie d'El-Oued et d'Adrar. Ces trois régions représentent plus de la moitié de la superficie totale plantée en



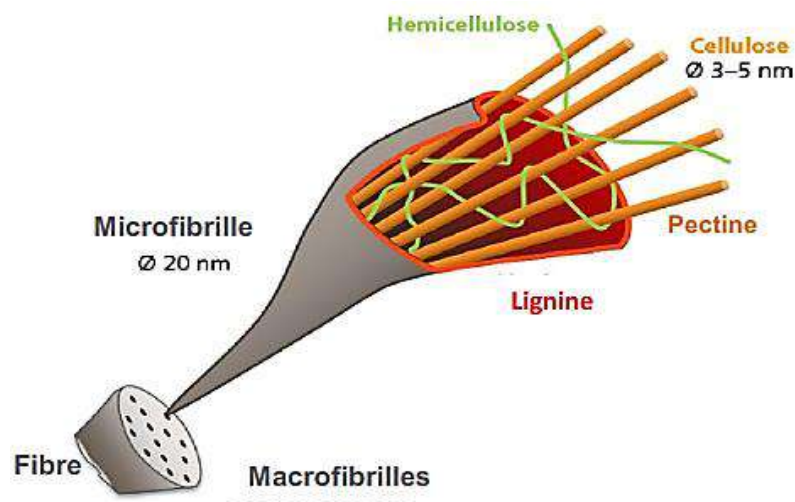
palmeiers dattiers, suivis de la région de Ouargla et du reste des Wilayas [3]. Cette répartition est présentée, avec précision, sur la figure I.6.



**Figure I.6** : Répartition des palmiers dattiers en Algérie en 2014 [3].

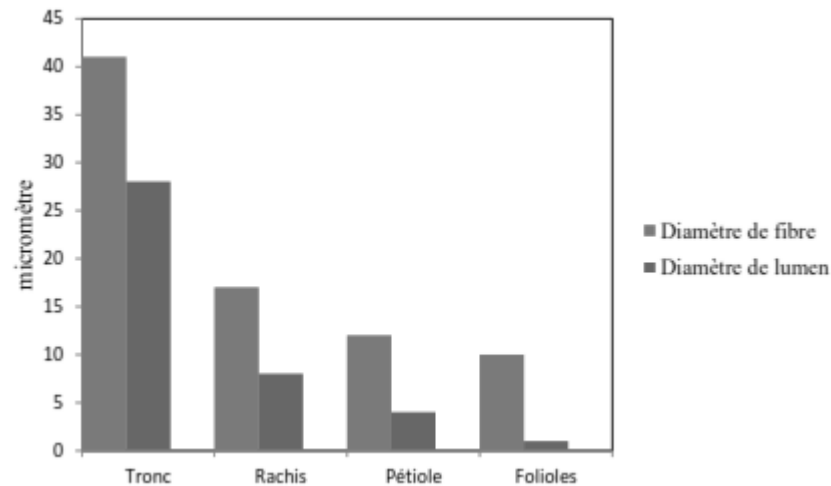
#### I.4 Matériaux extraits du palmier dattiers

La découverte de composants prélevés sur des palmiers nécessite la vérification de leur structure. Les palmiers, comme indiqué précédemment, sont constitués de fibres végétales plutôt que de bois, ce qui permet d'accéder à ces matériaux en désassemblant physiquement et chimiquement les fibres de palmier dattier. Le bois de palmier, comme les autres fibres végétales, constituées de trois composants principaux : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.



**Figure I.7** : Structure schématique d'une fibre végétale [29].

Les fibres de fibrillium variaient en longueur de 100 à 500  $\mu\text{m}$  et en diamètre de 0,1 à 1  $\mu\text{m}$ , ce qui en faisait des fibres énormes par rapport aux autres fibres végétales. Chaque fibre multicellulaire a une lumière centrale de 2 à 5  $\mu\text{m}$  de diamètre. Les fibres les plus longues sont les trains, les fibres du rachis et du pétiole et les fibres du tronc. Comparé au diamètre des fibres des feuillets, le diamètre des fibres du tronc s'est avéré plus de quatre fois supérieure [14].



**Figure I.8 :** Comparaison des paramètres structuraux des fibres de palmier dattier [14].

Les substances extraites, solubles dans l'eau et les cendres constituent le reste de la composition (une substance minérale). Ses niveaux sont affectés par l'organe du palmier dattier, son âge et son environnement de croissance. Cependant, les quantités de chaque composant sur le même organe ne diffèrent pas de manière significative. La lignine est abondante dans le bois de palmier. Un taux typique est d'environ 27 % pour la lignine, 37 % pour l'hémicellulose et 28 % pour la cellulose [14].

**Tableau I.1 :** Composition chimique de quelques types de bois de palmier dattier.

Type de bois de palmier dattier	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Autres (%)
Folioles	33,5	26	27	13,5
Rachis	41,2	28,5	27,3	3
Fibrillium	46	18	20	16
Pétiole	75,6		16,8	7,6
Tronc	45	23	Nd	Nd

## **I.5 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier**

La totalité des composants du palmier dattier a été employée pour la production d'une large gamme d'articles utilisés dans les différents aspects de la vie quotidienne. Les progrès technologiques modernes ont influencé cette exploitation en lui permettant d'être considéré comme une source de matières premières à finalité industrielle.

### **I.5.1 L'utilisation traditionnelle des déchets de palmier dattier**

Nous pouvons, dans cette partie de mémoire, présenter les utilités des différentes parties du palmier dattier d'une manière séparée.

#### **a. Tronc**

L'objectif principal du tronc est son bois, qui n'est pas d'excellente qualité en raison des faisceaux vasculaires grossiers, mais il a une résistance à la traction élevée. En effet, il a été utilisé dans :

- La fabrication des portes, des poteaux et des escaliers pour les maisons,
- La production des meubles rustiques,
- Le chauffage en les brûlant.

#### **b. Feuilles**

Les feuilles offrent le plus d'options d'utilisation finale, qui sont expliquées en détail par les composants distincts de la feuille.

- Les feuilles entières sont utilisées en clôture en les insérant dans le sol et en les maintenant ensemble, ou en cloisonnement de maison et d'enclos,
- Les nervures centrales sont utilisées pour fabriquer des caisses ainsi que des meubles,
- Les dépliantes sont principalement utilisés dans des tresses, qui sont assemblées dans une variété de paniers et de sacs, mais ils sont également utilisés dans des nattes et des articles plus petits comme des éventails et des casquettes,
- Les gaines sont surtout connues pour les nombreuses variétés de cordes qui peuvent être fabriquées à partir de celle-ci.

### I.5.2 Utilisation avancée des déchets de palmier dattier

L'utilisation avancée se concentre sur l'extraction des ressources des déchets et leur réinsertion plus efficace grâce à l'utilisation de technologies industrielles contemporaines, qu'elles soient physiques ou chimiques.

#### a. L'alimentation animale

Un examen *in vitro* de la valeur alimentaire des composants autres que les fruits du palmier dattier après un traitement à l'hydroxyde de sodium et une supplémentation avec les résidus de blé et du fumier de poulet a montré que tous les composants avaient une valeur certaine mais limitée pour l'alimentation des ruminants. Les niveaux de digestibilité étaient plus élevés, mais encore modestes, ce qui indique qu'il existe un potentiel d'utilisation des sous-produits de palme dans l'alimentation animale [31].

#### b. Modifications du sol

Bien que l'utilisation de fibres de dattes et de folioles de dattes comme paillis dans une expérience de culture de maïs ait entraîné un délai de maturité et de rendement négatif, les feuilles de palmier dattier déchiquetées peuvent être utilisées comme excellent substrat horticole pour la culture de légumes tels que les tomates et les concombres. La mousse de tourbe, le sable, la perlite et la vermiculite combinés aux palmiers dattiers déchiquetés ont fourni le meilleur milieu pour la culture des tomates et des concombres par rapport au plastique transparent, ou plastique noir et à la paille [31].

#### c. Planches

La fabrication de planches à partir de nervures médianes et de tiges de palmier est réalisable avec d'excellents résultats, mais le coût de fabrication est supérieur à celui des planches de bois en raison de la désintégration importante requise et des besoins en résine plus élevés que les besoins typiques. Les tests sur la production de panneaux de fibres de gypse n'ont pas été totalement réussis. Le processus nécessite plus de raffinement [31].

#### d. Matière première industrielle

Les trois principaux composants des sections fibreuses du palmier dattier, la cellulose, les pentosanes et la lignine, sont des rivaux majeurs pour l'extraction des matières premières industrielles. Tous les trois doivent être produits à grande échelle pour être compétitifs à l'échelle mondiale. Dans le cas des déchets de palme, cela peut poser des problèmes

d'approvisionnement car ils sont largement répandus, et les frais de transport de cette matière première lourde peuvent devenir un facteur limitant [31].

e. Divers

Plusieurs autres initiatives d'exploitation des sous-produits du palmier ont été décrites dans la littérature technique, dont certaines sont de nature plus savante que clairement pratique :

- Les fibres de palmier dattier ont été déterminées comme étant le meilleur choix pour les textiles perforés, et des recommandations ont été faites pour utiliser les fibres comme média filtrant pour couvrir les tuyaux de drainage souterrains,
- Le pollen a également une valeur nutritionnelle élevée en raison de sa teneur élevée en protéines, en sucre et en matières grasses, ce qui le rend approprié pour les secteurs des suppléments nutritionnels,
- Du matériel cellulosique provenant de diverses sections de palmier (tiges et feuilles) a été hydrolysé et évalué pour la synthèse de protéines unicellulaires sur plusieurs souches de levure.

## I.6 Synthèse des travaux utilisant des fibres de palmier dattier

Cette partie de l'étude propose une synthèse bibliographique des travaux réalisés par différents chercheurs dans le domaine de l'utilisation des fibres de palmier dattier dans la mise en œuvre des composites.

K. Almi [14] a étudié l'effet des propriétés chimiques, physiques, thermiques et mécaniques de la fibre de palmier sur le développement de panneaux de particules destinés à être utilisés dans le secteur de la construction, ainsi que les caractéristiques de tout type de bois rejeté et le processus de fabrication approprié pour produire des planches avec les meilleures caractéristiques. Les résultats ont révélé que les variétés de fibres de palmier différaient quelque peu.

A. Sbiai [4] a étudié les propriétés mécaniques des sédiments agricoles de palmier dattier en les introduisant comme renfort fibreux dans la préparation de bio-composites à matrice poly oxyde (DGEBA/IPD) aux petites et grandes déformations de ces composés et en mettant en évidence l'effet de l'oxydation des fibres sur ces propriétés, a montré un effet positif de l'oxydation sur la progression de l'injection. La meilleure mouillabilité du mat de fibres oxydées par la résine est à l'origine des progrès d'amélioration.

S, Nafti et O.E. Halem [24] étudiaient les caractéristiques thermiques des composites à base de fibres de bois de palmier. Ils ont calculé la diffusion et l'efficacité de l'eau du composé étudié en fonction de l'humidité relative en utilisant les résultats des tests de perméabilité à la vapeur d'eau et des courbes d'adsorption disponibles dans le laboratoire de réaction, ainsi que la dynamique d'interaction des systèmes et des modèles théoriques appropriés. Les caractéristiques hydrothermiques se sont avérées sensibles aux variations de la teneur en fibres.

# Chapitre II

## Initiations sur les matériaux composites

## II.1 Introduction

A partir des années 90 du dernier siècle, de nouveaux matériaux composites ont émergé dans le paysage industriel. A cet effet, de nombreux chercheurs s'attachent à trouver une alternative aux produits provenant de la pétrochimie. Les matériaux agro-composites ou bio-composites connaissent une croissance de l'ordre de 50% par an.

L'introduction des fibres naturelles dans des matrices polymères (biodégradables ou non) peut apporter des avantages notoires par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites (comme les fibres de verres) et cela grâce à leur faible densité, leurs bonnes propriétés mécaniques, leurs faibles coûts, etc.

Dans ce chapitre, nous exposons une généralité sur les matériaux composites. Cette généralité est dédiée à la définition de ces matériaux, leurs constituants et leurs classifications.

## II.2 Définitions

Un matériau composite (comme son nom l'indique) est composé de plusieurs constituants, d'une phase continue appelée matrice (liant) et d'une ou plusieurs phases discontinues appelées renfort ou fibre, généralement plus dure et confie au matériau des propriétés mécaniques élevées. Dans le cas de plusieurs phases discontinues, le composite est appelé hybride [6].

En plus de ces deux constituants de base, il faut ajouter une interface qui assure la compatibilité renfort-matrice et transmet les contraintes de l'un à autre. Des produits chimiques entrent dans la composition mais n'interviennent pas dans le calcul des structures composites.

Les propriétés des matériaux composites résultent des :

- Propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leur interaction

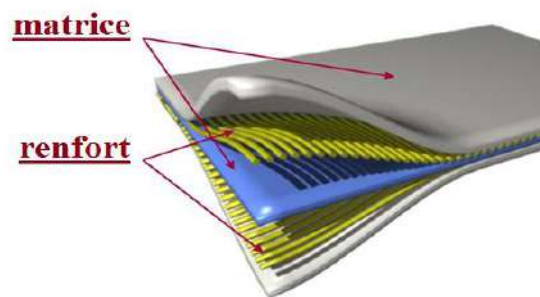
Ainsi pour procéder à la description du matériau composite, il est nécessaire de spécifier :

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



### II.2.1 Composition d'un matériau composite

Un matériau composite peut être défini, d'une manière générale, comme l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles à l'échelle microstructurale. Les composites sont le plus souvent constitués d'une matrice dans laquelle on a dispersé de façon contrôlée des renforts (figure II.1). La matrice maintient les renforts et assure les transferts de charge, tandis que les renforts apportent principalement leurs caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...). Cette association a pour but d'obtenir un matériau dont les propriétés spécifiques (propriétés mécaniques rapportées à la masse volumique) sont supérieures à celles de la matrice non renforcée. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes [27].

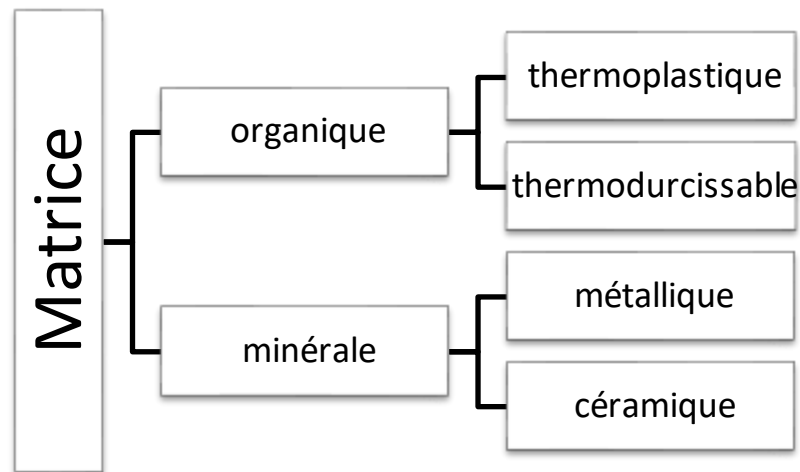


**Figure II.1** : Matériau composite [20].

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

#### II.2.1.1 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. La classification courante des matrices rencontrées est donnée sur la figure II.2.



**Figure II.2** : Classification des matrices.

### II.2.1.1.1 Matrice thermodurcissable

La structure des matrices TD (Matrice thermodurcissable) a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible. Le tableau II.1 présente les caractéristiques de ce type de matrices.

**Tableau II.1** : Caractéristiques des résines thermodurcissables [30].

Résine	Densité	E (Gpa)	$\sigma_r$ (mpa)	T max (°C)
Epoxyde	1.2	4.5	130	90-200
Uréthane	1.1	0.7-7	30	100
Polyester Insaturé	1.2	4	80	60-200
Urée Formaldéhyde	1.2-1.5	6-10	40-80	140
Phénol Formaldéhyde	1.1-1.3	3-4	35-60	80-300

### II.2.1.1.2 Matrice thermoplastique

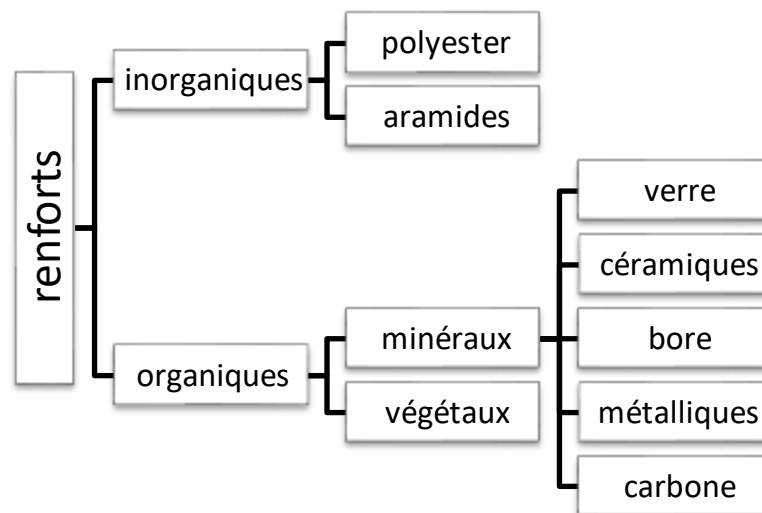
La structure des TP (Matrice thermoplastique) se présente sous forme de chaînes linéaires. Lorsqu'on les chauffe, les chaînes se plient en permettant le façonnage. Après refroidissement, les chaînes se bloquent en donnant la forme finale de la pièce. Cette opération est réversible. Le tableau II.2 présente les caractéristiques de ce type de matrices.

**Tableau II.2** : Caractéristiques des thermoplastiques [30].

Polymère	Tg (°C)	Tf (°C)	Densité	$\sigma_r$ (MPa)	E (GPa)
Polypropylène (PP)	5	165	0.92	30	1.2
Acide polylactique (PLA)	50-60	150	**	40-60	3.4
Polyéthylène haute densité (HDPE)	-100	134	0.95	28	1.1
Polychlorure de vinyle (PVC)	75-105	160-220	1.39	58	2.9
Polystyrène (PS)	90-100	-	1.05	55	3.2
Polyéthylène téréphtalate (PET)	70	255-265	1.30	47	2.6
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	90-120	-	1.05	50	2.5

### II.2.1.2 Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché. Le choix d'un type peut être réalisé suivant les propriétés visées et en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure en question. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure II.3.

**Figure II.3** : Classification des renforts [15].

### II.2.1.3 Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques. Des charges non renforçâtes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [16].

## II.3 Classification des matériaux composites

### II.3.1 Classification selon le type de matrice

La classification habituellement utilisée dans ce cas est décrite selon les trois principales matrices utilisées, les composites à matrice organique, les composites à matrice céramique et les composites à matrice métallique [25]. Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles ont été utilisées [23]. La Figure II.4 représente une classification des composites selon la nature de la matrice.

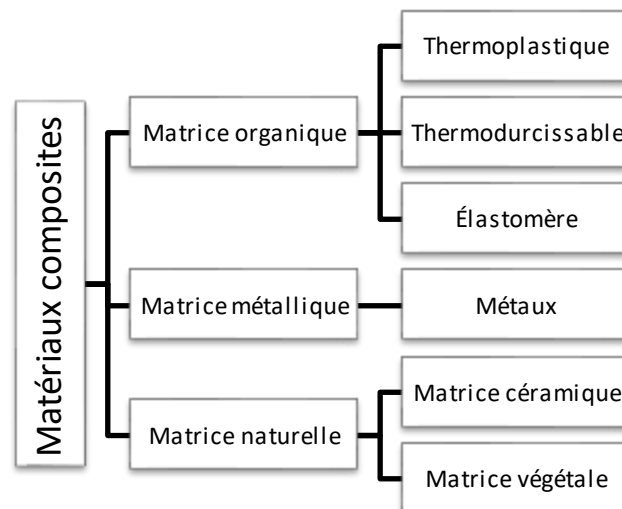


Figure II.4 : Classification des composites selon la nature de la matrice.

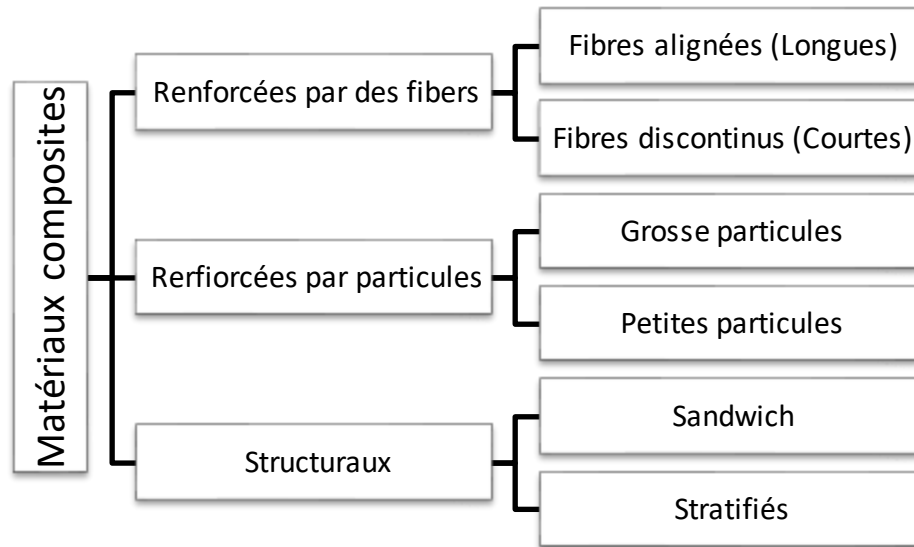
### II.3.2 Classification selon la catégorie du renfort

Les composites fibreux peuvent être classés en deux catégories selon les catégories des fibrés : fibres inorganiques et fibres organiques. Ces fibres peuvent se présenter sous différentes formes : forme linéique, forme surfacique et en forme multidirectionnelle [16].

### II.3.3 Classification selon la forme du renfort

La Figure II.5 présente la classification du composite selon la forme des renforts. Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres, soit continués (fibres longues), soit discontinues (coupées, courtes). Il est considéré à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules, sachant qu'une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée [16]. Nous pouvons souligner que la troisième famille "structuraux" de cette classification est le résultat de l'intégration des deux premières familles "renforcés par des particules", "renforcées par des fibres". Ces deux

premières familles se différencient à partir de la valeur du facteur de forme  $L/d$  du renfort où  $L$  et  $d$  sont, respectivement, la longueur et le diamètre du renfort [16].



**Figure II.5** : Classification des composites selon la forme des renforts.

### II.3.4 Classification selon le marché

On retrouve souvent la distinction suivante par laquelle les matériaux sont classés en fonction du marché.

- Les composites de grande diffusion (GD) : ce sont des composites peu coûteux (<10 à 40 €/kg) qui occupent une large part du marché. On les trouve dans l'industrie du bâtiment, le transport nautique, les piscines, les équipements électriques.
- Les composites à hautes performances (HP) : ce sont des composites assez onéreux, Dont le marché est encore réduit pour les applications aérospatiales, transports, Sports de compétition (coût > 40€/kg) [27].

Récemment, l'industrie a été amenée à exploiter des matériaux naturels et à les utiliser pour produire des matériaux composites respectueux de l'environnement. Il existe d'autres appellations proches comme éco-composites, composite biosource et agro-composites. Ces matériaux s'inscrivent également pleinement dans les concepts émergents de la chimie verte et la chimie durable. Les bio-composites sont ainsi composés dans le principe de renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice issue préférentiellement de la biomasse [16].

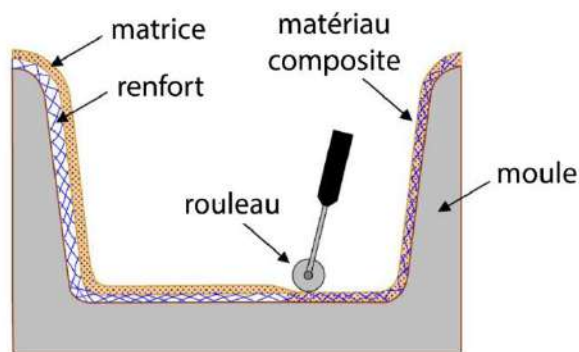
## II.4 Procédés d'élaboration des composites

L'industrie utilise une vaste gamme de méthodes de mise en œuvre des matériaux composites. Ces procédés peuvent être classés en fonction de la nature de la matrice utilisée, les méthodes de mise en œuvre des matériaux composites à matrice thermodurcissables se classent généralement en fonction des séries à réaliser et des dimensions des pièces. La préparation de matériaux composites à matrice naturelle est plus récente, notamment l'utilisation de matrices de PLA (bio polymère avec acide lactique d'origine fossile) à base de cellulose en cours de développement [5]. En général, les méthodes de mise en œuvre des bio-composites sont manuelles ou semi-automatisées.

Parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux composites, on distingue :

### II.4.1 Le moulage au contact

Le moulage au contact est la technologie de mise en œuvre la plus utilisée dans le secteur de la transformation des matériaux composites. Le principe consiste à imprégner les renforts secs, disposés dans un moule, de résine accélérée et catalysée. Une phase de débullage, à l'aide d'un rouleau est nécessaire afin d'éliminer les inclusions d'air dans la pièce (figure II.6).



**Figure II.6** : Schéma de principe du moulage au contact.

Cette technologie qui ne nécessite aucun investissement est très facile d'apprentissage. En revanche, le moulage au contact présente des inconvénients majeurs par rapport aux autres techniques. Dans ce procédé, les taux de renfort restent assez faibles avec cette technologie de mise en œuvre (la quantité de résine nécessaire pour le mouillage de la fibre doit être importante) et l'homogénéité de la pièce dépend fortement de l'opérateur qui stratifie la pièce composite [7].

### II.4.2 La projection simultanée (PS)

La projection simultanée est un procédé semi-mécanisé qui permet la réalisation de pièces de grandes dimensions aux formes simples ou complexes. Rapide et facile à mettre en œuvre, il nécessite l'utilisation d'une machine de projection assurant la découpe du fil, l'imprégnation et sa projection sur le moule [16].

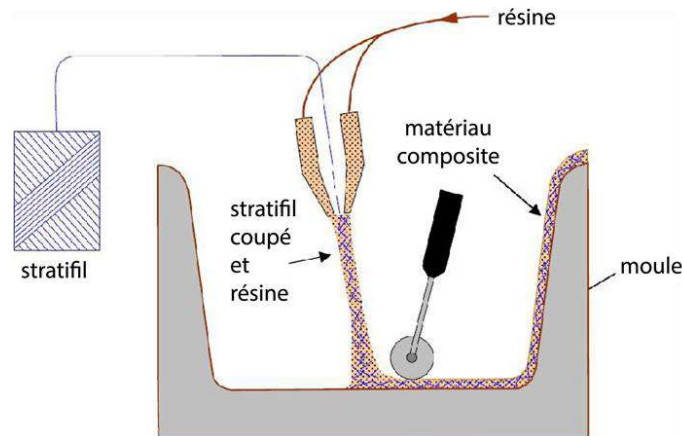


Figure II.7 : Schéma de principe de la projection simultanée.

### II.4.3 Le BMC (Bulk Molding Compound)

Dans ce procédé le mélange, de matrice et renforts sous forme de fibres coupées, est moulé par compression à l'aide d'une presse à injection, sous des pressions de 150 à 180 bars, à grande vitesse dans un moule fermé et régulé en température entre 150 et 160 °C. cette technique est destinée aux procédés de moulage pour grandes séries [16].

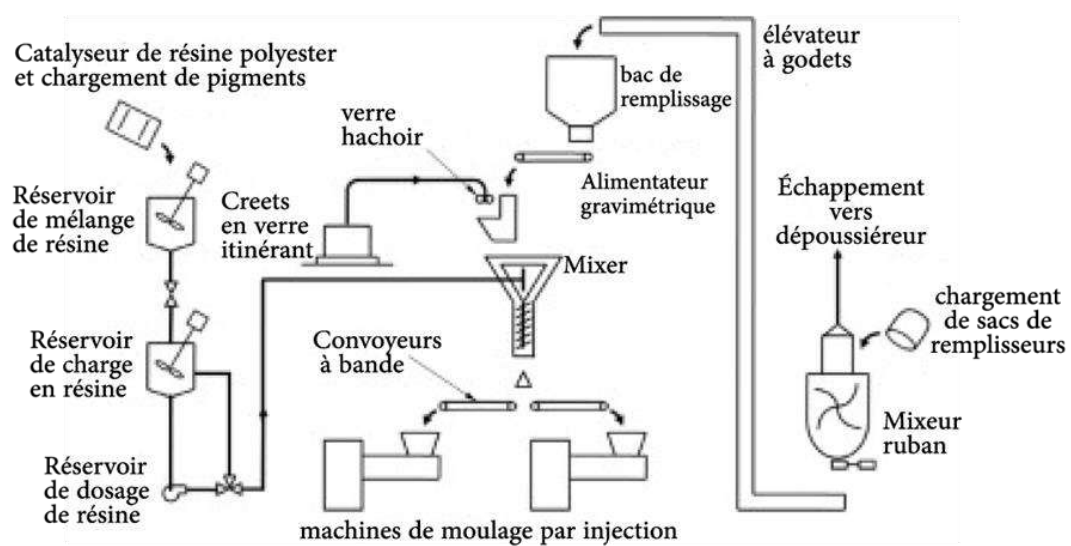


Figure II.8 : Schéma de principe de BMC.

#### II.4.4 Le SMC (Sheet Molding Compound)

C'est un moulage à haute pression des semi produits composé de matrice et renfort. Il est utilisé dans la fabrication des pièces employées en très nombreux secteurs d'activités.

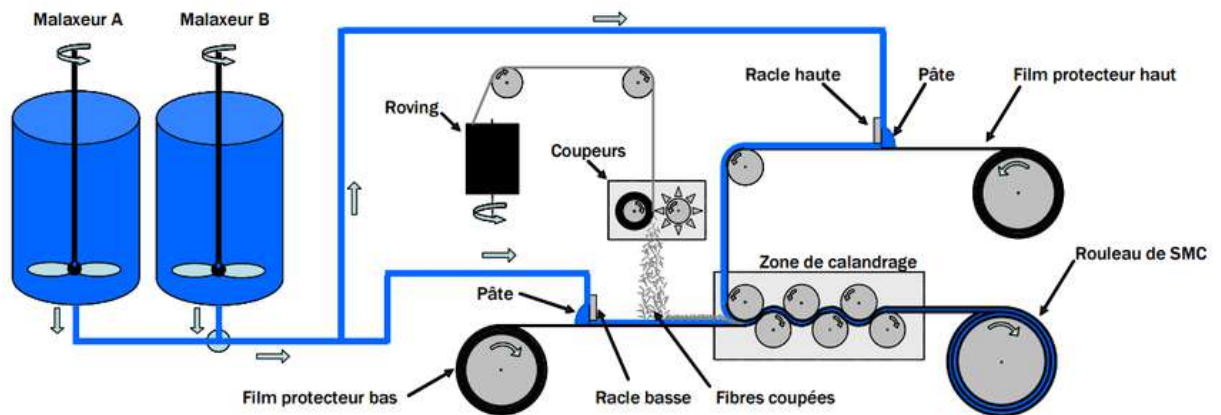


Figure II.9 : Schéma de principe de SMC.

#### II.4.5 Le procédé RTM (Résine Transfer Molding)

Le moulage par injection à basse pression de résine est une technique de fabrication de pièces en matériaux composites. C'est un procédé industriel d'injection à basse pression de résine liquide dans un moule rigide et fermé.

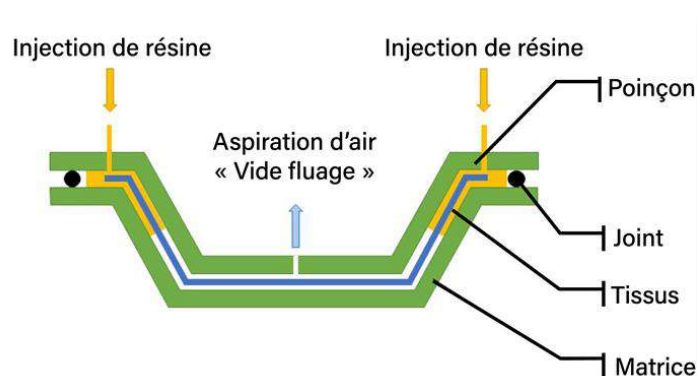


Figure II.10 : Schéma de principe de RTM.

#### II.4.6 Le moulage sous vide et l'infusion

Les procédés faisant appel au vide sont nombreux. Celui-ci ayant pour principal avantage de permettre d'appliquer sur une pièce une pression uniforme importante à moindre coût. Mais il présente aussi certains inconvénients, tels que le choix limité du taux et de la forme de renfort utilisée pour chaque processus. De plus, le moulage sous vide est difficile à mettre en œuvre avec des moules à plan de joint [16].



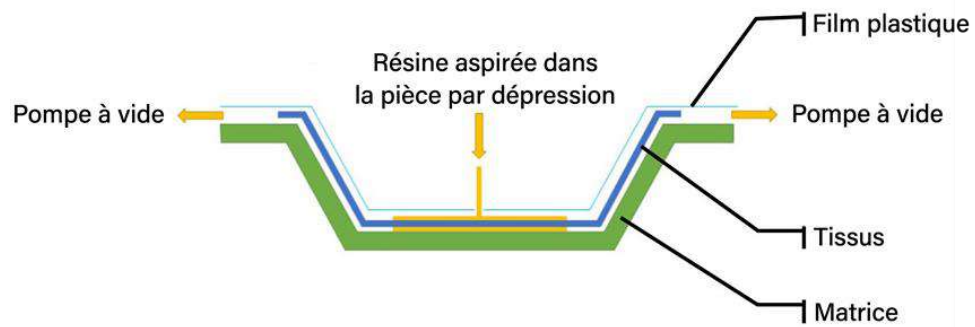


Figure II.11 : Schéma de moulage sous vide.

#### II.4.7 Le moulage par compression à chaud

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants. Le renfort, constitué par un mat fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Par la suite, la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes des renforts, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars et la température des moules de l'ordre de 80 à 150°C. Les cadences des fabrications peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [10].

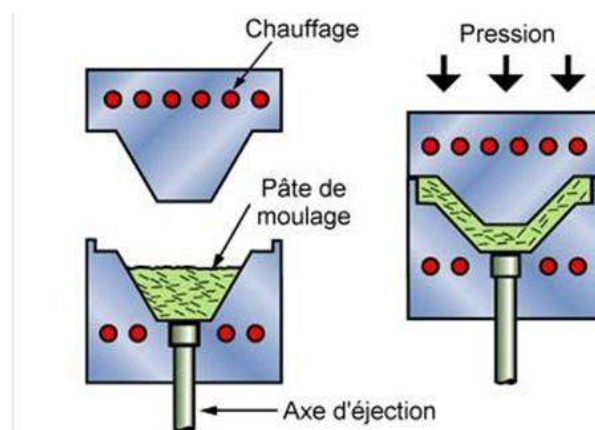


Figure II.12 : Méthode de moulage par compression à chaud.

## II.5 Matériaux bio-composites

Les bio-composites sont des matériaux composites utilisant des renforts et des résines d'origine végétale. Ils représentent une combinaison de résines thermoplastiques ou thermodurcissables et de renforts, sous forme de fibres en tissus ou non tissés. Les technologies de production sont principalement l'injection et la thermocompression [18].

Les bio-composites sont caractérisés par le fait que :

- La résine pétrochimique est remplacée par une résine végétale ou animale,
- Les renforts synthétiques (fibres de verre, fibres de carbone, ...) sont remplacés par des fibres naturelles (miscanthus, chanvre, lin, sisal, jute, etc).

### II.5.1 Fibres végétales

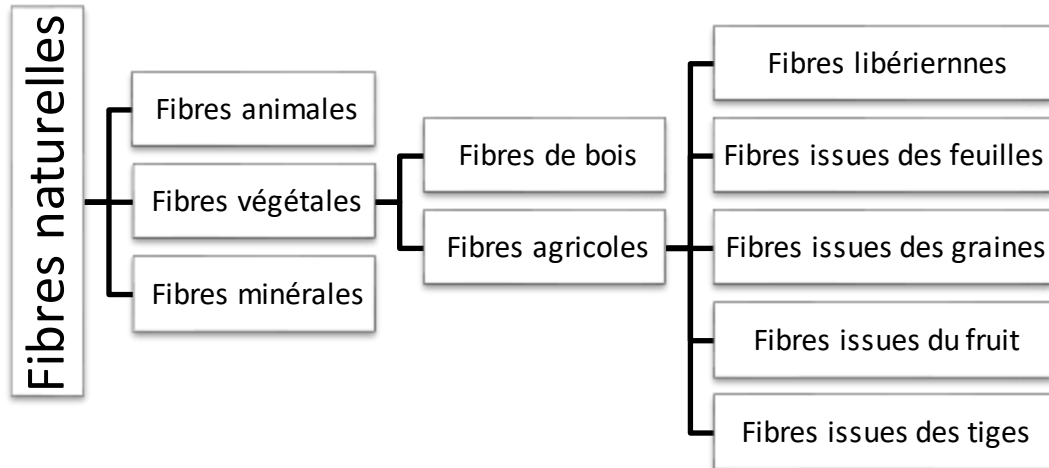
Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou la feuille d'une plante cultivée, des arbustes et des herbes. La fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des filaments 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. Les fibres végétales sont également caractérisées par la diversité de l'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse. La forme morphologique de la fibre végétale peut également être un facteur important dans la compréhension du transfert de contrainte aux interfaces fibre-matrice [13].

#### II.5.1.1 Propriétés des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont convenables à renforcer des matrices thermodurcissables et thermoplastiques, grâce à leur résistance et leur rigidité relativement hautes et leur basse densité. Les propriétés mécaniques des fibres végétales en traction présentent un important atout pour renforcer les matériaux composites si on s'intéresse aux impacts environnements. Cependant, il y a relativement peu de données fiables disponibles dans la littérature pour leur sélection, dues aux limitations dans la méthodologie d'essai [28].

### II.5.1.2 Classification des fibres végétales

Nous pouvons subdiviser les fibres végétales selon la source d'extraction (l'origine), à savoir la graine, la feuille, le fruit ou la tige libérienne ou dure. La figure II.13 illustre une classification détaillée de ce type de renforts.



**Figure II.13** : Classification des fibres végétales.

### II.5.1.3 Composition chimique des fibres végétales

#### A. Cellulose

L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales était d'abord découverte par Anselme Payen en 1838 [22]. La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo régulière composée de maillons de glucose  $C_6H_{12}O_6$  (Figure II.14). La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées. Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile [32].

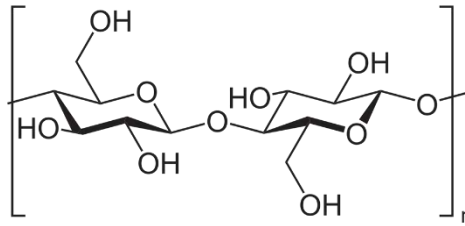


Figure II.14 : Molécule de la cellulose [8].

### B. Les lignines

La lignine participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. Ses propriétés mécaniques sont plus faibles que celles de la cellulose. Elle est totalement amorphe et de nature hydrophobe. C'est le composé qui donne de la rigidité à la plante. De même la lignine est considérée comme un polymère thermoplastique, présentant une température de transition vitreuse d'environ 90°C et une température de fusion de l'ordre de 170°C [2]. La structure chimique de cette composante est donnée dans la figure II.15.

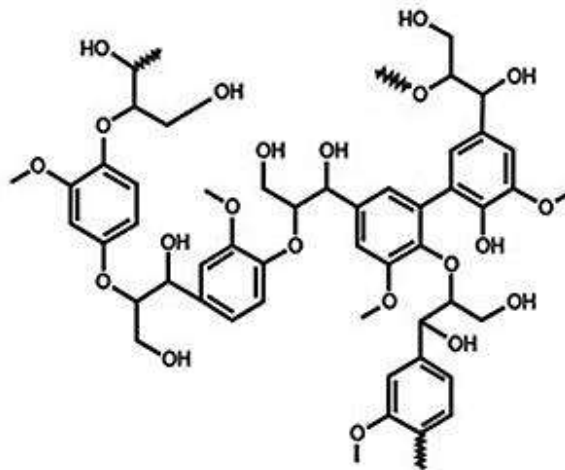
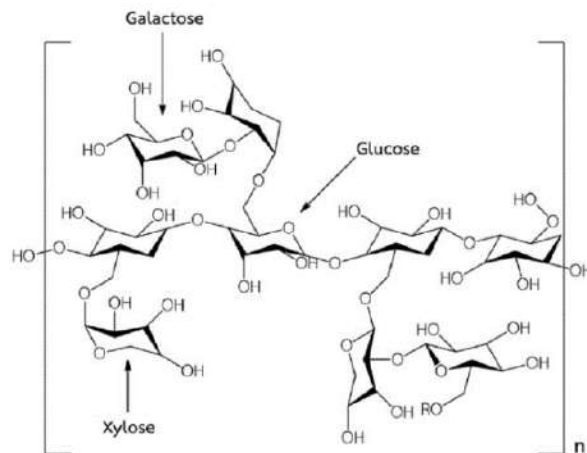


Figure II.15 : Structure chimique de la lignine [9].

### C. Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (Figure II.16). Les hémicelluloses sont des polysaccharides pariétaux non cellulosiques extraits des végétaux. Elles constituent le principal liant dans la structure pariétale des végétaux en s'associant par liaisons hydrogènes aux micros fibrilles de cellulose et à la cellulose de la paroi cellulaire. La variabilité des motifs monomères constitutifs de la chaîne principale (xylose, arabinose, glucose, mannose, galactose, etc.) permet de distinguer différents types d'hémicellulose. Les hémicelluloses sont des polymères à chaînes courtes, amorphes, et

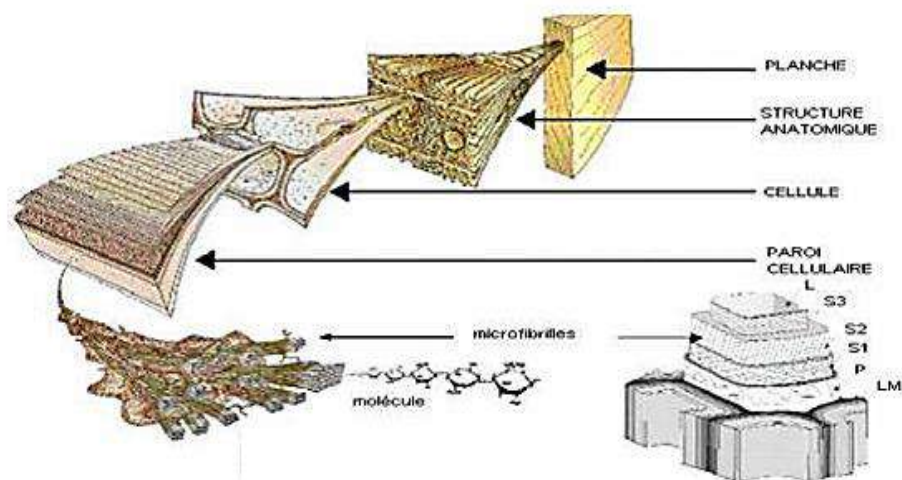
fortement hydrophiles souvent utilisées comme agent épaississant, stabilisant ou émulsifiant [22]. L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin, et facilement Hydrolysable dans les acides [8,32].



**Figure II.16** : Structure d'un type de xyloglucane [17].

#### II.5.1.4 Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de micro fibrille 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 [15]. La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couches superposées dans le sens radial. Ces différentes couches forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. La figure II.17 présente la structure d'une planche de bois. Dans cet exemple, les parois bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de micro fibrilles (S1, S2, S3).



**Figure II.17** : Structure du bois (observations multi échelles) [11].

Les micros-fibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle microfibrillaire dont la valeur varie d'une espèce à l'autre (figure II.18). L'orientation du micro fibrilles 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 micros fibrilles augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augment [26].

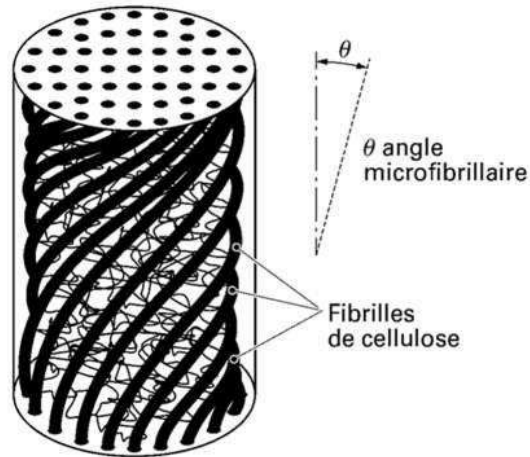


Figure II.18 : Microstructure d'une fibre végétale [15].

### II.5.1.5 Processus d'extraction des fibres

Les procédés de séparation des fibres généralement utilisés de nos jours sont schématisés dans le diagramme de la figure II.19 :

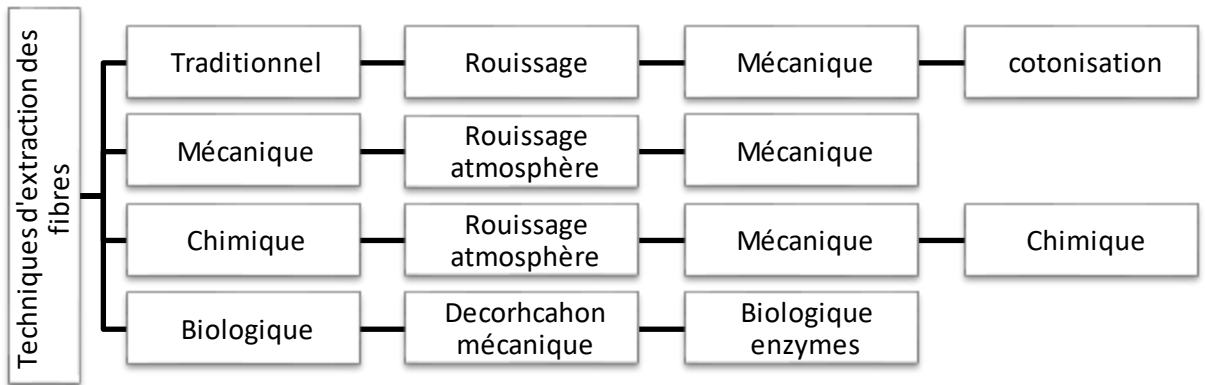


Figure II.19 : Techniques d'extraction des fibres végétales.

### II.5.1.6 Avantages et les inconvénients des fibres végétales

Les avantages de l'emploi des fibres végétales peuvent être résumés en :

- Faible coût,
- Propriétés mécaniques spécifiques,
- Importantes (résistance et rigidité),
- Biodégradabilité,
- Non abrasif pour les outillages,
- Neutre pour l'émission de CO<sub>2</sub>,
- Demande peu d'énergie pour être produite,
- Pas de résidu après incinération,
- Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres,
- Bonne isolation thermique et acoustique,
- Ressource renouvelable.

Ainsi, il est possible que l'emploi de ce type de renforts provoque les inconvénients suivants :

- Absorption d'eau,
- Faible stabilité dimensionnelle,
- Biodégradabilité,
- Faible tenue thermique (200 à 230°C maximum),
- Fibres anisotropes,
- Variation de la qualité en fonction de lieu de croissance, de la météo,
- Pour des applications industrielles, demande d'une gestion adéquate des stocks,
- Renfort discontinu.

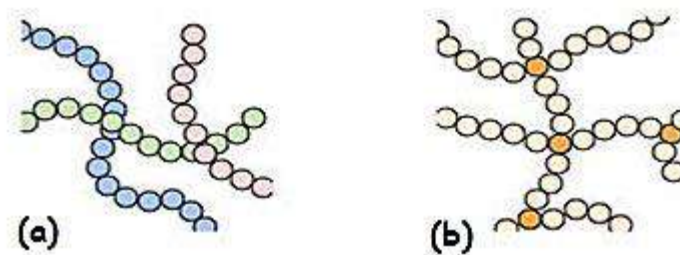
## II.5.2 Matrice

### II.5.2.1 Matrices polymères

Il existe deux types de matrices polymères qui possèdent des propriétés foncièrement différentes et sont employées dans des filières distinctes :

- Les thermoplastiques, qui se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) et que l'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement,
- Les thermodurcissables, qui se présentent sous forme liquide visqueuse et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification.

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals, Figure II.20(a)). Ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes, Figure II.20(b)) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.



**Figure II.20** : Structures moléculaires des polymères.

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Ainsi, nous pouvons faire la comparaison suivante :

- Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres,



- Les thermoplastiques sont plus ductiles que les thermodurcissables, donc résistent mieux à la fissuration,
- Les déchets thermoplastiques sont recyclables, ce qui n'est pas le cas pour les déchets thermodurcissables,
- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, tandis que les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés,
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, les thermodurcissables pas forcément.

D'une manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme car il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables. Parmi les plus courantes, on peut citer les résines polyester, peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications « grande diffusion », et les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications « hautes performances » [29].

### II.5.2.2 Matrices naturelles

La matrice naturelle est composée de polymères d'origine naturelle issus de la transformation chimique de deux ou plusieurs constituants différents, solides et liquides. Les sources d'extraction de la matière solide sont minérales (chaux, argile, enduit), végétales (chimie des sucres ou lipo chimie) ou animales (graisse, os). Les liquides peuvent être des huiles végétales, de l'alcool végétal ou tout simplement de l'eau. Les matrices végétales sont obtenues soit à partir de l'extraction d'un solide végétal (lignine, pectine) mélangé ensuite une solution, soit à partir de l'exsudat naturel des substances naturelles sécrétées par certains végétaux, les conifères essentiellement. Elles sont l'aspect d'un liquide poisseux qui sèche plus ou moins rapidement au contact de l'air. Les industriels se montrent de plus en plus intéressés par l'utilisation de ces matrices naturelles dans la mise en œuvre des éco-composites (biosources) qui représentent une solution d'avenir et durable pour de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, l'ameublement, et l'industrie du sport [16].

**II.6 Conclusion**

Une substance composée est constituée de deux ou plusieurs substances distinctes, à condition que l'un des corps ne fonde pas au contact de l'autre, que leur compatibilité soit élevée et que leurs caractéristiques physiques et chimiques ne diffèrent pas de manière significative. Acquérir des propriétés exceptionnelles que possèdent les matériaux recherchés

Les matériaux composites durent longtemps et nécessitent peu d'entretien. En raison de la grande variété de renforts, de matrices, de formes et de techniques de fabrication disponibles dans les composites, les options de conception des produits composites sont étendues, offrant une liberté de conception et chacune aboutissant à son propre produit composite individuel.

# Chapitre III

Etude

expérimentale

### III.1 Introduction

Ce chapitre illustre les différents travaux expérimentaux réalisés dans cette étude. Il s'agit de la présentation de la matière première utilisée pour la confection du matériau, constitué de renforts issus d'une palme mûre d'un palmier dattier à différentes fractions massiques, et d'une matrice époxyde. Ainsi, il se termine par la caractérisation mécanique des matériaux composites.

### III.2 Présentation et élaborations des matériaux

Dans cette étude, la résine Epoxyde et les fibres de la partie rachis (FPR) ont été utilisés pour préparer des matériaux composites à différentes composition. Ainsi, une technique spécifique a été utilisée pour la préparation des échantillons à fractions massiques diverses de fibres.

Les matériaux utilisés pour l'élaboration des matériaux composites dans cette partie de l'étude sont des renforts végétaux en fibres, extraits de la palme de palmier dattier, mélangés avec une matrice thermodurcissable.

Les matériaux utilisés pour l'élaboration des matériaux composites dans cette partie de l'étude sont des renforts végétaux en fibres extraits de la palme de palmier dattier. En outre, une matrice thermodurcissable.

#### III.2.1 Fibres de rachis

On s'intéresse à l'utilisation des fibres extraites d'une palme mûre de même palmier dattier présenté au Chapitre I. on considère que la partie de rachis (la partie épineuse II et la partie intermédiaire III) et la partie foliotée de la palme. Les fibres de la partie rachis (FPR) sont obtenues par la technique d'extraction mécanique.

Les étapes suivantes présentent le protocole de préparation des fibres courtes utilisées lors de la mise en œuvre des matériaux composites.

### III.2.1.1 Elimination de languine

La partie de rachis obtenue à partir des déchets de palme secs est découpée (Figure III.1).

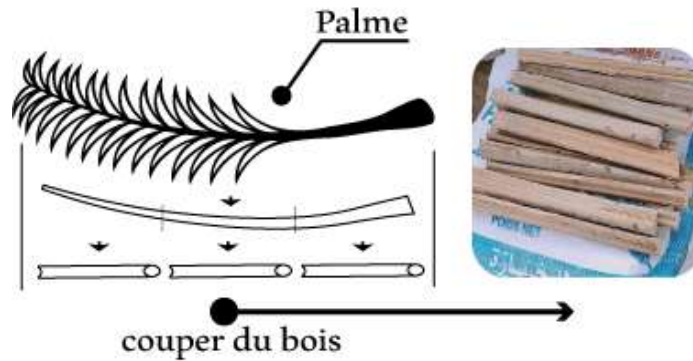


Figure III.1 : Parties de la Palme.

### III.2.1.2 Séchage naturel

Les parties de rachis obtenues par un broyage massique réalisé d'une manière semi-automatique sont soumises à un séchage naturel après broyage.

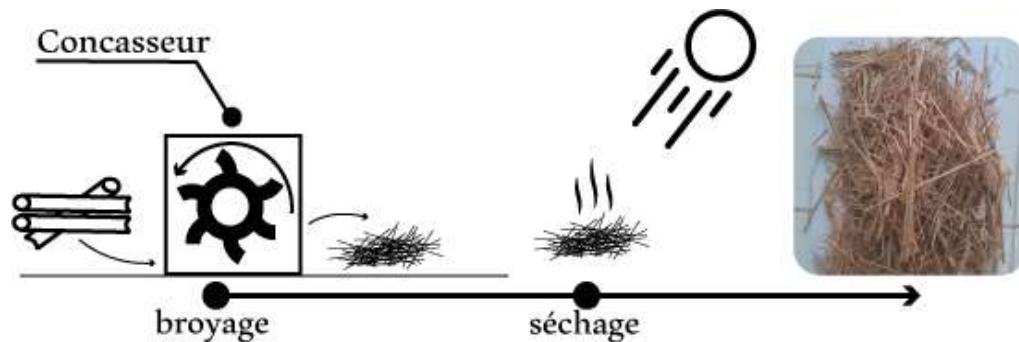


Figure III.2 : Séchage naturel.

### III.2.1.3 Broyage

L'opération de broyage finale est réalisée par un broyeur à café et grains électrique à 300 tr/min pendant 90 secondes.

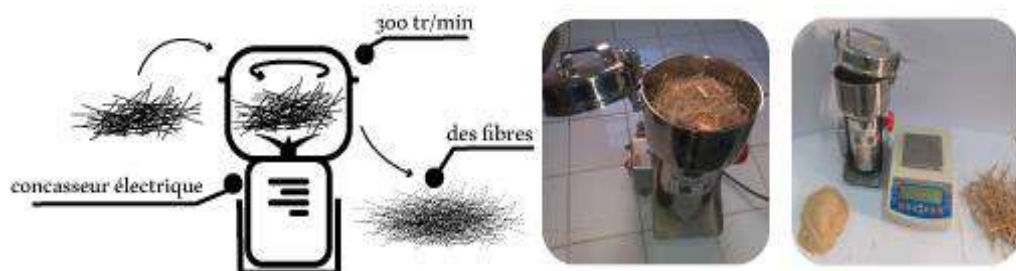


Figure III.3 : Procédé de broyage.

### III.2.1.4 Tamisage

Les broyées sont tamisés dans des séries successives de tamis métalliques (figure III.4) pendant 30 minutes pour obtenir les fibres sélectionnées de taille 0,8 mm.

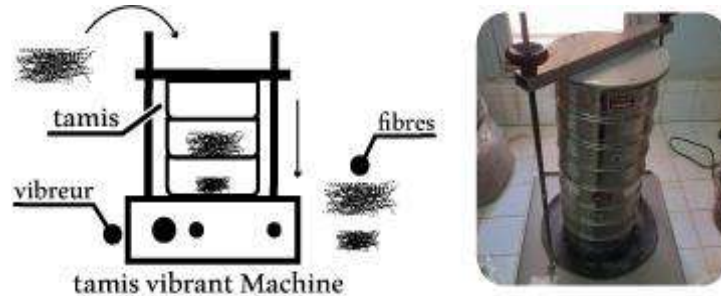


Figure III.4 : Procédé de tamisage.

### III.2.1.5 Lavage

De l'eau chaude est utilisée pour nettoyer les fibres et les remplir d'humidité (figure III.5). Cette étape consiste à enlever la poussière et les impuretés de la masse des fibres.



Figure III.5 : Procédé de lavage.

### III.2.1.6 Séchage électrique

Les fibres sont à nouveau séchées à 110 °C pendant 4.5 heures pour éliminer toute humidité (figure III.6).

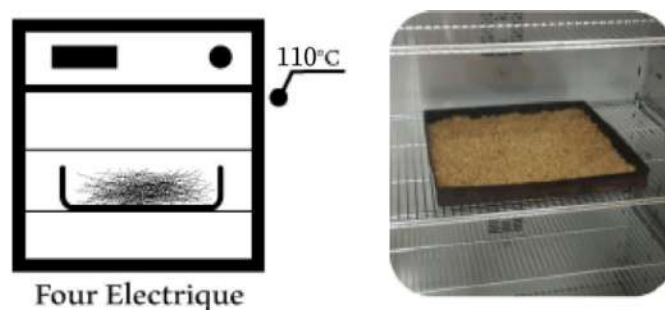


Figure III.6 : Procédé de séchage électrique.

Le poids de l'échantillon des fibres est contrôlé toutes les 30 minutes afin de contrôler le chemin de la diminution de l'humidité. A chaque point de contrôle, le taux d'humidité est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$H\% = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

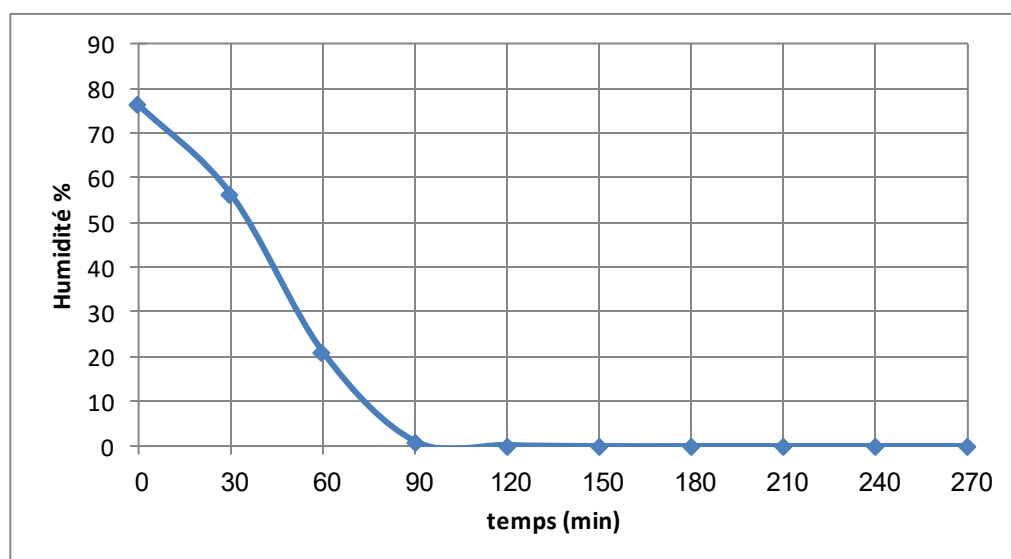
$m_h$  et  $m_s$  : sont les masses initiale et stable, respectivement.

Le tableau III.1 résume les changements de taux d'humidité dans les fibres mesurées à différentes périodes de temps.

**Tableau III.1** : Processus de séchage de fibre.

Temps (min)	Poids (g)	Taux d'humidité	% humidité
0	30.462	0.76268	76.268
30	16.571	0.56375	56.375
60	9.157	0.21054	21.054
90	7.31	0.01108	1.108
120	7.246	0.00234	0.234
150	7.229	0	0
180	7.229	0	0
210	7.229	0	0
240	7.229	0	0
270	7.229	0	0

La teneur en humidité des fibres diminue avec le temps lorsqu'elles sont soumises à la chaleur à l'intérieur du four, étant totalement absente après environ 120 minutes, comme le montre la courbe de la figure (III.7).



**Figure III.7** : Evolution du taux d'humidité.

### III.2.1.7 Fibres courtes

À cette étape, on obtient des fibres sèches de taille spécifiée (0,8 mm) qui seront employées, par la suite, dans l'élaboration des composites utilisés en expérimentations.



Figure III.8 : Fibres courtes.

### III.2.2 Matrice

La matrice thermodurcissable « Époxy Résine Scapa Polymériques 41 » est une résine bi-composant, polymérisable à température ambiante, semi-rigide non chargée. La couleur du mélange est ambre. Sa densité est de  $1.03 \text{ g/cm}^3$ . La préparation de la résine s'effectue à une température ambiante d'environ  $30^\circ\text{C}$  pendant 5 minutes. Certains avantages de cette matrice sont un mélange facile grâce aux rapports résine/durcisseur (50/50) et le temps de polymérisation s'adapte au climat tempéré (figure III.9).

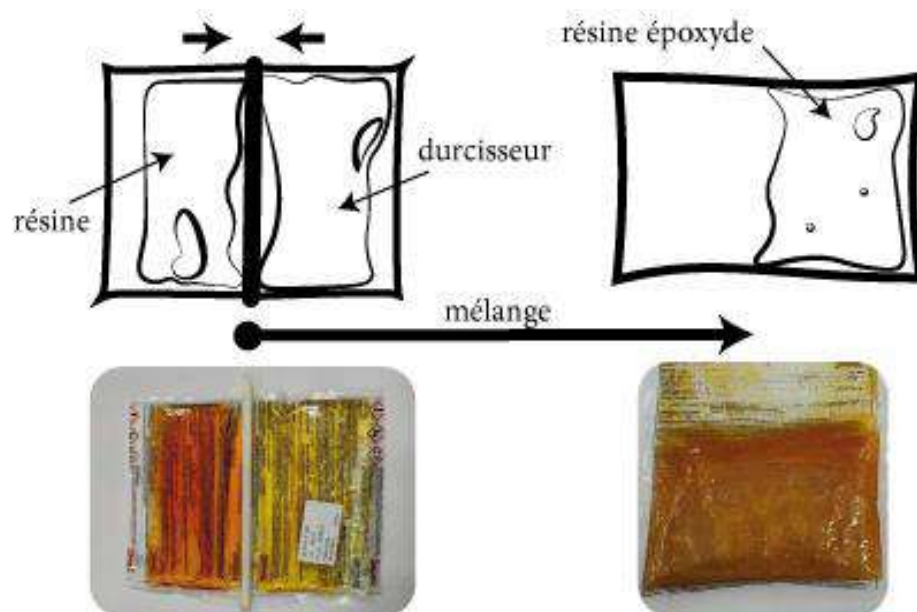


Figure III.9 : Résine Epoxyde avec durcisseur.



### III.2.3 Mise en œuvre du mélange

Le moulage manuel des plaques du mélange Epoxy/Fibre de rachis (EFR) est réalisé par un moule en plastique de dimensions (180x160x4) mm<sup>3</sup>. Soit un volume de 115 cm<sup>3</sup>. La masse de la plaque réalisée par ce moule peut être déterminée par :

$$M_{totale} = \rho \times V_{moul} = 1.03 \times 115 = 118.5 \text{ g} \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, les masses des deux composants ; fibres et matrice sont déterminées, en fonction des la fraction massique, par les relations suivantes :

$$M_{fibres} = \frac{M_{total} \times fraction}{100} \quad (\text{III.3})$$

$$M_{matrice} = M_{totale} - M_{fibres} \quad (\text{III.4})$$

Le tableau III.2 présente les masses des composants pour chacune des fractions massiques utilisées.

**Tableau III.2 :** Massiques des composants de mélange.

Fraction massique	4 %	10 %	16 %
Fibres	4.75g	11.85g	18.96g
Matrice	113.75g	106.65g	99.54g

Les fibres pré-préparées d'une taille de 0,8 mm sont mélangées à une matrice de résine époxy en utilisant les fractions massiques : 4 %, 10 % et 16 %. Le mélange est coulé dans le moule puis soumis à un traitement thermique pour éliminer les bulles d'air en suspension à l'intérieur des plaques. La Figure III.10 présente les différentes étapes de préparation des plaques composites.



Figure III.10 : Protocole de préparation des plaques.

### III.2.4 Préparation des éprouvettes

Après durcissement, les plaques sont démoulées et découpées en éprouvettes de dimensions 160 x 20 x 4 mm, voir la figure III.11.

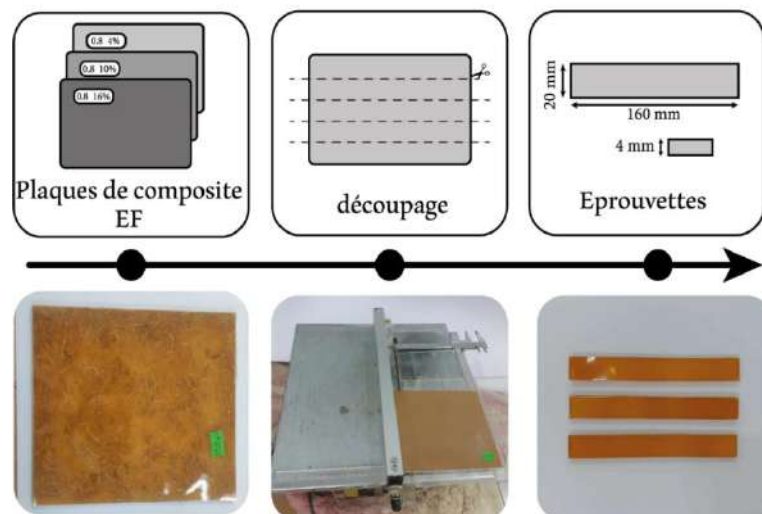


Figure III.11 : Protocole de préparation des éprouvettes.

### III.3 Essai de flexion trois points

La flexion est l'une des sollicitations les plus fréquentes. Le comportement d'un matériau envers cette sollicitation est donc particulièrement important. En effet, l'essai de flexion est utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux de tout type.

### III.3.1 Caractéristiques de la machine

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des fibres, des essais de flexion trois points ont été réalisés à l'aide d'une machine universelle de type « Instron 5969 » pilotée par un ordinateur avec le logiciel « Bluehill3 » (Figure III.12). Les cellules utilisées ont une capacité maximale de 5 kN pour les essais sur les fibres.



Figure III.12 : Flexion trois points.

### III.3.2 Résultats et discussion

Le test de flexion statique s'effectue suivant la norme NF en ISO 178. La vitesse de déplacement, pendant l'essai, est de 5 mm/min (Figure III.12). Les résultats obtenus sont exploités en traçant les courbes charge-déplacement.

Les figures III.13, III.14 et III.15 présentent la courbe charge-déplacement les matériaux testés de 4 %, 10 % et 16 %, respectivement.

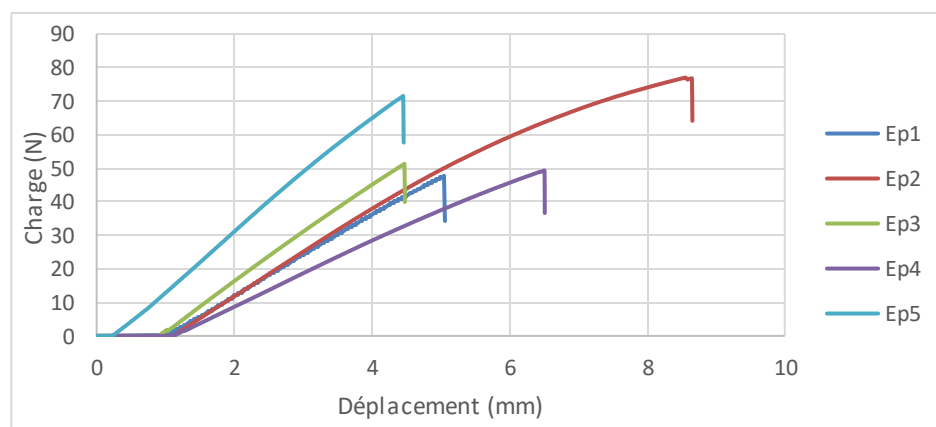
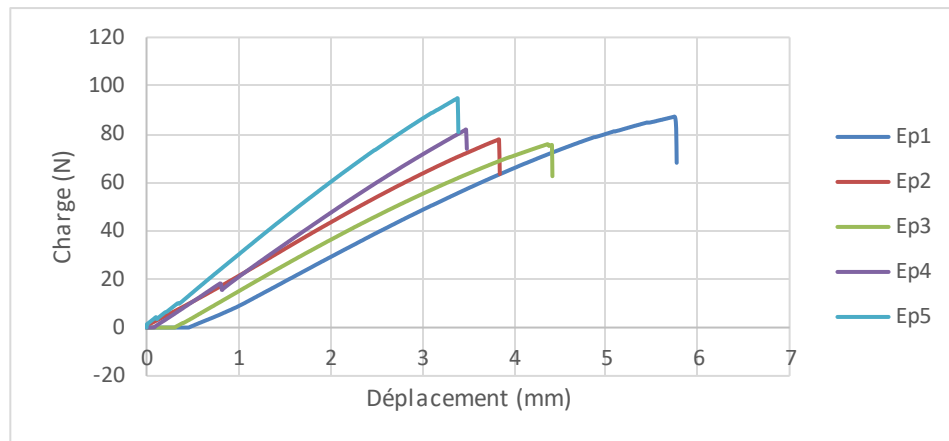
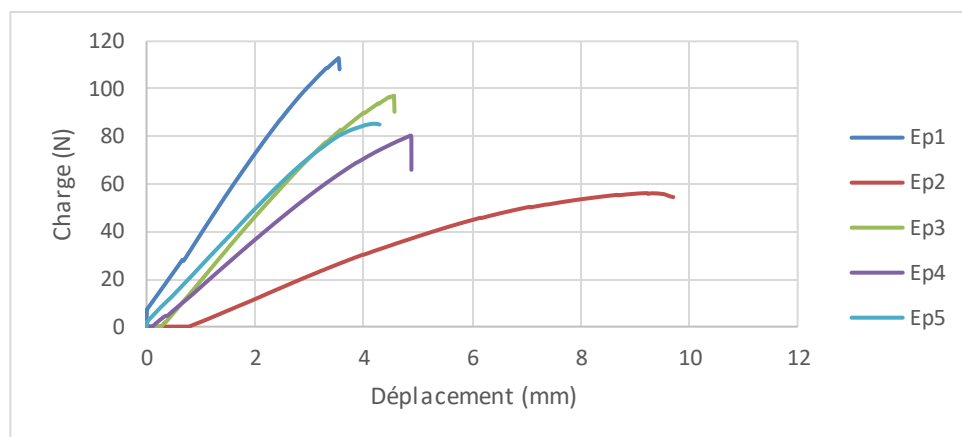


Figure III.13 : Résultats du matériau de fraction 4 %.



**Figure III.14** : Résultats du matériau de fraction 10 %.



**Figure III.15** : Résultats du matériau de fraction 16 %.

Le module d'élasticité est une grandeur intrinsèque d'un matériau définie par le rapport d'une contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte. Il représente, dans la courbe contraintes/déformation, la zone des déformations élastiques.

A partir de la courbe charges/déplacements, le module d'élasticité en flexion peut être déterminé par la relation suivante :

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \delta \quad (\text{III.5})$$

L : porté (distance entre les deux appuis) (mm)

b : épaisseur de l'éprouvette (mm)

h : hauteur de l'éprouvette (mm).

$\delta$  : flèche.

Dans cette relation le rapport  $\delta$  est déterminé à partir de la pente de la partie linéaire de la courbe Charges/Déplacements.

Les tableaux III.3, III.4 et III.5 présentent les résultats obtenus pour les matériaux de fraction massique 4 %, 10 % et 16 %, respectivement.

**Tableau III.3 :** Caractéristique du composite de fraction 4 %.

N° d'éprouvette	L (mm)	B (mm)	h (mm)	$\delta$	$E_f$ (MPa)	
Ep. 1	70	19.283	3.617	8.5396	802.512	
Ep. 2	70	19.25	3.667	9.4136	850.4062	
Ep. 3	70	19.25	3.683	10.354	923.2225	
Ep. 4	70	19.1	3.533	7.1612	729.0472	
Ep. 5	70	19.167	3.367	15.025	1761.023	
					$E_f$ Moy	1013.242
					Écart-type	423.9604

**Tableau III.4 :** Caractéristique du composite de fraction 10 %.

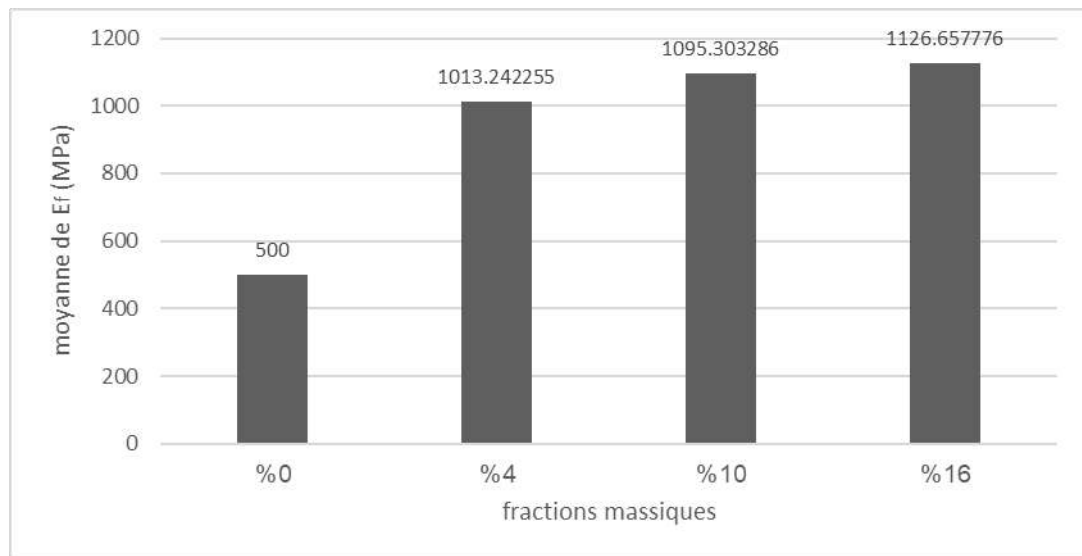
N° d'éprouvette	L (mm)	B (mm)	h (mm)	$\delta$	$E_f$ (MPa)	
Ep.1	70	19.05	4.017	15.841	1100.06	
Ep.2	70	19.217	4.417	21.107	1092.931	
Ep.3	70	19.41	4.467	17.908	887.5806	
Ep.4	70	19.3	4.467	23.589	1175.814	
Ep.5	70	19.05	4.76	29.234	1220.131	
					$E_f$ Moy	1095.303
					Écart-type	127.7115

**Tableau III.5 :** Caractéristique du composite de fraction 16 %.

N° d'éprouvette	L (mm)	B (mm)	h (mm)	$\delta$	$E_f$ (MPa)	
Ep.1	70	19.25	4.85	37.442	1461.966	
Ep.2	70	19.25	3.2	7.3357	997.2293	
Ep.3	70	19.183	4.55	23.065	1094.553	
Ep.4	70	19.08	4.317	18.167	1014.829	
Ep.5	70	19.283	4.633	23.81	1064.712	
					$E_f$	1126.658
					Ecart-type	191.4138

La valeur de l'écart-type indique la présence de défauts présentant des caractéristiques différentes (localisation, taille, sévérités).

La figure III.16 présente les valeurs moyennes du module d'élasticité en flexion des matériaux, de fractions massiques différentes, testés. On remarque à travers cette représentation graphique que plus le pourcentage de la concentration de fibres entrant dans la composition du matériau est élevé, le module d'élasticité en flexion est plus important.



**Figure III.16 :** Comparaison des résultats.

### III.4 Conclusion

Nous pouvons conclure par le constat suivant : l'élasticité du matériau composite à base de fibres de rachis est directement proportionnelle à la fraction massique des renforts impliquées dans la composition. C'est-à-dire que plus la concentration de fibres est élevée, plus l'élasticité du matériau est plus importante, et vice versa, plus le rapport est faible, plus la résistance du matériau et sa résistance à la flexion sont élevées.

### **Conclusion générale**

L'objectif principal de ce mémoire est de valoriser, particulièrement, les fibres naturelles en tant que ressource locale disponible dans la région et d'exploiter, d'une manière générale, les déchets des palmiers dattiers dans le développement des matériaux composites qui peuvent être largement utilisés dans le secteur industriel.

La sélection de ces fibres n'est pas une coïncidence : les régions du sud de l'Algérie disposent de ressources végétales abondantes, mais peuvent être exploitées et possèdent des propriétés physiques et mécaniques assez intéressantes.

Notre étude a été consacrée à exploiter la fibre extraite du palmier dattier et à l'intégrer à une matrice polymère pour former un bio-composite. Notre expérience a été d'étudier l'effet de la fraction massique des fibres au sein de la structure sur le comportement mécanique du matériau. Dans ce but, nous avons testé un matériau composite biosources à base d'une matrice polymère et de fibres de rachis de palmier dattier en se basant sur de différentes fractions massiques. D'après les résultats obtenus par l'essai de flexion trois points sur ces différents échantillons, il a été observé que la valeur du module d'élasticité en flexion étaient améliorées avec l'augmentation de la fraction massique des fibres. Ces constats démontrent l'importance de ce paramètre sur les propriétés mécaniques des matériaux composites.

Enfin, nous pouvons conclure par le fait que cette étude a démontré la possibilité de conception des matériaux biosourcés selon les propriétés désirées.

### Références bibliographiques

- [1] A. Maarouf, I. Layaida. Contribution à l'étude de la diversité génétique de palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera* L.) De la zone de Tolga (Biskra) par le marqueur moléculaire ISSR-PCR. Université Larbi Ben M'hidi, Oum el Bouaghi, 2021.
- [2] A. NENONENE, "Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, FRANCE, 2009.
- [3] A. Rekis. Conservation des ressources phytogénétiques en Algérie. Cas des palmiers dattiers cultivés et sub-spontanés (*Phoenix dactylifera* L.). Université Mohamed Khider Biskra, 2021.
- [4] A. Sbiai, Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Insa de Lyon, 2011.
- [5] CARMA, Glossaire des matériaux composite renforcés de fibres d'origine renouvelable, (Centre d'Animation Régional En Matériaux Avancés), Actualisation décembre, 2006.
- [6] M. Ragoubi, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, France, 2010.
- [7] D. Ben Meddour, Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibre végétale : Application à la plante d'Alfa, Mémoire de magister, université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès.
- [8] D. HAMMICHE, « Synthèse d'un Nouvel Agent de Couplage PVC-g-MA et son Utilisation dans les Composites PVC/Alfa », mémoire de magister, université de BEJAIA, 2010.
- [9] D. SEDAN, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite," thèse de doctorat, Université de Limoges, FRANCE, 2007.
- [10] El Hadji Babacar, L., Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. 2008, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [11] F. LAURANS, A. DEJARDIN, J. PILATE, "Physiologie de la formation des parois de fibres de bois", Composites et Matériaux Avancés, Vol.16, pp.27-39, 2006.
- [12] G. Peyron, guide illustré de formation : cultiver le palmier dattier. Éd. Cirad, 2000
- [13] H. VILLE, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, FRANCE, 2011.



## Références bibliographiques

---

- [14] K. Almi, développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en algérie, universite mohamed khider biskra, 2018
- [15] L. Gendre, "Les grandes familles de matériaux composites," ENS CACHAN, Université de PARIS-SACLAY. France, 2011
- [16] L. Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008.
- [17] L. YAHIAOUI, « caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales DISS », option mécanique applique, université de SETIF, 2011.
- [18] M. RAGOUBI, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, FRANCE, 2010.
- [19] M.A. Mouadaa, évaluation des indicateurs économique de la filière datte dans la région de biskra. Universite mohamed khider biskra, 2019.
- [20] N. Makhloufi, Simulation numérique de la fissuration des composites par fatigue, Mémoire de Magister, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, 2012.
- [21] P. Munier, le palmier dattier-techniques agricoles et productions tropicales. France : maisonneuve et larousse, 1973
- [22] R. Absi, Analyse de la diversité variétale du palmier dattier (phoenix dactylifera L.) : cas des ziban (région de sidi okba). Universite mohamed khider biskra, 2013.
- [23] R. Kueny, "Biocomposites: composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles," thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2013.
- [24] S, Nafti, O.E. Halem. Etude du comportement hygrthermique de nouveaux composites à base de fibres de palmier dattier. Universite kasdi merbah ouargla, 2018
- [25] S. Amirou, "Etude et mise au point de composite à base de la matière fibreuse du palmier dattier Phoenix dactylifera L.," thèse de doctorat, Université de Boumerdes, Algérie, 2015.
- [26] S. Fadlaoui, application de la technique de modélisation de l'architecture du palmier dattier (phoenix dactylifera L.) Pour la caractérisation des cultivars, université mohamed khider-biskra, 2017.
- [27] SCD (service commun de la documentation) Doc'INSA, Elasticité anisotrope et Endommagement des matériaux composites
- [28] Shaymaa Sakin Abdrabo, analytical methods applied to the chemical characterization and classification of palm dates (phoenix dactylifera L.) From elche's palm grove. Université d'alicante. 2013

## Références bibliographiques

---

- [29] T. Djoudi, caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier. Matériaux & techniques, 2018
- [30] T. DJOUDI, M. HECINI, D. SCIDA, Y. DJEBLOUN, et B. GUERIRA, "Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier," Matériaux & Techniques, vol. 106.pp 403. 2018.
- [31] W.H. Barreveld. Date palm products. Food and agriculture organization of the United Nations rome, 1993.
- [32] Y, BOUHADJILA.Z. E. RAHEM, Traitement des fibres de palmier dattier : influence sur les propriétés des composites fibrés, Mémoire, Université BADJI MOKHTARANNABA, 2019.

## ملخص

الهدف من هذا البحث هو صنع مادة صديقة للبيئة من ألياف نخيل التمر ومصفوفة الإيبوكسي. لقد درسنا الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة ذات المصدر الحيوي باستخدام تجارب الانحناء ثلاثي النقاط على عينات مصنوعة بنسب مختلفة من كتلة الألياف. كشفت النتائج أنه كلما زادت نسبة الألياف زاد معامل المرونة وهذا بالاحتفاظ بنفس حجم الألياف.

**الكلمات المفتاحية:** ألياف النخيل، مصفوفة الإيبوكسي، الانحناء ثلاثي النقاط، مادة مركبة، معامل المرونة.

## Résumé

L'objectif de cette recherche est de fabriquer un matériau respectueux de l'environnement à partir de fibres de palmier dattier et de résine époxy. Nous avons étudié les propriétés mécaniques de composites bio-sourcés à l'aide de l'essai de flexion trois points avec différentes fractions massiques de fibres. Les résultats ont révélé que plus le pourcentage des fibres est élevé, plus le module d'élasticité en flexion est important.

**Mots clés :** fibres de palmier, résine époxy, flexion trois points, matériau composite, module d'élasticité.

## Abstract

The aim of this research is to make an environmentally friendly material from date palm fibers and epoxy resin. We have studied the mechanical properties of bio-source composites using three-point bending experiments with different ratios of fiber mass. The obtained results revealed that the higher the fiber percentage, the higher the modulus of elasticity is bigger.

**Key words:** palm fibers, epoxy resin, three-point bending, composite material, modulus of elasticity.