

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AMMAR THELIDJI -LAGHOUAT-



Faculté : De Technologie  
Département : Génie Mécanique  
Option: Maintenance Industrielle

MEMOIRE DE MASTER

*Thème:*

**RÉALISATION ET CARACTÉRISATION DES  
COMPOSITES A FIBRES NATURELLES**

*Présenté par:*

\* ZADEM MOUNIR

\* DJEKAL ABDENNOUR

**Members du jury:**

**Nom et prénom :**

Yousfi Ahmed  
Maati Ahmed  
Rahmani Youcef  
Belaid Salim

**Grade**

Prof  
Prof  
MCB  
MCA

**Qualité :**

Président  
Examineur  
Examineur  
Encadreur

**Promotion : 2023/2024**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier « ALLAH » Tout-Puissant de nous donner*

*le courage et la volonté, la force et la patience de finir ce travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudes et nos reconnaissances à notre encadreur*

*D<sub>r</sub> BELAID SALIM pour la confiance qu'il nous a témoignée, pour ses conseils utiles,*

*sa supervision, ses encouragements, son appui, sa gentillesse, ses suggestions et son*

*aide durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous voulons aussi adresser nos sincères remerciements à D<sub>r</sub> ABDESSAMAD.KHALED*

*pour son précieux aide et son rôle primordial dans la partie expérimentale de ce*

*travail.*

*Nous remercions nos familles pour leurs encouragements et leurs sacrifices envers*

*notre formation et même notre éducation.*

*Au terme de ce mémoire, nous sommes sincèrement agréables d'exprimer ma*

*reconnaissance, à l'égard de tous ceux qui ont contribué, de près de loin, à la*

*réalisation de ce travail.*

*Enfin, un gros merci pour l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de*

*donner une partie de leur précieux temps et d'avoir ainsi partagé de leur savoir.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à, Ma mère,*

*" Tu m'as donné la vie, la tendresse, et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et reconnaissance que je te porte.*

*En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée "*

*Mon père,*

*" L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments pour ta patience illimitée, pour ton encouragement continue et surtout pour l'éducation que tu m'as donnée "*

*Que Allah vous préserve et vous procure longue vie.*

*À mes chers frères et sœurs, sources d'inspiration et de soutien inconditionnel tout au long de mon parcours. Merci pour votre amour, votre encouragement en moi.*

*À Mon grand-père El Hadj Mohammed, qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis Pour sa sagesse, son noble conseil et sa vision de la vie qui a su me la transmettre.*

*Mes chers Amis qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Et toute ma famille.*

**ZADEM MOUNIR**

## *Dédicaces*

*Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté  
et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.*

*Je dédie ce travail*

*à ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène  
aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils,  
pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*A mon père que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa  
surveillance.*

*À mes chers frères et sœurs...*

*À mes amies....*

*À tous ceux que la plume a oublié et que le cœur n'a pas oublié*

*DJEKAL ABDENNOUR*

## LISTE DES FIGURES

	<b>Pages</b>
<i>Figure I.1: Matériaux composite</i>	03
<i>Figure I.2: Constituant d'un matériau composite</i>	03
<i>Figure I.3: principaux matériaux du matrice</i>	04
<i>Figure I.4: principaux matériaux du renfort</i>	05
<i>Figure I.5: Classification des matériaux composites</i>	07
<i>Figure I.6: Une monocouche à fibres longues UD</i>	07
<i>Figure I.7: Structure stratifié du composite</i>	07
<i>Figure I.8: Matériaux sandwichs à âmes creuses</i>	08
<i>Figure I.9: Matériaux sandwichs à âmes pleines</i>	08
<i>Figure I.10: Composants intérieurs d'une voiture fabriqués à partir de composites à base de fibres naturelles</i>	09
<i>Figure I.11: Application des matériaux composites dans la construction</i>	09
<i>Figure I.12: Moulage au contact</i>	09
<i>Figure I.13: Moulage sous vide</i>	10
<i>Figure I.14: Moulage par compression</i>	11
<i>Figure I.15: Moulage par projection de résine</i>	11
<i>Figure I.16: Principe de moulage par centrifugation</i>	11
<i>Figure II.1: Classification des fibres végétales selon l'origine</i>	13
<i>Figure II.2: Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres végétales à l'échelle micrométrique</i>	14
<i>Figure II.3: Représentation de la cellulose</i>	15
<i>Figure II.4: Molécule de cellulose</i>	15
<i>Figure II.5: Structure d'un hémicelluloses</i>	15
<i>Figure II.6: Formules chimiques des principaux constituants de la lignine</i>	16
<i>Figure II.7: Structure d'une chaîne de pectine</i>	16
<i>Figure II.8: Représentation schématique d'une structure d'une fibre végétale</i>	17
<i>Figure II.9: Répartition géographique du palmier dattier dans le monde</i>	20
<i>Figure II.10: Répartition de la superficie</i>	20
<i>Figure II.11: Répartition des palmiers dattier de l'algerie par wilaya</i>	20
<i>Figure II.12: Diagramme schématique du palmier dattier</i>	20
<i>Figure II.13: Parties du palmier</i>	20
<i>Figure II.14: Les Grappes</i>	22
<i>Figure II.15: Déches des palmiers dattiers: a) stipes, b) palmes sèches</i>	23
<i>Figure II.16: Quelques utilisation traditionnelles des déchets du plmier dattier</i>	23
<i>Figure II.17: Noyau de dattes du palmier dattier</i>	24
<i>Figure III.1: Nettoyer les noyaux de dattes à l'eau chaude</i>	26
<i>Figure III.2: Séchage des noyaux de dattes</i>	26
<i>Figure III.3: Broyage de noyau de dattes</i>	27
<i>Figure III.4: Coupe et enlève la couche externe des bras de grappes</i>	27
<i>Figure III.5: Immersion des bras de grappes dans l'eau</i>	27
<i>Figure III.6: Outils de démontage</i>	28

	<b>Pages</b>
<b>Figure III.7:</b> Démontage des bras de grappes des palmiers dattiers	28
<b>Figure III.8:</b> Traitement alcalin des fibres des bras de grappe	29
<b>Figure III.9:</b> Moule en Silicone RTV	31
<b>Figure III.10:</b> Les gants	31
<b>Figure III.11:</b> Balance électronique de précision	32
<b>Figure III.12:</b> Matériels utilisés pour la préparation de la résine polyester	32
<b>Figure III.13:</b> Résine polyester PES O 35N	32
<b>Figure III.14:</b> Four électrique	33
<b>Figure III.15:</b> Pince à creuset	33
<b>Figure III.16:</b> Plaque en verre	33
<b>Figure III.17:</b> Cire de démoulage Tr 104	34
<b>Figure III.18:</b> Mastic d'étanchéité	34
<b>Figure III.19:</b> Tissu d'arrachage	34
<b>Figure III.20:</b> Feutre de drainage	35
<b>Figure III.21:</b> Film de mise sous vide	35
<b>Figure III.22:</b> Pompe à vide	36
<b>Figure III.23:</b> Tronçonneuse	36
<b>Figure III.24:</b> Accessoires pour le moulage sous vide	36
<b>Figure III.25:</b> Démoulage et ponçage des éprouvettes	39
<b>Figure III.26:</b> Séchage des éprouvettes au four électrique	40
<b>Figure III.27:</b> Éprouvettes après séchage	40
<b>Figure III.28:</b> Géométrie des éprouvettes de flexion 3 points	41
<b>Figure III.29:</b> Machine universelle MTS Criterion Model 45	42
<b>Figure III.30:</b> Montage pour l'essai de flexion trois points	42
<b>Figure III.31:</b> Réglage de la portée L	42
<b>Figure III.32:</b> Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme d'une empreinte	43
<b>Figure III.33:</b> duromètre MVK-H2	44
<b>Figure III.34:</b> MEB Tescan Vega3 SBH	44
<b>Figure IV.1:</b> Histogramme de dureté/Éprouvettes_CPN	45
<b>Figure IV.2:</b> Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN _50°C(16h) _90°C(1h)	46
<b>Figure IV.3:</b> Partie linéaire de la courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN _50°C(16h) _90°C(1h)	47
<b>Figure IV.4:</b> Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN _50°C(16h)_90°C(1h)	47
<b>Figure IV.5:</b> Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN _50°C(16h)_70°C(1h)	48
<b>Figure IV.6:</b> Partie linéaire de la courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN_50°C (16h)	49
<b>Figure IV.7:</b> Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN_50°C(16h)_70°C(1h)	49

	<b>Pages</b>
<b>Figure IV.8:</b> Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN _50°C(16h)	50
<b>Figure IV.9:</b> Partie linéaire de courbe force/déplacement pour les éprouvettes CNP_non chauffé	50
<b>Figure IV.10:</b> Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN _non chauffé	51
<b>Figure IV.14:</b> Histogramme de Module d'élasticité en flexion /Eprouvettes_CPN	51
<b>Figure IV.12:</b> Histogramme de contrainte/Eprouvettes_CPN	51
<b>Figure IV.13:</b> Éprouvettes après essai de flexion 3 points	51
<b>Figure IV.14:</b> Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30, 35 et 40 % de renfort (A1, B1 et C1) Chauffé à 90 °C (A2, B2).	52
<b>Figure IV.15:</b> Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30 et 35 % de renfort, Chauffé à 70 °C (A2, B2).	52
<b>Figure IV.16:</b> Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 40 % de renfort, chauffé à a 70°C (C2)	53

## LISTE DES TABLEAUX

	<b>PAGES</b>
<b>Tableau I.1:</b> <i>Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées</i>	05
<b>Tableau I.2:</b> <i>Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales</i>	08
<b>Tableau I.3:</b> <i>Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide</i>	10
<b>Tableau II.1:</b> <i>Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales</i>	14
<b>Tableau II.2:</b> <i>Composition chimique des fibres naturelles en %</i>	16
<b>Tableau II.3:</b> <i>Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales</i>	18
<b>Tableau II.4:</b> <i>Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales</i>	18
<b>Tableau II.5:</b> <i>Composition chimique des déchets du palmier dattier</i>	22
<b>Tableau II.6:</b> <i>Propriétés physiques des déchets de palmiers dattiers</i>	22
<b>Tableau II.7:</b> <i>La quantité d'organes de palmier dattier après entretien annuel</i>	23
<b>Tableau II.8:</b> <i>Les Dix principaux producteurs de datte dans le monde en 2021</i>	24
<b>Tableau II.9:</b> <i>Composition chimique des noyaux de dattes</i>	25
<b>Tableau III.1:</b> <i>Caractéristiques du tissu d'arrachage</i>	34
<b>Tableau III.2:</b> <i>Caractéristiques du film sous vide</i>	35
<b>Tableau III.3:</b> <i>Caractéristiques de la pompe à vide</i>	35
<b>Tableau IV.1:</b> <i>Les résultats de test microdureté des éprouvettes CPN</i>	45
<b>Tableau IV.2:</b> <i>Dimensions des éprouvettes CPN 50°C(16h)_90°C(16h)</i>	46
<b>Tableau IV.3:</b> <i>Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CPN _CPN 50°C(16h)_90°C(16h)</i>	47
<b>Tableau IV.4:</b> <i>Dimensions des éprouvettes CPN 50°C(16h)_70°C(16h)</i>	48
<b>Tableau IV.5:</b> <i>Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CPN _50°C(16h)_70°C(16h)</i>	49
<b>Tableau IV.6:</b> <i>Dimensions des éprouvettes CPN_non chauffé</i>	50
<b>Tableau IV.7:</b> <i>Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CPN_non chauffé</i>	51

## **LISTE DES SYMBOLES**

***$m_c$**  : masse du composite [g].*

***$m_m$**  : masse du matrice [g].*

***$m_f$**  : masse du Renfort [g].*

***$m_r$**  : Masse résine [g].*

***$m_d$**  : La masse durcisseur [g].*

***$R$**  : La Vitesse de sollicitation. [mm/min].*

***$Z$**  : Constante. ( $Z = 0.01$  mm/mm/min).*

***$L$**  : La Portée (Distance entre les appuis).*

***$d$**  : L'Épaisseur de l'éprouvette [mm].*

***$b$**  : Largeur de l'éprouvette [mm].*

***$E_f$**  : Module d'élasticité en flexion [MPa].*

***$m$**  : : Pente de la droite reliant la force au déplacement.*

***$m$**  : Pente de la droite reliant la force au déplacement [N/mm].*

***FND** : farine des noyaux de dattes.*

***CPN** : Composite Polyester Noyaux.*

***UF** : Résines urée-formaldéhyde.*

***PF** : Résines Phénol-formaldéhyde.*

***TH** : Teneur en humidité (%).*

***MS** : Matière sèche (%).*

***MO** : Matière organique*

***PB** : Protéines brutes.*

***CB** : Fibres brutes.*

***STH** : Sucres totaux solubles.*

**MG:** *Sucres totaux.*

**GT:** *Glucides totaux (%MS)*

**PH:** *Acidité*

**AG:** *Sucres libres (%)*

# SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale: .....	1
Chapitre I: Généralité sur les matériaux composites	
I.1 Historique: .....	2
I.2 Définition:.....	2
I.3 Constituants des matériaux composites:.....	3
I.3.1 Matrice: .....	3
I.3.2 Renfort : .....	5
I.3.3 Charges : .....	5
I.3.4 Les additifs :.....	5
I.4 Classification des matériaux composites :.....	6
I.4.1 Classement suivant la nature des constituants : .....	6
I.4.2 Classement suivant la morphologie : .....	6
5 Structure des matériaux composites : .....	7
I.5.1 Les monocouches :.....	7
I.5.2 Les stratifiés : .....	7
I.5.3 Composites sandwichs : .....	8
I.6 Les avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales: .....	8
I.7 Application des matériaux composites :.....	9
I.8 Mise en œuvre des matériaux composites :.....	9
I.8.1 Moulage au contact :.....	9
I. 8.2 Moulage sous vide : .....	10
I.8.3 Moulage par compression : .....	10
I.8.4 Moulage par projection de résine : .....	11
I.9 Conclusion :.....	11

## **Chpitre II: Généralité sur les fibre végétales**

II.1 Historique :	12
II.2 Définition :	12
II.3 Classification des fibres végétales :	12
II.4 Morphologie de la fibre végétale :	13
II.5 Composition chimique d'une fibre végétale:	14
II.6 Structure des fibres végétales :	17
II.7 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales :	17
II.8 Avantages et inconvénients des fibres végétales :	18
II.9 Méthodes d'extraction des fibres végétales :	18
II.9.1 Extraction mécanique :	18
II.9.2 Extraction biologique :	19
II.9.3 Extraction chimique :	19
II.10 Généralité sur les matériaux végétaux du palmier dattier:	19
II.10.1 Introduction :	19
II.10.2 Répartition géographique du palmier dattier :	20
II.10.3 Morphologie du palmier dattier :	21
II.10.4 Composition chimique du palmier :	22
II.10.5 Propriétés physiques des déchets de palmiers dattiers :	22
II.10.6 Les sous-produits du palmier dattier et leurs utilisations :	23
II.10.7 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier :	23
II.11 Généralité sur les matériaux végétaux des noyaux dattiers :	23
II.11.1 Les dattes :	23
II.11.2 Production des dattes :	24
II.11.3 La morphologie du noyau de datte :	24
II.11.4 Composition des noyaux de dattes :	25
II.12 Conclusion.....	25

## **Chapitre III: Matériaux et méthode**

III.1 Introduction :	26
III.2 Préparation des renforts :	26

III.2.1 Préparation de farine des noyaux de dattes (FND): .....	26
La préparation des noyaux comprend les étapes suivantes : .....	26
III.2.2 Extraction des fibres des bras de grappe des palmiers dattiers : .....	27
III.3 Traitement chimique des renforts : .....	28
III.3.1 Traitement alcalin de la FND : .....	28
III.3.2 Traitement alcalin des fibres des bras de grappe des palmiers dattiers : ..	29
III.4 Fabrication des composites : .....	29
III.4.1 Quantité des éléments (Renforts/Matrice) : .....	29
I.4.2 Matériel utilisé : .....	31
III.4.3 Elaboration du éprouvettes: .....	37
III.5 Dimensions des éprouvettes: .....	41
III.6 Réalisation des essais de flexion 3 points: .....	41
III.6.1 Essai de flexion: .....	41
III.6.2 Essai de flexion 3 points selon la norme ASTM D790 : .....	41
III.6.3 Machine d'essai : .....	41
III.6.4 Calcul du module d'élasticité en flexion : .....	43
III.7 Micro dureté: .....	43
III.8 La microscopie électronique à balayage (MEB): .....	44

#### **Chapitre IV: résultats et discussions**

IV.1 Essais de dureté : .....	45
IV.2 Courbes de flexion des éprouvettes CPN: .....	46
IV.3 Caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB) : .....	52
IV.4 Conclusion générale : .....	55

## ملخص:

للد من استخدام الألياف الاصطناعية، وخاصة ألياف الزجاج والكربون، التي تسبب مشاكل عديدة، وخاصة البيئية، اقترحنا مواد مركبة مصنوعة من ألياف طبيعية قابلة للتحلل، وهي غير مكلفة وخفيفة الوزن. تهدف هذه الدراسة إلى تصميم مادة مركبة. وتتكون المادة المركبة من مادة راتنجية معززة بألياف نباتية على شكل خيوط من سعف النخيل أو مسحوق نواة التمر المعالج كيميائياً تحت ظروف محددة مع هيدروكسيد الصوديوم (NaOH). أجريت سلسلة من التحاليل والاختبارات على المواد المطورة، وأظهرت النتائج المسجلة خواص ميكانيكية أفضل للمركبات غير المسخنة وزيادة في الصلابة مع انخفاض في معامل يونغ (E) وخشونة المواد المركبة. وبالتالي، يمكن استخدام هذه المادة في مجالات مختلفة، بما في ذلك تغليف السيارات... 1

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة، النخيل، دقيق نواة التمر، هيدروكسيد الصوديوم.

## Résumé:

Afin de réduire l'utilisation de fibres synthétiques, notamment de fibres de verre et de carbone, qui posent de nombreux problèmes, notamment environnementaux, nous avons proposé des matériaux composites fabriqués à partir de fibres naturelles biodégradables, peu coûteuses et légères. Cette étude vise à concevoir un matériau composite. Matériau composite constitué d'une matrice de résine (résine) renforcée de fibres végétales sous forme de fils issus de branches de palmier ou de poudre de noyau de dattier traité chimiquement sous certaines conditions avec hydroxyde de sodium (NaOH). Un ensemble d'analyses et de tests ont été réalisés sur les matériaux développés, et les résultats enregistrés ont montré des meilleures propriétés mécaniques des composites non chauffés et une augmentation de la dureté lors de la diminution du module de Young E et de la rugosité des matériaux composites. Ainsi, ce matériau peut être utilisé dans de nombreux domaines, notamment l'emballage automobile...

**Mots clés:** Matériaux composites, Palme, farine de noyaux de dattes, Hydroxyde de sodium.

## Abstract:

To reduce the use of synthetic fibers, particularly glass and carbon fibers, which pose numerous problems, especially environmental ones, we have proposed composite materials made from natural, biodegradable fibers that are inexpensive and lightweight. This study aims to design a composite material. The composite material consists of a resin matrix reinforced with plant fibers in the form of threads from palm branches or chemically treated date pit powder under specific conditions with sodium hydroxide (NaOH). A series of analyses and tests were conducted on the developed materials, and the recorded results showed better mechanical properties of the non-heated composites and an increase in hardness with a decrease in Young's modulus (E) and the roughness of the composite materials. Thus, this material can be used in various fields, including automotive packaging...

**Keywords:** Composite materials, Palm, Date pit powder, Sodium hydroxide.



***INTRODUCTION GÉNÉRALE***

## **Introduction générale:**

Le développement de nouveaux matériaux est un domaine en évolution rapide, motivé par la demande croissante des utilisateurs pour des solutions plus efficaces, plus rentables et plus durables. Les chercheurs optimisent les solutions existantes et explorent les « nouveaux matériaux », qui sont des combinaisons innovantes de matériaux existants tels que les composites, pour créer de nouvelles propriétés et améliorer les applications dans divers domaines, notamment l'aviation, l'automobile, la construction et champ.

L'intégration de matériaux écologiques est devenue une nécessité incontestable. Bien que les fibres synthétiques dominent largement les produits grand public, leur utilisation pose de plus en plus de problèmes environnementaux, notamment en raison de la consommation énergétique élevée et des émissions de composés nocifs. Ainsi, le recours aux fibres naturelles apparaît comme une alternative plus respectueuse de l'environnement. En substituant les fibres synthétiques par des fibres biodégradables issues de ressources renouvelables, on contribue activement à la préservation de notre environnement.

L'utilisation croissante des fibres végétales est devenue un phénomène notable. Leurs propriétés spécifiques attrayantes, leur faible densité et leur biodégradabilité offrent des perspectives prometteuses. Au cours des dernières décennies, ces nouveaux matériaux ont connu une expansion significative. De nombreuses recherches ont mis en lumière à la fois les avantages et les limitations inhérents à ces matériaux. Malgré le progrès dans le développement des composites à base de fibres naturelles, plusieurs défis persistent notamment l'effet du chauffage des composites pour une meilleure réticulation, et l'efficacité de cette opération. Cette incompatibilité découle de la nature hydrophile des fibres végétales en contraste avec le caractère plus hydrophobe de la matrice. Ces questions constituent une difficulté majeure, car l'interface et la réticulation sont cruciales pour le transfert des charges entre les renforts et la matrice. En conséquence, l'amélioration de la qualité de cette interface fibre/matrice reste au cœur des activités de recherche dans le domaine des composites à base de fibres naturelles.

Notre mémoire se divise en deux parties distinctes, présentées comme suit :

### ➤ **Partie Théorique**

1. Généralités sur les matériaux composites végétaux.
2. Étude bibliographique sur les fibres végétales, en se concentrant spécifiquement sur palmier et noyaux dattier.

### ➤ **Partie Expérimentale**

1. Traitement chimique des fibres du palmier et noyaux dattier.
2. Description des pourcentages des éléments du matériau, et de l'appareillage utilisé.
3. Elaborations des composites.
4. Réalisation de l'essai de micro dureté.
5. Réalisation de l'essai de flexion à trois points.
6. Présentation des résultats expérimentaux obtenus par les essais de flexion 3 points.
7. Le microscopie électronique à balayage (MEB).



*CHAPITRE I :*  
*GÉNÉRALITÉ SUR LES MATÉRIAUX*  
*COMPOSITES*

## I.1 Historique:

Les matériaux composites végétaux ont une histoire qui remonte à plusieurs siècles, bien que leur utilisation à grande échelle dans les applications industrielles soit un développement plus récent. Voici un aperçu de l'évolution historique de ces matériaux :

### Âge médiéval:

Pendant le Moyen Âge, les matériaux composites d'origine végétale étaient largement utilisés dans la construction navale. Par exemple, les Vikings utilisaient des techniques de construction innovantes pour fabriquer des navires solides et légers en assemblant des planchées de fibres végétales tissées, comme le lin et le chanvre. Ces navires permettaient aux Vikings de parcourir de longues distances et jouaient un rôle crucial dans leurs explorations et leurs raids. La Mésopotamie (ce qui est aujourd'hui l'Irak et une partie de la Syrie) a été l'une des premières civilisations à utiliser largement les matériaux naturels composites. Cette région a une longue histoire d'innovation dans l'utilisation innovante des ressources naturelles pour créer des structures et des outils qui répondent aux besoins de la communauté. Par exemple, ils utilisaient des roseaux et d'autres plantes locales pour construire des maisons et des structures publiques.

### Époque moderne:

Au cours de la révolution industrielle, l'utilisation des matériaux composites végétaux s'est étendue à de nouveaux domaines. Par exemple, au 19<sup>e</sup> siècle, le rotin, une fibre végétale flexible, était largement utilisé dans la fabrication de meubles tels que des chaises et des paniers. Les artisans utilisaient souvent une combinaison de rotin et de bois pour créer d'élégants meubles durables, appréciés pour leur légèreté et leur résistance.

### 20<sup>e</sup> siècle:

Durant le 20<sup>e</sup> siècle, l'industrie automobile a été un pionnier dans l'utilisation des matériaux composites végétaux, dans les années 1930, Henry Ford a exploré l'utilisation de matériaux naturels tels que la fibre de soja et la fibre de chanvre dans la fabrication de pièces automobiles, y compris des panneaux de carrosserie et des intérieurs.

## I.2 Définition:

Les matériaux composites sont constitués de l'assemblage d'au moins deux constituants et se distinguent par leurs propriétés remarquables qui surpassent celles de leurs composants individuels. Une matrice, telle qu'une résine, assure le maintien et le transfert de charges, tandis que des renforts fibreux, comme le carbone ou la fibre végétale, apportent résistance et rigidité. Cette synergie donne naissance à des matériaux légers, résistants, flexibles et durables, utilisés dans des domaines variés comme l'aéronautique, l'automobile, la construction. [1]

Les matériaux composites végétaux sont des matériaux fabriqués à partir de combinaisons de fibres végétales naturelles, telles que le palme, le bambou, le lin et d'autres fibres végétales, avec des polymères ou des résines d'origine naturelle ou synthétique. Ces matériaux offrent une alternative écologique aux matériaux traditionnels à base de pétrole, car ils sont dérivés de ressources renouvelables.

Les fibres végétales sont souvent utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Les résines utilisées peuvent être des polymères naturels tels que la lignine ou des polymères synthétiques comme le polyester ou l'époxy.

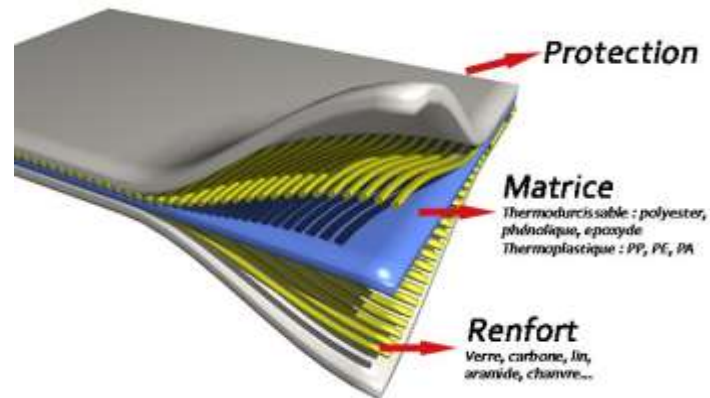


Figure I.1: Éléments du matériau composite [2]

### I.3 Constituants des matériaux composites :

Généralement, les principaux composants des matériaux composites sont:

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

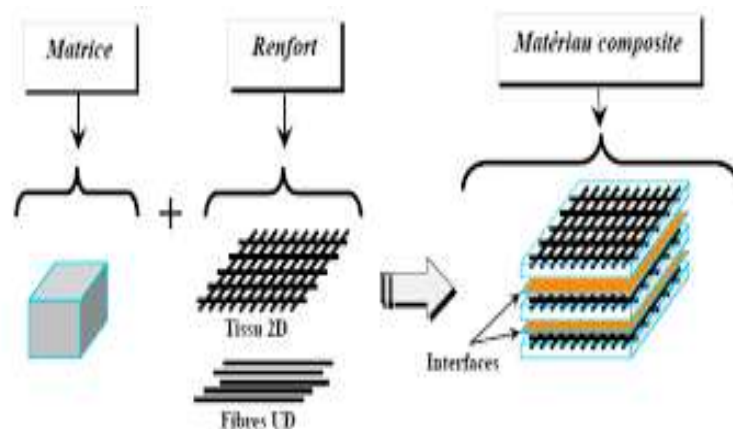
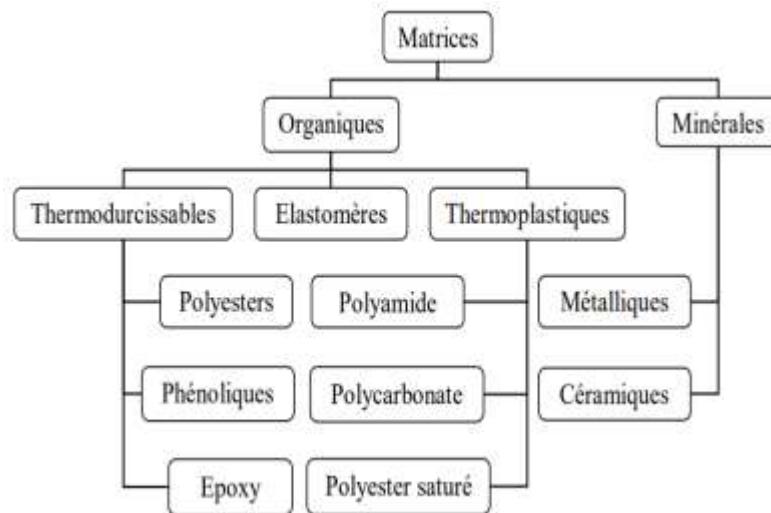


Figure I.2: Constituant d'un matériau composite. [2]

#### ➤ I.3.1 Matrice:

Généralement constituée de résine polymère, elle constitue un élément important des matériaux composites. Il assure des adhésions entre les fibres de renforcement, protège les fibres de renforcement des influences extérieures et transfère efficacement les contraintes. La matrice doit présenter une certaine déformabilité et compatibilité avec les fibres pour assurer une adhésion optimale. Le choix de la matrice polymère appropriée dépend des propriétés souhaitées du composite et des conditions d'utilisation.



**Figure I.3:** Principaux matériaux de la matrice [3]

Il y a deux principales catégories de résines polymères : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Ces deux types de résine peuvent être moulés ou façonnés pour produire soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

#### a) Les résines thermoplastiques:

Ce sont les polymères les plus largement fabriqués en raison de leur faible coût. Elles fondent lorsqu'elles sont chauffées et reprennent leur forme solide en refroidissant, ce qui les rend recyclables, solubles et réutilisables à de multiples reprises. Cependant, elles ne sont pas biodégradables et peuvent présenter des propriétés mécaniques moins robustes.

Effectivement, les thermoplastiques ne sont généralement pas idéaux pour le renforcement des fibres en raison de leur viscosité élevée à l'état liquide, ce qui entrave leur capacité à imprégner correctement les fibres. De plus, la production de matériaux composites avec des thermoplastiques nécessite habituellement des conditions de pression et de température élevées pour assurer une liaison adéquate entre les composants. [4]

#### b) Les résines thermodurcissables:

Sont à l'état liquide avec de très faibles viscosités, contenant des monomères qui se transforment en polymères réticulés lorsqu'elles durcissent. Cette transformation résulte d'une réaction chimique unique qui se produit à température ambiante, conduisant à un produit final solide, rigide et infusible. Contrairement aux résines thermoplastiques, elles ne fondent pas sous l'effet de la chaleur, mais finissent par se désintégrer. En conséquence, les résines thermodurcissables présentent généralement des propriétés mécaniques et thermomécaniques supérieures à celles des résines thermoplastiques.

Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, etc.) et les résines époxydes sont parmi les principales résines thermodurcissables utilisées dans la fabrication de matériaux composites.

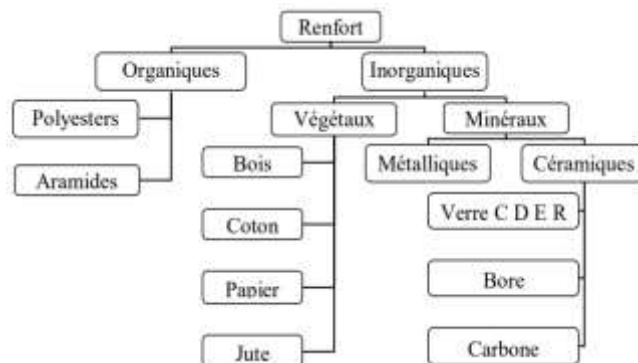
**Tableau I.1:** Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées [4, 5]

Résine	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	E(Gpa)	$\sigma$ (Mpa)	Module D'allongement Rupture (%)	T <sub>max</sub> (°C)	V poisson
UF	1.2-1.5	6-10	40-80	-	140	-
PF	1.1-1.3	3-4	35-60	-	80-300	0.36
Polyester	1.2	2.9- 4	50- 80	2- 3	60-200	0.4
Epoxyde	1.1- 1.4	3-4.5	50 -130	3- 8	90-200	0.4
Phénolique	1.3	3.8- 7	50-70	1 -1.5	120-200	0.4
Uréthane	1.1	0.7-7	30	-	100	-
Polyamide	1.1 -1.5	4- 20	30-40	<1	250-300	-

### ➤ I.3.2 Renfort:

Le renfort constitue le squelette des composites, leur conférant des propriétés mécaniques accrues (rigidité, résistance à la rupture, dureté) et améliorant leurs propriétés physiques (comportement au feu, tenue en température).

Le renfort se décline sous diverses formes (fibres courtes, particules, fibres continues) et origines (animales, végétales, synthétiques). Son choix judicieux est crucial pour optimiser les performances du composite et répondre aux exigences de l'application finale. [5]

**Figure I.4:** Principaux matériaux du renfort [3]

### ➤ I.3.3 Charges:

L'ajout de charges a pour objectif d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine ou de réduire les coûts tout en conservant les performances. Ces charges sont généralement des microbilles ou des particules sous forme de poudre. Elles peuvent être constituées de divers matériaux tels que des fibres de verre, de carbone, des charges minérales comme le talc ou la silice, ou encore des charges organiques.

L'incorporation de ces charges renforce la résine en augmentant sa résistance mécanique, sa rigidité, sa résistance à l'usure, ou encore en améliorant d'autres propriétés spécifiques, selon les besoins de l'application.

### ➤ I.3.4 Les additifs:

Les additifs sont des substances chimiques souvent liquides ou en poudre qui sont en général introduits avant ou pendant la mise en forme d'un matériau pour apporter ou améliorer des propriétés spécifiques.

## I.4 Classification des matériaux composites:

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

➤ I.4.1 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.

➤ I.4.2 Classement suivant la morphologie:

Classé par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes:

● **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'une 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.

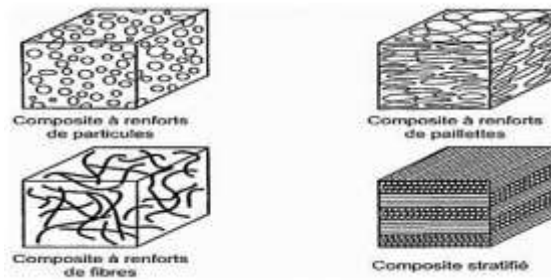


Figure 1.5: Classification des matériaux composites [6]

## I.5 Structure des matériaux composites:

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

### ➤ I.5.1 Les monocouches:

Constituent l'élément fondamental de la structure composite. Leur variété se distingue principalement par la forme du renfort : qu'il s'agisse de fibres longues, unidirectionnelles ou réparties aléatoirement, de fibres tissées ou de fibres courtes.



Figure 1.6: Une monocouche à fibres longues UD [7]

### ➤ I.5.2 Les stratifiés:

Sont formés de couches composites successives appelées plis. Ces plis composites peuvent être composés du même type de renfort et orientés dans des directions différentes, ou bien de renforts différents dans le cas d'un stratifié hybride.

Le renfort de chaque pli du stratifié est caractérisé par sa nature (carbone, lin, verre, etc.) et sa présentation (fils, mat, tissu). Les architectures des stratifiés, en termes de disposition des couches, sont également très variées, incluant l'orientation des renforts, les empilements symétriques ou antisymétriques. Le choix du renfort et de l'architecture du stratifié dépendra donc de l'application du matériau composite, en l'adaptant au mieux aux contraintes imposées.

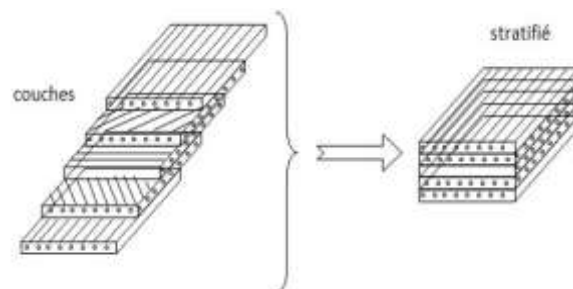


Figure 1.7: Structure stratifié du composite [8]

➤ I.5.3 Composites sandwichs:

Également connues sous le nom de structures sandwich, elles se caractérisent par leur structure multicouche composée de deux peaux rigides et résistantes séparées par un noyau léger. Cette configuration unique offre une combinaison exceptionnelle de propriétés qui les rend précieux dans une large gamme d'applications.

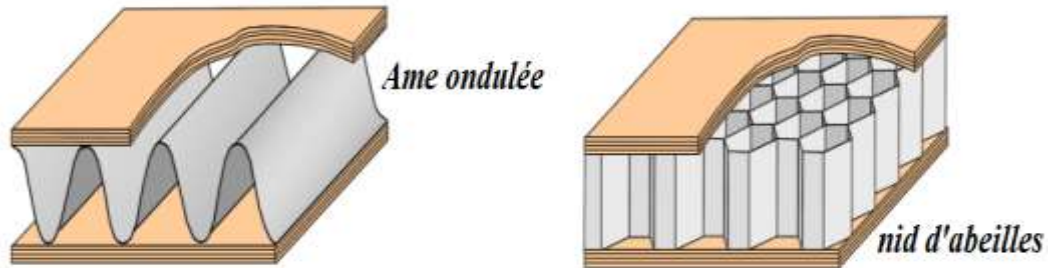


Figure I.8: Matériaux sandwichs à âmes creuses [9]

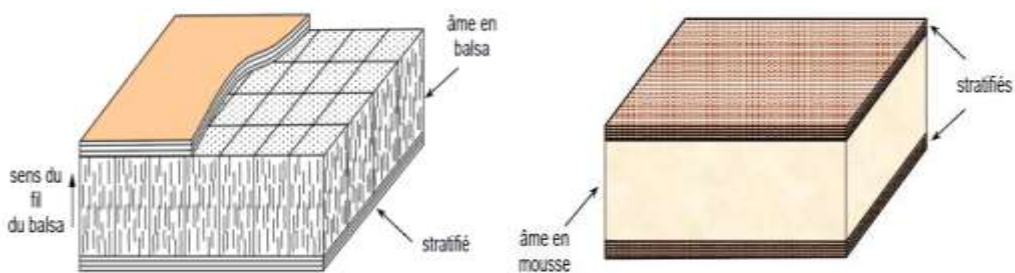


Figure I.9: Matériaux sandwichs à âmes pleines [9]

Afin que les matériaux sandwich puissent remplir efficacement leur fonction, il est essentiel d'assurer une adhérence parfaite entre l'âme et les peaux, de manière à répartir uniformément les contraintes entre eux.

**I.6 Les avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales:**

Tableau I.2: Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales [10]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leur légèreté</li> <li>• Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue</li> <li>• Leur insensibilité aux produits comme les graisses les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.</li> <li>• Leur possibilité de prendre plusieurs formes d'intégrer des accessoires et de permettre la réduction du br</li> <li>• Leur insensibilité aux produits comme les graisses les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.</li> <li>• Leur possibilité de prendre plusieurs formes d'intégrer des accessoires et de permettre la réduction du bruit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.</li> <li>• La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.</li> <li>• Faible stabilité dimensionnelle.</li> <li>• Absorption de l'eau.</li> </ul>

## I.7 Application des matériaux composites:

Les matériaux composites, grâce à leurs propriétés remarquables, ont trouvé une place prépondérante dans une multitude de domaines, en particulier dans les secteurs les plus exigeants en termes de performance et d'innovation.

- Aérospatial
- Aéronautique
- La construction
- Automobile



*Figure I.10: Composants intérieurs d'une voiture fabriqués à partir de composites à base de fibres naturelles*

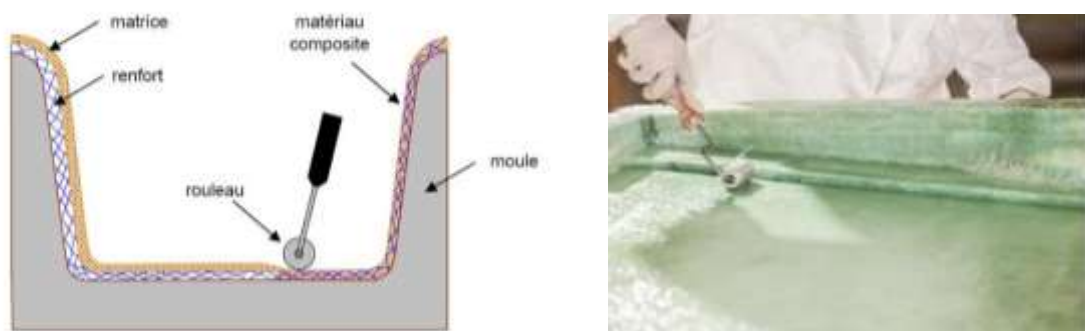


*Figure I.11: Application des matériaux composites dans la domine de construction*

## I.8 Mise en œuvre des matériaux composites:

### ➤ I.8.1 Moulage au contact:

C'est la méthode la plus simple qui ne demande pas beaucoup d'équipements. On utilise des moules sur lesquels on dépose successivement : un agent de démoulage, une couche de surface et des couches successives, des renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisée à la température ambiante.[11]



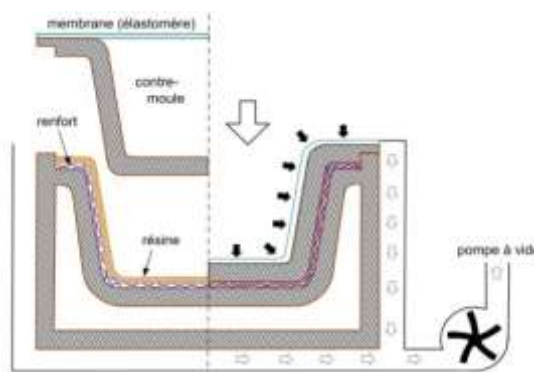
*Figure I.12: Moulage au contact [12]*

➤ I. 8.2 Moulage sous vide:

Cette méthode dite du sac permet l'obtention de plaques avec un taux minimum de résine. Elle implique l'utilisation à la fois du vide et de la pression atmosphérique. Après le revêtement du moule avec un agent de démoulage et une fine couche de résine sur la surface, le renfort est placé sur un moule rigide et la matrice est coulée. Ce contre-moule, recouvert d'un film (feuille de nylon) pour assurer l'étanchéité.

La pompe à vide crée un vide qui permet à la résine de se diffuser dans les renforts fibreux et les cavités. Cette méthode pourrait être combinée avec un système de chauffage qui servirait à polymériser la résine plus rapidement.

C'est un procédé de meilleure qualité que le moulage par contact, car il permet d'obtenir des plaques sans défaut de produits composites aux formes complexes. [11]



*Figure I.13: Moulage sous vide [12]*

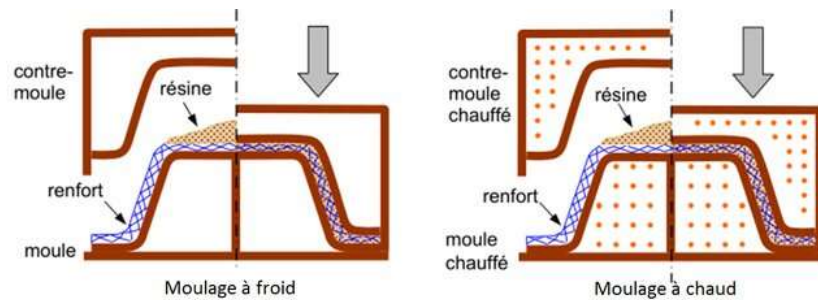
**Tableau I.3:** Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Deux faces lisses, éventuellement gel côtés.</li> <li>● Qualité constante</li> <li>● Bonne cadence de production</li> <li>● Nécessite peu de surface</li> <li>● Investissement très modéré (moule, pompes à vide)</li> <li>● Bonnes conditions de travail et d'hygiène.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Possibilité de forme plus réduite qu'à contact</li> <li>● Mise au point parfois difficile.</li> </ul>

➤ I.8.3 Moulage par compression:

C'est l'un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. La mise en forme par compression consiste à disposer dans un moule les composants prés imprégnés. Sous l'action du coulisseau de la pression, le contre-moule applique une pression sur le volume de matière qui se trouve à l'intérieur du moule.

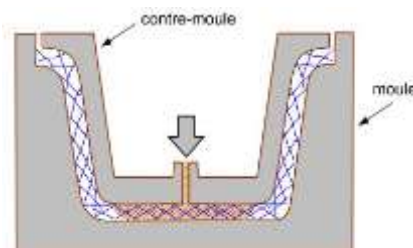
Le renfort et la matrice se déplacent afin de remplir la cavité de l'outillage. Souvent, la pression exercée est de l'ordre de 20 à 40 bars. Une polymérisation partielle est effectuée à l'intérieur du moule et la pièce est ensuite retirée afin que la polymérisation puisse continuer à l'extérieur du moule. Ceci permet à l'outillage d'accueillir plus rapidement une nouvelle pièce à fabriquer. [11]



**Figure I.14:** Moulage par compression.[12]

➤ I.8.4 Moulage par projection de résine:

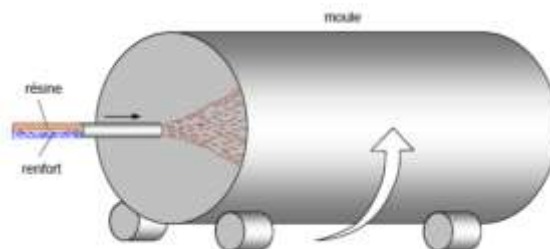
Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibres (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression.



**Figure I.15:** Moulage par projection de résine

➤ I.8.5 Moulage par centrifugation:

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.



**Figure I.16:** Principe de moulage par centrifugation [12]

## I.9 Conclusion:

Les matériaux composites se distinguent par une multitude d'avantages qui les rendent supérieurs aux matériaux traditionnels dans de nombreux domaines d'application. Parmi ces atouts, on peut citer leur légèreté, leur résistance mécanique et chimique élevée, leur facilité d'entretien, leur liberté de conception, leur contribution à l'amélioration de la sécurité, leurs propriétés d'isolation thermique et phonique. Ces caractéristiques font des matériaux composites un choix idéal pour une large gamme d'applications.

Avec le développement continu des techniques de fabrication, leur utilisation devrait s'accroître à l'avenir.



*CHAPITRE II:*  
*GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES*  
*VÉGÉTALES*

## II.1 Historique:

L'utilisation des fibres végétales dans les matériaux composites remonte à des siècles, avec des civilisations anciennes utilisant déjà des fibres comme le lin, le chanvre et la jute pour renforcer des matériaux tels que la boue. Au Moyen Âge, le lin et le chanvre étaient également utilisés pour fabriquer des armures. Cependant, l'avènement des fibres synthétiques au XXe siècle, offrant des propriétés mécaniques supérieures, a dominé le marché des composites. Malgré cela, les préoccupations croissantes concernant l'impact environnemental ont ravivé l'intérêt pour les fibres végétales. Depuis les années 1970, des recherches ont été menées sur leur utilisation dans les composites, aboutissant à des avancées technologiques permettant le développement de composites à base de fibres végétales plus performants et durables. [13]

Aujourd'hui, ces fibres sont largement utilisées dans diverses applications, marquant une tendance croissante vers des matériaux composites plus respectueux de l'environnement.

## II.2 Définition:

Sont des éléments structurels ou tissulaires dérivés des plantes sont composés de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, dont les proportions dépendent fortement de l'espèce, de l'âge et de l'organe de la plante, et sont généralement extraits de parties telles que les tiges, les feuilles et les fruits. Ces fibres sont souvent utilisées dans divers domaines tels que le textile, la papeterie, la construction et les matériaux composites. Parmi les fibres végétales, cette étude s'est intéressée à la fibre de palmier et au palmier dattier, largement cultivés dans la région sud-est de l'Algérie. [14]

## II.3 Classification des fibres végétales:

### ➤ Selon leur teneur en (cellulose et hémicellulose) et en lignine:

Les fibres ligneuses, comme le bois d'œuvre et les résidus de l'industrie du bois, se caractérisent par leur teneur élevée en hémicellulose (cellulose et hémicellulose), ainsi qu'en lignine, les rendant dures et rigides. En revanche, les fibres non ligneuses, provenant souvent de végétaux annuels comme le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin, sont plus douces et souples, avec une teneur relativement moins élevée en lignine. [15]

### ➤ Suivant leur longueur:

Les fibres végétales se répartissent généralement en deux grandes catégories. D'une part, les longues fibres, également appelées libériennes, sont issues des tiges et des écorces de plantes annuelles à la fois molles et flexibles, telles que le lin, le chanvre, le jute et la ramie.

D'autre part, les courtes fibres, provenant des feuilles ou des troncs, sont habituellement plus dures en raison de leur richesse en lignine. Parmi ces courtes fibres, on retrouve des exemples comme le sisal, l'abaca et la fibre de coco. [16]

### ➤ Selon l'origine:

Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues:

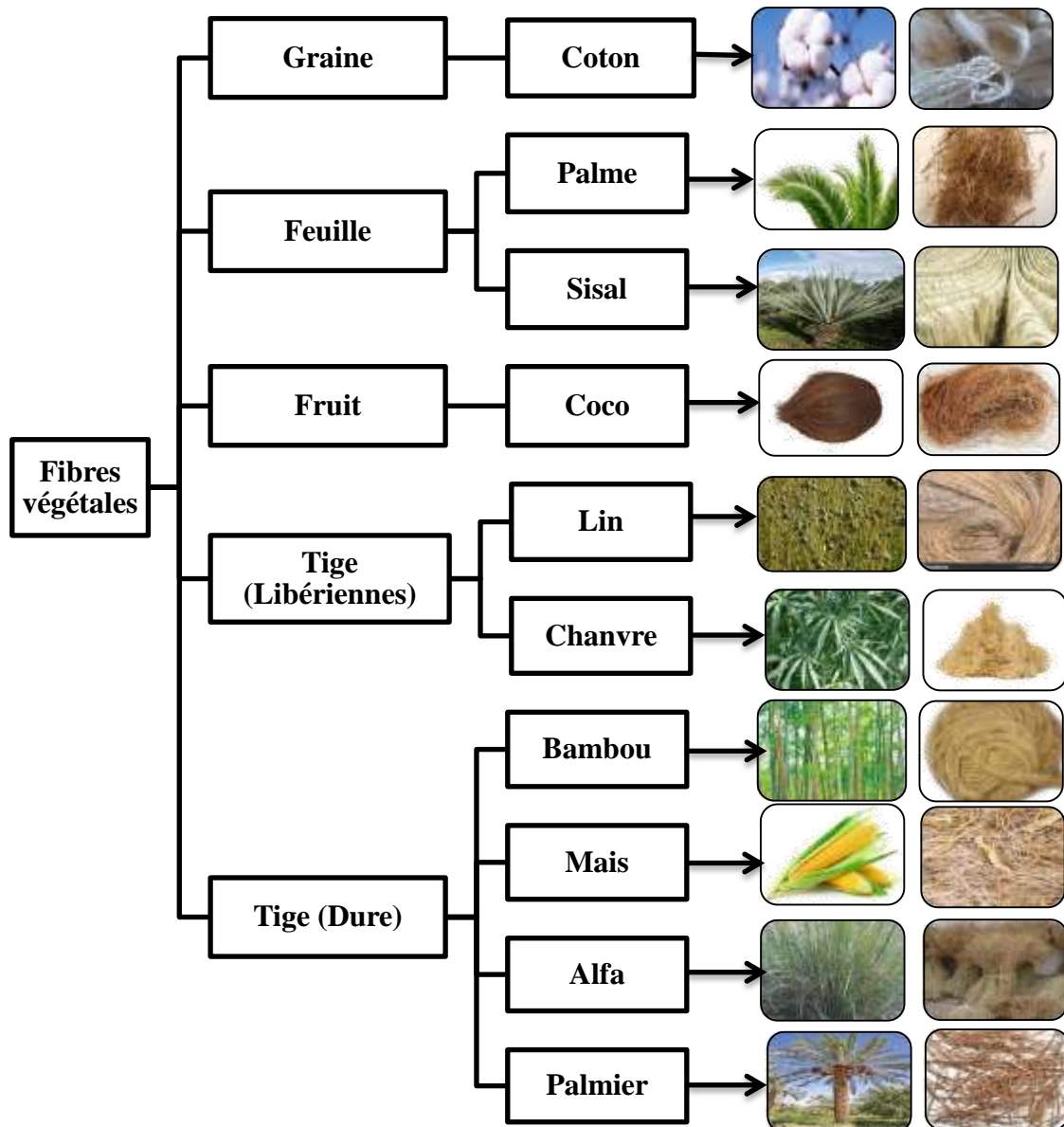


Figure II.1: Classification des fibres végétales selon l'origine

#### II.4 Morphologie de la fibre végétale:

La morphologie des fibres, déterminée par la longueur, le diamètre, la forme et la texture, est un facteur important pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux composites. L'augmentation de la teneur en fibres augmente la résistance et la rigidité du composite. Les fibres plus longues ont une meilleure résistance à la traction et à la compression, tandis que les fibres plus fines ont une meilleure résistance à la traction et une meilleure rigidité.

Les performances du composite sont maximisées avec de meilleures propriétés internes et des fibres avec une orientation optimisée dans la direction de la force appliquée. En sélectionnant la combinaison optimale de ces caractéristiques et en tenant compte d'autres facteurs comme la nature de la matrice, il est possible de créer des composites répondant aux exigences spécifiques de chaque application.

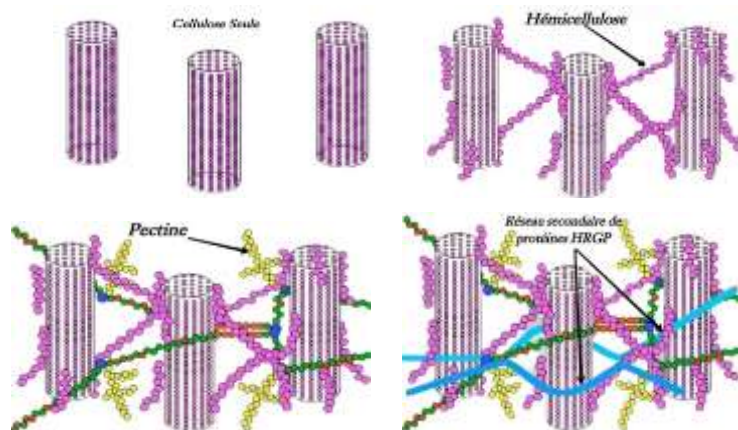
Les macromolécules de cellulose s'associent pour former des microfibrilles de cellulose, organisées en spirales avec un angle microfibrillaire. Ces microfibrilles s'assemblent ensuite grâce à des ponts hémicellulosiques pour former des macrofibrilles, constituant l'essentiel de la paroi des fibres végétales. Cette organisation hiérarchique confère au matériau final, comme le bois, ses remarquables propriétés mécaniques et structurales.

**Tableau II.1:** Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [17]

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre ( $\mu\text{m}$ )	Angle micro fibrillaire ( $^\circ$ )
Coton	35	10-45	-
Lin	4-77	5-76	10
Chanvre	5-55	10-51	6.2
Kénaïf	2.5-4.5	14-33	-
Jute	2.5	5-25	8
Sisal	900	8-50	20
Rami	900-1200	20-80	7.5
Noix de coco	0,3-1	12-24	45

## II.5 Composition chimique d'une fibre végétale:

Composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, les fibres végétales sont des fibres lignocellulosiques qui contiennent également des matières extractibles non azotées, des matières protéiques brutes, des lipides et des matières minérales, bien qu'en plus petites quantités. La composition spécifique de ces constituants varie considérablement en fonction de facteurs tels que l'espèce végétale, l'âge et les organes.

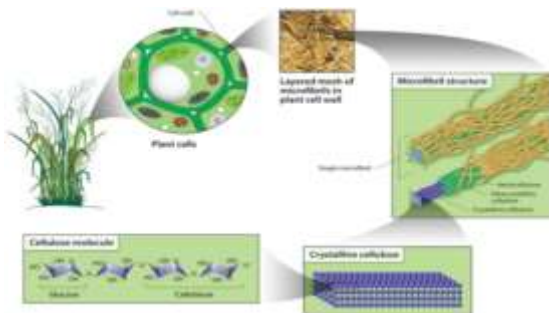


**Figure II.2:** Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres végétales à l'échelle micrométrique [18]

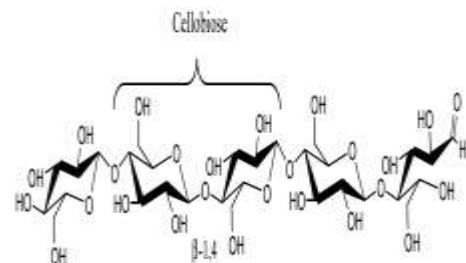
### ➤ La Cellulose:

Est le polymère linéaire la plus présente sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose se compose d'une chaîne stéréorégulière très longue composée de maillons de glucose  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$  reliées entre elles par des liaisons glycosidiques. L'origine de la cellulose influence le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation.

Ce matériau revêt une grande importance sur le plan industriel, car de nombreuses fibres (coton, chanvre, jute, Lin...) sont constituées de cellulose, elle représente le composant principal des fibres, avec une proportion pouvant atteindre 70 %, qui confère aux fibres leur résistance et leur rigidité. [8,9]



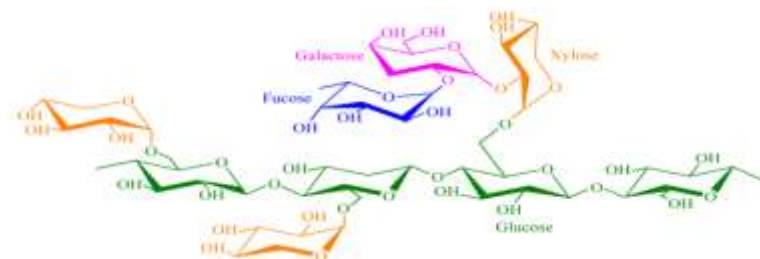
**Figure II.3** Représentation de la cellulose [19]



**Figure II.4:** Molécule de cellulose

➤ Hémicelluloses:

L'hémicellulose diffère de la cellulose par sa composition chimique, son degré de polymérisation et la ramification de sa chaîne moléculaire. Il est composé de monosaccharides et d'acides sucrés. Figure (pentoses, hexoses, acides hexuroniques et désoxy-hexoses). Son poids moléculaire est nettement inférieur à celui de la cellulose. L'hémicellulose est une classe très diversifiée de polymères hydrosolubles qui peuvent être extraits des parois cellulaires végétales à l'aide de solutions alcalines. L'hémicellulose est hydrophile et se lie aux surfaces cellulosiques par des liaisons hydrogène. Il a également un lien étroit avec la lignine. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de la dégradation hygroscopique et thermique des fibres. [20]



**Figure II.5:** Structure d'un hémicelluloses [21]

➤ Lignine:

C'est un polymère hautement hétérogène composé de polymères aromatiques. Après les polysaccharides, c'est le polymère naturel le plus abondant sur terre. Favorise la rigidité structurelle des parois cellulaires et protège les plantes des attaques de micro-organismes pathogènes. La lignine est une molécule tridimensionnelle composée d'unités phényle et propane. Les principales unités qui composent la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool sinapylique et l'alcool p-coumarylique.

Lors du processus de lignification, des phénols oxydases végétales telles que les laccases interviennent pour assurer la polymérisation des différentes unités basiques. Une fois synthétisée, la lignine se combine à divers polysaccharides pour former la matrice qui constitue les parois des plantes.

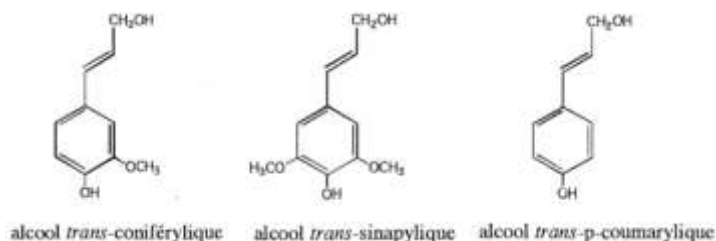


Figure II.6: Formules chimiques des principaux constituants de la lignine

➤ Pectine:

Dérivée du grec "pêktos" signifiant "épais ou coagulé", est un polysaccharide acide que l'on trouve dans les plantes et qui est largement utilisé comme agent gélifiant. Dans les plantes, la pectine est un composant essentiel de la paroi végétale, agissant comme un "ciment" entre les cellules des tissus végétaux.

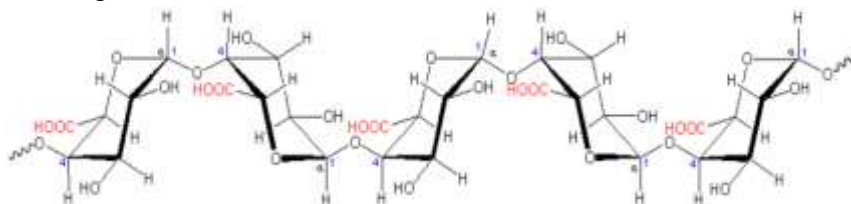


Figure II.7: Structure d'une chaîne de pectine [22]

➤ Les Cires:

Sont effectivement des constituants naturels des fibres végétales et animaux. Elles sont généralement extraites à l'aide de solvants organiques comme le benzène ou l'acétone, qui dissolvent les cires sans affecter la structure des fibres.

Tableau II.2: Composition chimique des fibres naturelles en %.

Composition	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Cires
<b>Fibre de tige</b>					
<b>Banane</b>	63-64	10	5	NS	NS
<b>Chanvre</b>	70.2-74.4	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8
<b>Jute</b>	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	0.5
<b>Kénaf</b>	45-57	21.5	8-13	3-5	NS
<b>Lin</b>	71-78	18.6-20.6	2.2	2.3	1.7
<b>Ramie</b>	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	0.3
<b>Fibre de feuille</b>					
<b>Abaca</b>	56-63	21.7	12-13	1.0	0.2
<b>Ananas</b>	80-83	15-20	8-12	2-4	4-7
<b>Sisal</b>	67-78	10-14	8-11	10	2
<b>Fibre de fruit /grains</b>					
<b>Coco</b>	36-43	0.15-0.25	41-45	3.4	NS
<b>Coton</b>	85-90	5.7	0.7-1.6	0-1	0.6
<b>Bois</b>					
<b>Bois dur</b>	43-47	25-35	16-24	NS	NS
<b>Bois tendre</b>	40-44	25-29	25-31	NS	NS

## II.6 Structure des fibres végétales:

La fibre végétale se distingue par sa structure multicouche, composée de parois cylindriques et concentriques. Le lumen central, vestige du noyau et du cytoplasme, renseigne sur la qualité et la maturité de la fibre. La paroi végétale, riche en glucides, se divise en une paroi primaire fine et flexible et une paroi secondaire robuste composée de trois couches distinctes (S1, S2 et S3). Cette architecture complexe confère à la fibre végétale des propriétés remarquables de résistance mécanique, d'absorption d'eau et de biodégradabilité. Exploitées dans divers domaines tels que le textile, le papier, la construction et l'agroalimentaire, les fibres végétales constituent un matériau naturel et durable aux multiples atouts.

### ➤ La paroi primaire (P):

D'une épaisseur de moins de 0,1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, formant la couche la plus externe des parois cellulaires et présentant souvent des propriétés de porosité et d'élasticité. Cette paroi est constituée d'une structure fibrillaire enveloppée dans un mélange de lignine, de pectine et d'hémicellulose.

### ➤ La paroi secondaire:

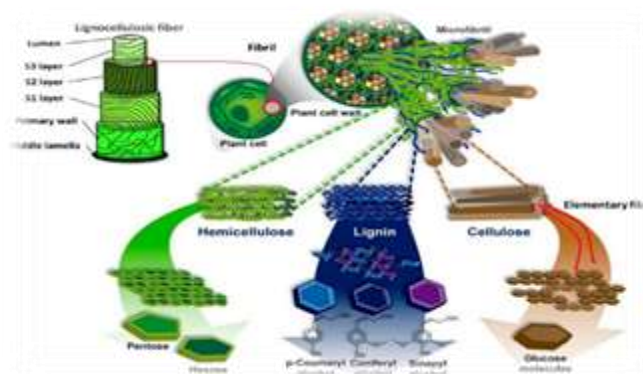
Se compose de trois couches principales :

#### **La paroi externe (S1):**

Mince, avec une épaisseur de 0,1 à 0,2  $\mu\text{m}$ , où les fibrilles sont disposées en hélices parallèles de sens opposés, formant ainsi une structure enroulée. [23]

#### **La paroi centrale (S2):**

Elle est beaucoup plus épaisse, variant de 0,5 à 8  $\mu\text{m}$ , et la rigidité de la fibre dépend largement de son épaisseur. Les fibrilles dans cette couche sont également organisées en hélices parallèles. Enfin, la paroi interne (S3), est mince avec une épaisseur de 0,04 à 0,1  $\mu\text{m}$ , et elle est située à proximité du lumen de la fibre.[23]



*Figure II.8: Représentation schématique d'une structure détaillée d'une fibre végétale. [24]*

## II.7 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales :

Les fibres végétales sont caractérisées physiquement par leur diamètre, leur densité, leur absorption d'eau et mécaniquement par la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et le module d'élasticité.

**Tableau II.3:** Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [25]

Fibres	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
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	2-14	511-635	6.4-22.0
Noix de coco	1.2	15-40	175	4.0-6.0
Palmier Dattier	0.51-1.08	7.5-17.4	170-290	2.1-5.25
Abaca	1.35	3	900	/
Kénaïf	1.47	2.7	1580	/

## II.8 Avantages et inconvénients des fibres végétales :

Les fibres végétales présentent de nombreux avantages, notamment leur durabilité et leur faible coût. Cependant, il existe également des inconvénients associés aux fibres végétales. Par exemple, la production de fibres végétales peut nécessiter une utilisation intensive des ressources en eau et en terres agricoles. De plus, certaines fibres végétales peuvent être plus sujettes à la moisissure et à la décomposition.

**Tableau II.4:** Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [26]

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Faible densité et faible coût</li> <li>● Facile à recycler et biodégradable</li> <li>Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres</li> <li>● Absence de résidus après incinération</li> <li>● Ressource renouvelable</li> <li>● Demande peu d'énergie pour être produite</li> <li>● Bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique</li> <li>● Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Absorption d'eau</li> <li>● Faible stabilité dimensionnelle</li> <li>● Mauvaise tenue au vieillissement</li> <li>● Faible résistance au feu (200 à 230 °C max)</li> <li>● Fibres anisotropes</li> <li>● Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...</li> <li>● Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock</li> <li>● Renfort discontinu</li> </ul>

## II.9 Méthodes d'extraction des fibres végétales:

Il existe quatre principaux types de procédés pour extraire les fibres végétales : le procédé biologique, mécanique, physique et le procédé chimique. Le choix du procédé adéquat dépend du type et de l'âge de la plante ainsi que de l'organe d'extraction.

### II.9.1 Extraction mécanique:

L'extraction mécanique des fibres, qu'elle soit réalisée à la machine ou à la main, présente des inconvénients importants. Premièrement, les contraintes mécaniques peuvent modifier les propriétés mécaniques des fibres, entraînant une diminution de leur résistance et de leur durabilité. De plus, cette méthode peut entraîner une séparation inégale des fibres, entraînant des variations de taille et de qualité.

### II.9.2 Extraction biologique :

L'extraction biologique est une méthode naturelle d'extraction de fibres végétales qui utilise des agents microbiens ou des micro-organismes pour dégrader sélectivement les composants non cellulosiques des plantes, facilitant ainsi la séparation des fibres. Bien qu'efficace contre la plupart des ingrédients, il existe des limites à l'élimination de la pectine et des conditions spéciales peuvent être nécessaires. Malgré ces problèmes, cette méthode offre des avantages en termes de durabilité et d'efficacité dans la production de fibres de haute qualité.

### II.9.3 Extraction chimique :

Il est souvent réalisé à l'aide de solutions alcalines telles que NaOH (hydroxyde de sodium) ou KOH (hydroxyde de potassium). Ce processus chimique entraîne une dessoudée, la lignine, les pectines, les hémicelluloses et extrait les fibres végétales.

#### ❖ Effet de traitement chimique sur la surface de fibre:

La morphologie de surface des fibres est un paramètre crucial qui influence les propriétés des fibres extraites. En contrôlant et en optimisant la morphologie de surface, il est possible d'obtenir des fibres aux propriétés spécifiques pour diverses applications.

Les études ont révélé plusieurs conclusions concernant l'effet de l'extraction alcaline sur la structure des fibres extraites, qui se résument comme suit :

- Le traitement au NaOH a causé une absorption dans la bande du groupe C=O, ce qui a été supposé être dû à l'élimination de l'hémicellulose.
- Le traitement chimique réduit l'effet et le nombre de liens OH
- Les traitements alcalins des fibres ont entraîné une augmentation de l'O-H qui a été présumée être due à la rupture de la liaison hydrogène dans les groupes hydroxyles cellulosiques.

## II.10 Généralité sur les matériaux végétaux du palmier dattier:

### II.10.1 Introduction:

La possibilité d'exploiter les déchets de palmiers dans la fabrication de matériaux bio composites représente une opportunité prometteuse pour créer une économie verte et durable.

Les palmiers produisent chaque année d'énormes quantités de bois fibreux et de fibres sous forme de déchets dans les palmeraies, telles que (spadice, grappe, palmes sèches, rebuts de dattes, et lif...), qui possèdent des propriétés mécaniques et chimiques excellentes, en faisant un substitut idéal au bois traditionnel et aux fibres végétales.

L'exploitation des déchets de palmiers offre l'opportunité de réduire la pollution environnementale et de promouvoir la durabilité, car ils sont disponibles en grandes quantités sans nécessiter de replantation des arbres, et fournissent des matériaux adaptés à la fabrication de matériaux bio composites.

La création d'un secteur dédié à la collecte et au traitement des déchets de palmiers, accompagnée du développement de nouvelles technologies et de l'investissement dans la recherche et le développement pour améliorer l'utilisation de ces matériaux, ouvre de nouvelles perspectives d'investissement dans ce secteur et renforce le développement durable.

### II.10.2 Répartition géographique du palmier dattier:

#### ❖ Au niveau mondial:

Le palmier dattier est une culture présente sur tous les continents, mais il est cultivé de manière intensive dans les zones arides et semi-arides d'Afrique, du Moyen-Orient, ainsi qu'en Espagne, qui est le seul pays européen producteur de dattes. On le trouve également cultivé à une moindre intensité au Mexique, en Argentine et en Australie. Ces régions offrent des conditions climatiques propices à la croissance de cette plante, caractérisées par des températures élevées et une faible pluviométrie. [27]

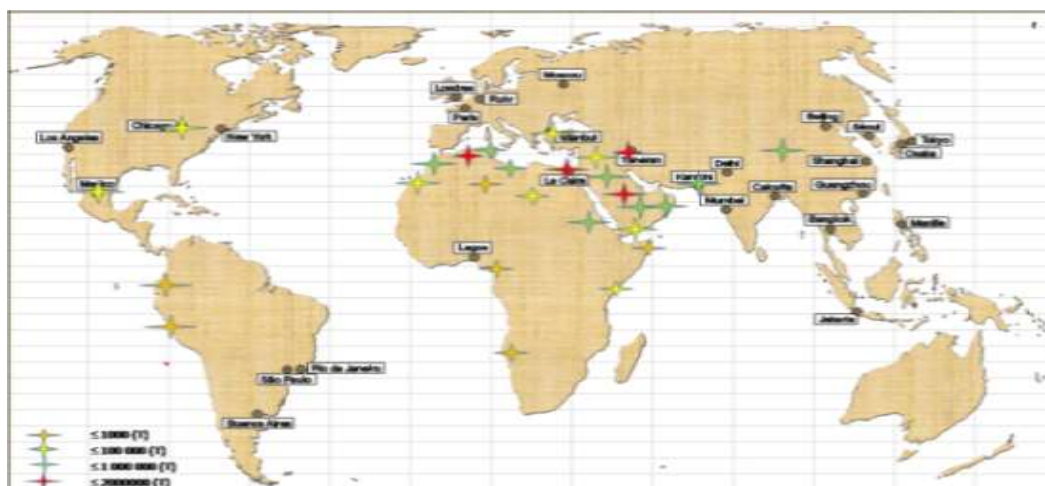


Figure II.9: Répartition géographique du palmier dattier dans le monde

#### ❖ Au niveau national:

La culture des palmiers dattiers est principalement concentrée dans les wilayas du désert, notamment dans la partie orientale du pays, où différentes variétés de palmiers sont plantées dans diverses régions du pays, La superficie totale consacrée à la culture des dattiers en Algérie est estimée à 154 372 hectares avec un nombre dépassant les dix-huit millions palmier.

La région de Biskra (Ziban), qui abrite approximativement quatre millions de palmiers dattiers, avec une superficie totale évaluée à 43 317 ha, est l'un des principaux centres de production de dattes en Algérie. [28]

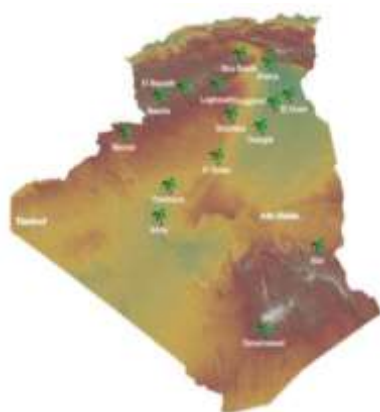


Figure II.10: Répartition de la superficie de la palmeraie algérienne

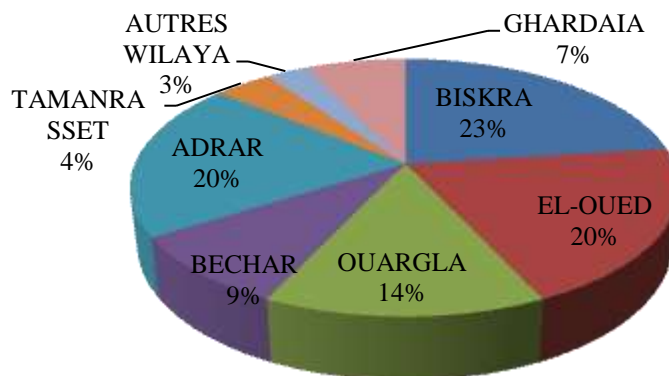


Figure II.11: Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya

### II.10.3 Morphologie du palmier dattier:

Le palmier pouvant atteindre 25 m de haut ou plus, il est recouvert depuis le pied et sur toute sa hauteur, de la base de chaque pétiole, des anciennes palmes coupées, portant à son sommet un bourgeon terminal d'où sont issues les palmes. Ces dernières sont des feuilles composées de pennées formant une couronne. Chaque année, il peut en apparaître entre 10 et 20 et jusqu'à 30, de 2 à 6 m de longueur, avec une durée de vie entre 3 et 7 ans. Un palmier adulte compte de 50 à 200 palmes environ. De croissance lente, sa durée de vie peut dépasser 100 ans. [29]

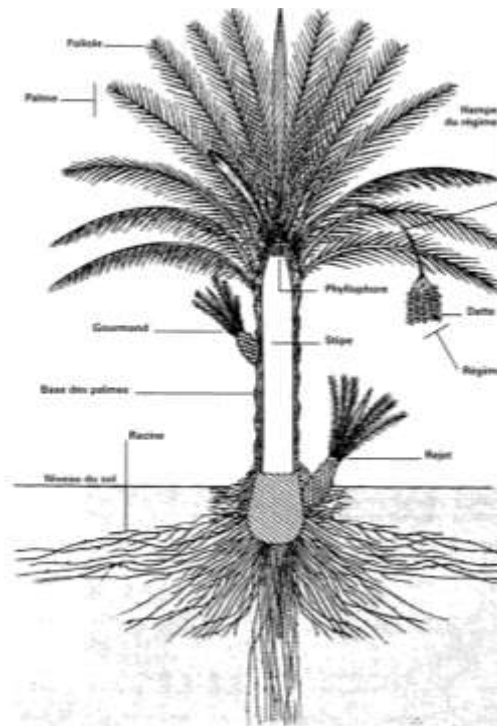


Figure II.12: Diagramme schématisique du palmier dattier. [30]

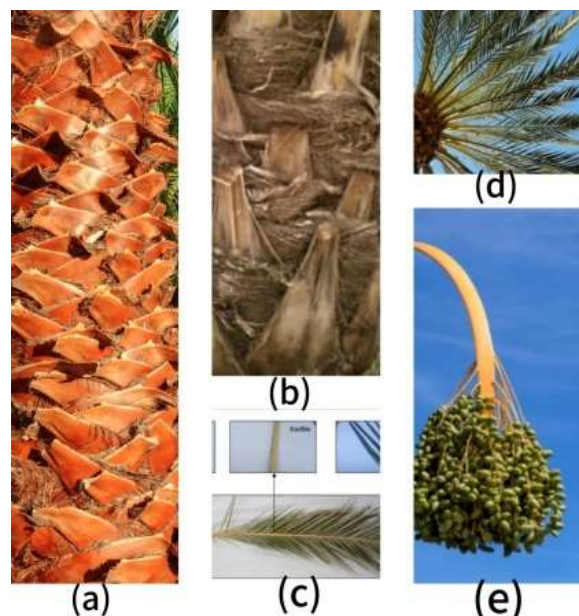


Figure II.13: Parties du palmer: (a): Tronc, (b): Fibrilium, (c): Palme, (d): Couronne, (e): Grappe

- **Grappe ou régime:**

Bunche en anglais et Ardjoune en arabe. Il est constitué par une tige principale qui se ramifie en pédicelles. Sur le même régime, la maturation des fruits est échelonnée. Le palmier émet 6 à 20 grappes mesurant de 25 à 200 cm de longueur et 4 à 8 cm de largeur. Le nombre de fleurs est de 20 à 60 par épillet, donnant par la suite 20 à 60 fruits.



*Figure II.14: Les Grappes*

#### II.10.4 Composition chimique du palmier:

Les propriétés chimiques du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) comprennent différents composants présents dans différentes parties de la plante telles que les fruits, les feuilles, les racines et la tige. Une étude approfondie sur la composition chimique des déchets de dattes a été menée et est présentée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau II.5: Composition chimique des déchets du palmier dattier*

	<b>Cendres %</b>	<b>Cellulose brute % poids</b>	<b>Lignine watt %</b>	<b>Hémicellulose % en poids</b>	<b>Cellulose % en poids</b>
<b>Pétiole</b>	3.70	23.97	26.03	20.44	33.79
<b>Rachis</b>	4.00	54.02	33.00	19.35	41.42
<b>Les épines</b>	5.52	56.29	30.10	21.17	35.05
<b>Pédicelles</b>	3.05	68.29	27.64	21.15	33.29
<b>Spathe</b>	5.10	43.27	28.27	19.10	42.48
<b>Fibrilleux</b>	1.55	82.28	27.80	21.68	43.94

#### II.10.5 Propriétés physiques des déchets de palmiers dattiers:

Les propriétés physiques des déchets de palmier dattier varient en fonction de la partie du palmier dont ils proviennent. Ces propriétés peuvent être importantes pour la valorisation des déchets de palmier dattier.

*Tableau II.6: Propriétés physiques des déchets de palmiers dattiers*

<b>Biens</b>	<b>Pétiole</b>	<b>Rachis</b>	<b>Les épines</b>	<b>Pédicelles</b>	<b>Spathe</b>	<b>Grappe</b>
<b>Densité apparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	160	635	431	425	328	555
<b>Densité absolue (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	866	751 ±	716	749	897	826
<b>Absorption de l'eau</b>	146.3	36.8	83.85	73.78	130.8	63.2
<b>Porosité %</b>	81.52	15.44	39.80	43.25	63.43	32.8

### II.10.6 Les sous-produits du palmier dattier et leurs utilisations:

Les sous-produits du palmier dattier sont principalement constitués de résidus issus du processus de récolte et de nettoyage, comprenant notamment les régimes de dattes, les palmes sèches, le lif, et d'autres matériaux similaires.



Figure II.15: Déchets des palmiers dattiers: a) stipes , b) palmes sèches

Tableau II.7: La quantité d'organes de palmier dattier après entretien annuel [31]

Organes de palmier dattier	Moyenne par palmier
Palme sèche	10 à 22(palmes/palmier)
Régimes	8 à 11(régimes/palmier)
Pétiole « Kornaf »	9 à 25 (Kornaf/palmier)
« lif »	300 à 2000(grammes/palmier)

### II.10.7 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier:

Les déchets sont exploités par la population saharienne comme une large gamme de sous-produits (avec la fabrication de chapeaux, paniers, charpentes de maison et tapis...)

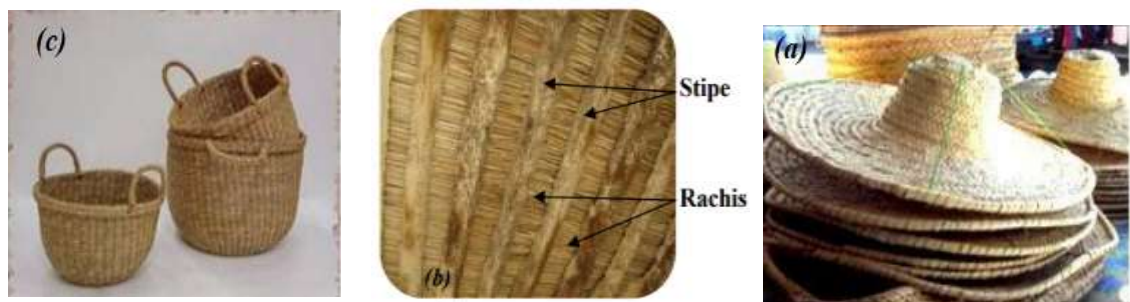


Figure II.16: Quelques utilisations traditionnelles des déchets du palmier dattier

## II.11 Généralité sur les matériaux végétaux des noyaux dattiers:

### II.11.1 Les dattes:

Sont des fruits à noyau unique, communément appelés « noyaux », recouverts d'une fine couche de cellulose appelée exocarpe ou peau. Il possède un mésocarpe plus ou moins charnu, de consistance variable, avec une zone périphérique de couleur foncée et de texture dense et une zone interne fibreuse de couleur plus claire appelée endocarpe qui entoure la graine ou le grain Masu. Leurs dimensions varient considérablement, allant de 2 à 8 cm de longueur et pesant entre 2 et 8 g selon les variétés.

### II.11.2 Production des dattes:

#### ❖ Dans le monde:

La production de dattes au niveau mondial est un secteur important, avec une production totale en 2021 atteignant environ 9,8 millions de tonnes. Les principaux producteurs mondiaux de dattes se trouvent au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. En ce qui concerne la production mondiale de dattes, les pays arabes produisent approximativement 71 %. L'Égypte, l'Arabie saoudite, l'Algérie et l'Iran comptent parmi les plus.

*Tableau II.8: Les Dix principaux producteurs de datte dans le monde en 2021 [32]*

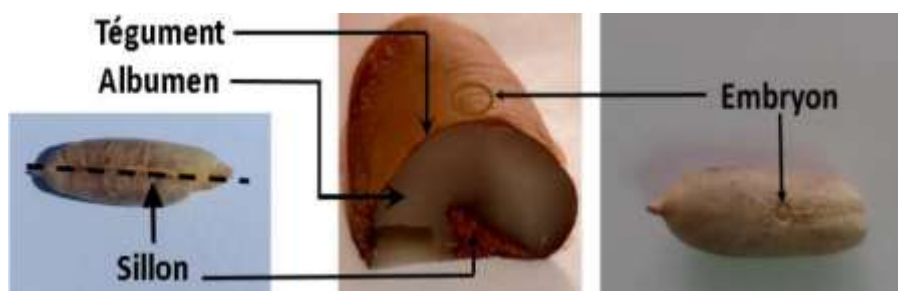
Grands pays producteurs de dattes	Production(t)	P %	Hectare
<b>Egypte</b>	1 690 959	20,12	50 834
<b>Arabie Saoudite</b>	1 541 769	18,34	152 705
<b>Iran</b>	1 283 499	15,27	154 145
<b>Algérie</b>	1 115 909	13,28	170 500
<b>Irak</b>	735 353	8,75	245 033
<b>Pakistan</b>	543 269	6,46	106 488
<b>Soudan</b>	465 323	5,54	370 000
<b>Oman</b>	368 577	4,39	25 630
<b>Tunisie</b>	332 000	3,95	72 205
<b>UAE</b>	328 669	3,91	38 422
<b>Total</b>	<b>8 405 327</b>	<b>100</b>	<b>1 385 962</b>

#### ❖ En Algérie :

La culture des palmiers et la production de dattes constituent un secteur agricole vital en Algérie, bénéficiant d'un climat et d'une géographie propices à la croissance de cette précieuse plante. Le pays se classe quatrième mondial dans la production de dattes, avec une quantité annuelle atteignant 1,7 million de tonnes. Cette production importante contribue grandement à la sécurité alimentaire et à la création d'emplois dans le pays. [33]

### II.11.3 La morphologie du noyau de datte :

Le noyau de datte (ou graine) est de forme allongée et de grosseur variable, mesurant jusqu'à 1 cm de long, 0,5 cm de large et 0,3 cm d'épaisseur. Son poids est approximativement d'un 0,4 à 2 g, il se compose du cortex (couche externe dure), de la moelle (partie interne blanche) et de l'embryon. [35]



*Figure II.17: Noyau de dattes du palmier dattier.*

### II.11.4 Composition des noyaux de dattes:

Afin de déterminer la composition chimique des noyaux de dattes, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

*Tableau II.9: Composition chimique des noyaux de dattes*

	<b>Deglet Nour</b>	<b>Degla Baida</b>	<b>Ghars</b>	<b>Hamraya</b>
<b>TH (%)</b>	8,08 ± 0,09	6,37 ± 0,04	12,42 ± 0,37	6,79 ± 0,02
<b>MS (%)</b>	91,92 ± 0,09	93,63 ± 0,04	87,58 ± 0,37	93,21 ± 0,02
<b>Cendres (%MS)</b>	1,08 ± 0,00	1,01 ± 0,05	0,80 ± 0,00	0,85 ± 0,01
<b>MO(%MS)</b>	98,92 ± 0,01	98,99 ± 0,05	99,21 ± 0,00	99,15 ± 0,01
<b>PB (% MS)</b>	8,59 ± 0,68	6,61 ± 0,17	6,51 ± 0,11	6,72 ± 0,29
<b>CB (% MS)</b>	13,54 ± 1,17	16,27 ± 1,39	14,78 ± 0,60	13,94 ± 0,31
<b>STH (% MS)</b>	6,02 ± 1,24	7,09 ± 0,74	7,08 ± 0,03	7,41 ± 0,29
<b>MG (% MS)</b>	9,81 ± 1,78	8,72 ± 1,02	11,70 ± 1,76	10,39 ± 2,21
<b>GT (%MS)</b>	66,98 ± 1,89	67,39 ± 1,59	66,21 ± 2	68,10 ± 0,47
<b>PH</b>	5,76 ± 0,07	5,91 ± 0,19	6,12 ± 0,09	5,93 ± 0,13
<b>AG (%)</b>	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,00	0,02 ± 0,00

### II.12 Conclusion:

Les matériaux composites se distinguent par la nature de leur matrice, qui peut être organique, métallique ou céramique, et leurs propriétés mécaniques dépendent fortement de l'adhérence entre la matrice et les fibres. Les fibres naturelles offrent de nombreux avantages, tels que leur faible coût, leur caractère renouvelable, leur biodégradabilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques, comme la résistance et la rigidité. Cependant, les propriétés des fibres naturelles varient considérablement en fonction de leur composition chimique et structurale, principalement en raison des variations de la cellulose, le composant principal des fibres végétales. Pour optimiser l'utilisation des fibres naturelles dans les composites, il est essentiel de comprendre leurs propriétés physiques et chimiques et de choisir les fibres en fonction des exigences spécifiques de chaque application.



*CHAPITRE III:  
MATÉRIAUX ET MÉTHODE*

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale que nous avons réalisée. Nous commençons par l'élaboration de la plaque de composite polyester/fibres de grappe des palmiers et polyester/poudre de graines de dattes en utilisant la technique du moulage. Ensuite, nous découpons des éprouvettes à partir de cette plaque selon la norme ASTM. Des essais de flexion 3 points seront alors réalisés afin de déterminer le module d'élasticité en flexion.

### III.2 Préparation des renforts :

#### III.2.1 Préparation de farine des noyaux de dattes (FND):

La préparation des noyaux comprend les étapes suivantes :

➤ **Lavage**

Les noyaux sont lavés à l'eau chaude pour enlever les traces de pulpe et toutes sortes d'impuretés qui collent à ces derniers.



*Figure III.1: Nettoyer les noyaux de dattes à l'eau chaude*

➤ **Séchage**

Après lavage, les noyaux sont placés à l'air libre pendant 2 à 3 jours afin de faciliter le broyage.



*Figure III.2: Séchage des noyaux de dattes*

➤ **Broyage**

Le broyage a été réalisé au moyen d'un moulin à café ou d'un broyeur puissant pour réduire les noyaux en poudre fine.



*Figure III.3: Broyage de noyau de dattes*

### III.2.2 Extraction des fibres des bras de grappe des palmiers dattiers :

#### ➤ Nettoyage

Les grappes de palmier sont nettoyées de la saleté et des impuretés à l'aide d'eau et d'une brosse.

#### ➤ Découpe

Les grappes de palmier sont coupées en morceaux de taille égale et enlevées de sa couche externe.



*Figure III.4: Coupe et enlève la couche externe des bras de grappes*

#### ➤ Rouissage

Les morceaux de grappe de palmier sont immergés dans l'eau pendant 2 à 3 jours pour les ramollir et faciliter la séparation des fibres.



*Figure III.5: Immersion des bras de grappes dans l'eau*

➤ **Démontage**

Les morceaux de grappes de palmier trempés sont désassemblés à l'aide d'outils appropriés pour séparer les fibres les unes des autres.



**A : Brosse métallique**



**B : Marteau**

*Figure III.6: Outils de démontage*



**A : Désassembler les bras de grappe**



**B : fibre des bras de grappe après la séparation**

*Figure III.7: Démontage des bras de grappes des palmiers dattiers*

➤ **Nettoyage**

Les fibres extraites sont nettoyées de tout résidu de parties ligneuses ou de saleté à l'aide d'eau.

➤ **Séchage**

Les fibres sont étalées au soleil.

➤ **Tri**

Les fibres séchées sont triées selon leur longueur et leur qualité pour différentes utilisations.

### III.3 Traitement chimique des renforts :

#### III.3.1 Traitement alcalin de la FND :

Le traitement chimique a été effectué avec NaOH pendant 48 heures.

1. Nous avons tamisé la farine de noyau de datte après broyage.

2. Nous avons préparé une solution avec une concentration de 2 % de NaOH
3. On a trempé une quantité de farine tamisée dans la solution préparée.
4. Après 48 heures, nous avons filtré la solution à l'aide d'un chiffon stérile.
5. Séchage de la quantité obtenue (la méthode de séchage consistait à placer la farine au soleil pendant plusieurs jours).

### III.3.2 Traitement alcalin des fibres des bras de grappe des palmiers dattiers :

Les fibres des bras de grappe de palmier dattier ont été émergées dans une solution de NaOH avec 2 % de concentration pour les durées de 72 heures à la température ambiante. Ensuite, elles ont été rincées à l'eau douce, puis émergées dans l'eau distillée pendant 15 min pour avoir un PH neutre, et enfin séchées dans une étuve à une température de 70 °C durant une durée de cinq heures.



**A: Fibre avant le traitement**

**B: Fibre après le traitement**

**C: Séchage de fibre traité**

*Figure III.8: Traitement alcalin des fibres des bras de grappe*

## III.4 Fabrication des composites:

### III.4.1 Quantité des éléments (Renforts/Matrice):

➤ Eprouvettes à 30 % de FND:

En théorie, nous désirons une masse de la FND " $m_f$ " représentant environ 30 % de la masse du composite (éprouvettes) " $m_c$ ". La masse de la matrice " $m_m$ " représente alors 70 % de la masse du composé.

Pour connaître les masses nécessaires pour préparer les éprouvettes, nous utilisons la démarche suivante :

La masse des éprouvettes avant séchage est égale à 34 g.

$$m_f = 0.3 \times m_c = 0.3 \times 34$$

$$m_f = 10.2 \text{ g}$$

$$m_m = 0.7 \times m_c = 0.7 \times 34$$

$$m_m = 23.8 \text{ g}$$

➤ Éprouvettes à 35 % de FND :

En théorie, nous désirons une masse de renfort (FND) " $m_f$ " représentant environ 35% de la masse du composite (éprouvettes) " $m_c$ ". La masse de la matrice " $m_m$ " représente alors 65% de la masse du composé.

Pour connaître les masses nécessaires pour préparer les éprouvettes, nous utilisons la démarche suivante:

La masse des éprouvettes avant séchage est égale à 34 g.

$$m_f = 0.35 \times m_c = 0.35 \times 34$$

$$m_f = 11.9 \text{ g}$$

$$m_m = 0.65 \times m_c = 0.65 \times 34$$

$$m_m = 22.1 \text{ g}$$

➤ Éprouvettes à 40 % de FND:

En théorie, nous désirons une masse de renfort (FND) " $m_f$ " représentant environ 40 % de la masse du composite (éprouvettes) " $m_c$ ". La masse de la matrice " $m_m$ " représente alors 60 % de la masse du composé.

Pour connaître les masses nécessaires pour préparer les éprouvettes, nous utilisons la démarche suivante :

La masse des éprouvettes avant séchage est égale à 34 g.

$$m_f = 0.4 \times m_c = 0.4 \times 34$$

$$m_f = 13.6 \text{ g}$$

$$m_m = 0.6 \times m_c = 0.6 \times 34$$

$$m_m = 20.4 \text{ g}$$

➤ Composite à 30% de fibre de grappe:

Masse de renfort (fibre des grappes)  $m_f = 74 \text{ g}$

$$\frac{m_f}{m_c} = 0.3 \Rightarrow m_c = \frac{m_f}{0.3} = \frac{74}{0.3}$$

$$m_c \approx 246.66 \text{ g}$$

$$m_m = 246.66 - 74 = 172.66 \text{ g}$$

$$m_r + m_d = 246.66 \text{ g}$$

$$m_r + 0.01m_r = 172.66 \text{ g}$$

$$m_r = \frac{172.66}{1.01} = 170.96 \text{ g}$$

$$m_d = 172.66 - 170.96 = 1,71 \text{ g}$$

➤ Composite à 40% de fibre de grappe:

Masse de renfort (fibre des grappes)  $m_f = 74 \text{ g}$

$$\frac{m_f}{m_c} = 0.4 \Rightarrow m_c = \frac{m_f}{0.4} = \frac{74}{0.4}$$

$$m_c \approx 185 \text{ g}$$

$$m_m = 185 - 74 = 111 \text{ g}$$

$$m_r + m_d = 111 \text{ g}$$

$$m_r + 0.01m_r = 111 \text{ g}$$

$$m_r = \frac{111}{1.01} = 109.9 \text{ g}$$

$$m_d = 111 - 109.9 = 1.1 \text{ g}$$

#### I.4.2 Matériel utilisé :

pour l'élaboration de l'éprouvette FND/Polyester:

➤ **Moule en silicone RTV:**

Nous avons utilisé un moule en silicone RTV pour l'élaboration de la plaque de moulage. (Fig III.9).



*Figure III.9: Moule en Silicone RTV*

➤ **Gants:**

Afin de protéger l'intégrité des mains, nous utilisons des gants (Fig III.10).



*Figure III.10: Gants de sécurité*

➤ **Mesure des masses:**

Nous avons utilisé une balance électronique pour la pesée des éprouvettes et pour le dosage des résines en durcisseur (Fig III.11).



*Figure III.11: Balance électronique de précision*

➤ **Préparation de la résine polyester:**

Le dosage de la résine époxy en durcisseur a été réalisé à l'aide de cuillères en plastique.

L'ensemble a été ensuite mélangé à l'aide d'un abaisse-langue en bois dans des gobelets en plastique (Fig III.12).



**A: Gobelets en plastique**



**B: Abaisse-langue en bois**



**C: Cuillères en plastique**

*Figure III.12: Matériels utilisés pour la préparation de la résine polyester*

➤ **Résine et durcisseur:**

Dans notre cas, nous avons utilisé la résine polyester PES O 35N qui est produite par l'entreprise MPC PROKIM (Fig III.13).



**A: Résine**



**B: Durcisseur**

*Figure III.13: Résine polyester PES O 35N*

➤ **Four électrique:**

Nous avons utilisé un four électrique pour sécher les échantillons à certaines températures (Fig III.14).



*Figure III.14: Four électrique*

➤ **Pince à creuset:**

La pince à creuset est un outil de laboratoire utilisé pour saisir et manipuler des éprouvettes (Fig III.15).



*Figure III.15: Pince à creuset*

Pour la préparation de la composite à base de fibre de grappe:

➤ **Plaque en verre:**

Nous avons utilisé une feuille en verre d'épaisseur 4 mm pour l'élaboration de la plaque de moulage (Fig.III.16).



*Figure III.16: Plaque en verre*

➤ **Cire de démoulage:**

Afin d'éviter que le matériau composite élaboré ne colle sur la plaque en verre, on applique sur cette dernière une fine couche de cire (Fig. III.17).



*Figure III.17: Cire de démoulage Tr 104*

➤ **Le mastic d'étanchéité:**

Le mastic d'étanchéité est utilisé pour sceller le film d'ensachage et le moule dans le processus d'infusion sous vide (Fig. III.18).



*Figure III.18: Mastic d'étanchéité*

➤ **Tissu d'arrachage:**

Il ne colle pas avec la résine, collé sur la peau il permet de protéger la pièce finie et d'absorber et d'aider à uniformiser l'excès de résine (figure III.19), ses caractéristiques sont mentionnés dans le tableau III.1

*Tableau III.1: Caractéristiques du tissu d'arrachage*

Caractéristiques	Valeurs
Poids	85 g/m <sup>2</sup>
Couleur	Blanc
Largeur	1,8 m
Longueur	11.2 m
Température maximale	205°C



*Figure III.19: Tissu d'arrachage*

➤ **Feutre de drainage :**

Il a la particularité d'être très souple ce qui lui permet d'épouser parfaitement n'importe quelle forme (figure III.20), sa structure extrêmement poreuse permet la bonne circulation de l'air, mais le principal but de son utilisation est de permettre la pompe d'appliquer une pression uniforme sur toute la surface de la pièce à mouler, ainsi il contribue à avoir la même épaisseur.



Figure III.20: Feutre de drainage

➤ **Film de mise sous vide (de compactage):**

L'utilisation du film de mise sous vide (figure III.21) a pour but dans un premier temps de protéger la surface du moule car ce matériau est imperméable et ne colle pas avec la résine et peut facilement remplacer un agent démoulant. L'autre but de son utilisation est d'étanchéifier l'ensemble du système pour bien compacter les tissus et ne pas laisser de vides. Aussi, sa résistance chimique et mécanique et son élongation lui permettent de bien prendre la forme du moule. Les caractéristiques de ce film sont citées dans le tableau III.2 :

Tableau III.2: Caractéristiques du film sous vide

Caractéristiques	Valeurs
Nom du produit	Film d'ensachage sous vide
Matériel	Nylon
Couleur	Jaune
Résistance à la température	150°C
Épaisseur	65µm 75µm
Largeur	2.54 m
Élongation	> 400 %
Résistance à la traction	Transversal $\geq 35$ Mpa Longitudinal $\geq 38$ Mpa
Longueur	8 m



Figure III.21: Film de mise sous vide

➤ **Pompe à vide :**

Afin d'extraire l'air et pouvoir travailler sous vide il est nécessaire d'utiliser une pompe à vide (figure III.22). Ces caractéristiques sont mentionnées sur le tableau III.3

Tableau III. 3: Caractéristiques de la pompe à vide

Caractéristique	Valeur
Déplacement de l'air libre	1 CFM (pied cube par minute)
Aspirateur	0.5 Pa
Tension	220V-240V/50Hz
Puissance	1/4 HP
Capacité Pétrolière	220 ml



*Figure III.22: Pompe à vide*

➤ **Tronçonneuse :**

Pour découper les éprouvettes nous avons utilisé la tronçonneuse de la figure II.13 :



*Figure III.23: Tronçonneuse*

➤ **Divers accessoires :**



**Tuyau d'injection**



**Grattoir**



**Connecteur à vide**



**Ciseaux**

*Figure III.24: Accessoires pour le moulage sous vide*

**III.4.3 Élaboration du éprouvettes:****➤ Préparation du moule:**

Nettoyer le moule de toute saleté ou résidu.

**➤ Mesurer la résine:**

Mesurez la quantité de résine requise en fonction de la taille du moule.

**➤ Ajouter le durcisseur :**

Ajoutez la quantité recommandée de durcisseur à la résine et mélangez bien à l'aide d'un bâton en bois (Figure a).



(a)

**➤ Préparation de la farine de dattes :**

Dans un bol séparé, pesez la quantité appropriée de farine de dattes. (Figure b).



(b)

**➤ Combiner les ingrédients:**

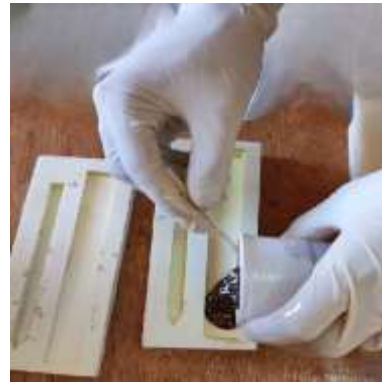
Ajoutez le mélange de farine de noyau de datte à la résine polyester et mélangez bien jusqu'à ce que le mélange soit uniforme.

**➤ Verser le mélange:**

Versez lentement le mélange de résine polyester et de farine de noyau de datte dans le moule, en vous assurant de remplir tous les coins (Figure c, d, e, f).



(c)



(d)



(e)



(f)

➤ **Éliminer les bulles:**

Utilisez des cuillères pour éliminer les bulles d'air qui pourraient s'être formées dans le mélange (Figure g).



(g)

➤ **Laisser la pièce dans le moule:**

Fermée le moule et laissez la pièce sécher dans un endroit bien ventilé (Figure h, i).



(h)



(i)

➤ **Démouler la pièce:**

Une fois la pièce complètement sèche, retirez-la délicatement du moule.



(j)



(k)



*Figure III.25: Démoulage et ponçage des éprouvettes*

**Séchage au four:**

➤ **Préparation initiale:**

Il est important que le four soit propre et exempt de toute matière pouvant altérer les pièces.

➤ **Première étape de séchage:**

Le four est préchauffé à 50 degrés Celsius. Les éprouvettes sont placées à l'intérieur du four. Les pièces sont maintenues à cette température pendant 16 heures. Il est recommandé de ne pas ouvrir la porte du four fréquemment pour maintenir une température stable.

➤ **Retrait des premières pièces:**

Après les 16 heures de séchage à 50 degrés Celsius, les pièces qui ne nécessitent pas de séchage supplémentaire sont retirées et laissées refroidir.

➤ **Augmentation de la température pour certaines pièces:**

La température du four est ensuite augmentée à 70 degrés Celsius. Les pièces qui nécessitent un séchage supplémentaire à cette température sont remises dans le four et y restent pendant une heure.

➤ **Séchage à température plus élevée pour les autres pièces:**

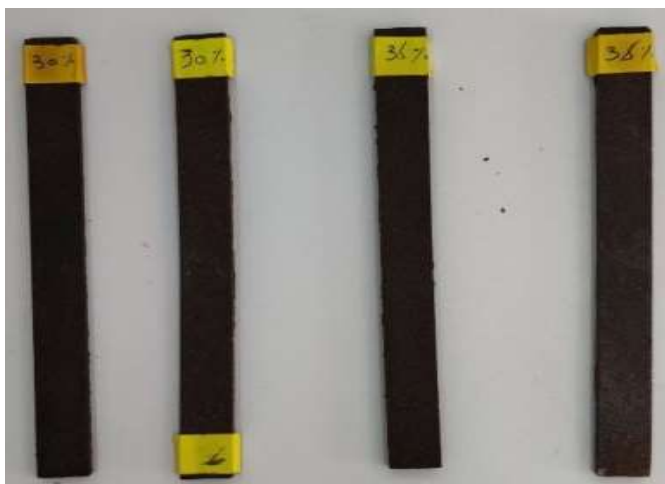
Une fois la période de séchage à 70 degrés terminée, ces pièces sont retirées et laissées à refroidir. Le four est ensuite ajusté à 90 degrés Celsius pour les pièces restantes qui nécessitent un séchage à cette température. Ces pièces sont placées dans le four et maintenues à 90 degrés pendant une heure.



*Figure III.26: Séchage des éprouvettes au four électrique*

➤ **Refroidissement final:**

Après le séchage, le four est éteint et la porte est légèrement ouverte pour permettre aux pièces de refroidir progressivement à l'intérieur du four avant de les sortir. Les pièces doivent être complètement refroidies avant d'être manipulées pour éviter tout dommage ou déformation due à la chaleur.



*Figure III.27: Éprouvettes après séchage*

### III.5 Dimensions des éprouvettes:

Nous avons utilisé la norme ASTM D790 pour laquelle les dimensions de l'éprouvette doivent respecter les conditions suivantes :

$$L = 16 \times d$$

$$b = L/4$$

$$x > 0.1 \times L$$

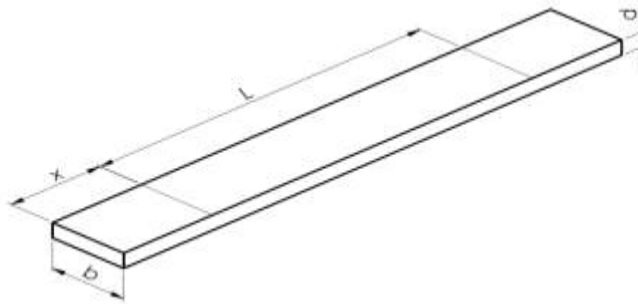


Figure III.28: Géométrie des éprouvettes de flexion 3 points

### III.6 Réalisation des essais de flexion 3 points:

#### III.6.1 Essai de flexion:

L'essai de flexion est réalisé en plaçant symétriquement l'éprouvette sur le dispositif de fixation monté sur une machine d'essai. La charge est appliquée sur l'éprouvette à mi-portée jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur de déformation prédéterminée. Le déplacement de l'éprouvette peut être mesurée à l'aide d'une jauge de déformation, d'un extensomètre ou du capteur de déplacement du bâti de charge. Les propriétés mesurées comprennent la résistance à la flexion, le module de flexion et d'autres aspects de la relation contrainte/déformation en flexion.

#### III.6.2 Essai de flexion 3 points selon la norme ASTM D790:

Une éprouvette, supportée aux deux extrémités, est soumise à une flexion au milieu de la portée  $L$ , à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à ce que la déformation ait atteint une valeur prédéterminée. Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre, où elles sont nulles ; d'un côté, elles sont en compression (coté concave de l'éprouvette) et de l'autre, en tension. Durant cet essai, la charge supportée par l'éprouvette est mesurée.

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

#### III.6.3 Machine d'essai :

Les essais de flexion trois points ont été réalisés sur une machine universelle MTS Criterion Model 45 (figure III.29) pilotée par le logiciel MTS TestSuite. Cette machine peut être équipée de trois cellules de charge : 100 kN, 5 kN et 1 kN. Nous avons utilisé la cellule de 100 kN.



Figure III.29: Machine universelle MTS Criterion Model 45

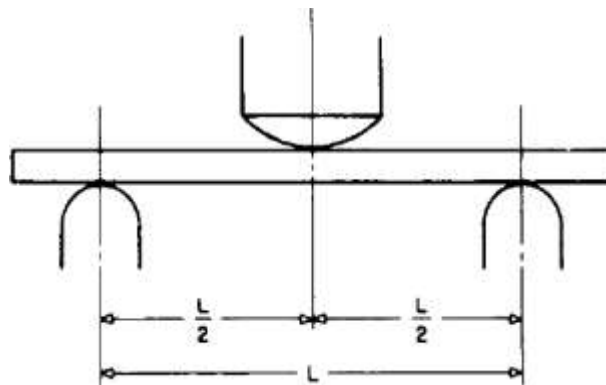


Figure III.30: Montage pour l'essai de flexion trois points



Figure III.31: Réglage de la portée  $L$

La vitesse de sollicitation R est donnée par l'expression suivante (ASTM D790) :

$$R = \frac{Z \times L^2}{6 \times d} \quad (3.1)$$

R : Vitesse [mm/min].

Z : Constante ( $Z = 0.01$  mm/mm/min).

L : Portée [mm].

d : Epaisseur [mm]

### III.6.4 Calcul du module d'élasticité en flexion :

Le module d'élasticité en flexion est donné par l'expression suivante (ASTM D790) :

$$E_f = \frac{L^3 \times m}{4 \times b \times d^3} \quad (3.2)$$

$E_f$  : Module d'élasticité en flexion [MPa].

L : Distance entre les appuis (portée) [mm].

m : Pente de la droite reliant la force au déplacement [N/mm].

b : Largeur de l'éprouvette [mm].

d : Epaisseur de l'éprouvette [mm].

### III.7 Micro dureté:

La microdureté est une méthode d'essai mécanique qui permet de mesurer la dureté d'un matériau à une échelle très fine, généralement de l'ordre du micromètre. Elle s'effectue en appliquant une force constante sur la surface du matériau à l'aide d'un pénétrateur de forme standardisée (diamant pyramidal Vickers, bille sphérique, etc.), pendant un temps donné. La dureté est ensuite calculée en mesurant la surface résiduelle de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

Le duromètre MVK-H2 est un appareil utilisé pour mesurer la dureté des matériaux, en particulier les métaux. Ce type de duromètre fonctionne selon le principe de la méthode de Vickers, qui est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour tester la dureté des matériaux métalliques.

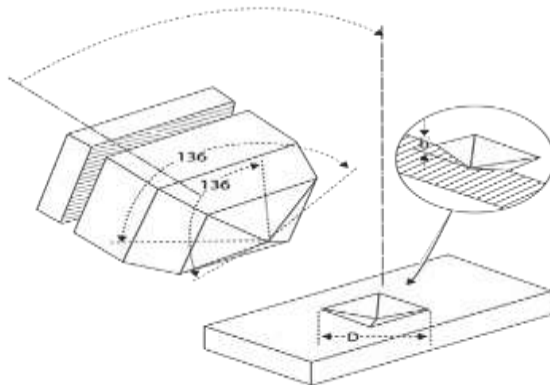


Figure III.32: Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme d'une empreinte.



*Figure III.33: duromètre MVK-H2*

### **III.8 La microscopie électronique à balayage (MEB):**

Dans ce cas, un faisceau d'électrons balaye la surface d'un échantillon. Les différents types d'électrons secondaires, rétrodiffusés et Auger émis par l'échantillon en réponse au faisceau d'électrons primaires, sont collectés et utilisés pour former l'image. La MEB fournit des informations sur la topographie de la surface de l'échantillon avec une résolution pouvant atteindre quelques nanomètres ( $10^{-9}$  m).

Le Tescan Vega3 SBH est un microscope électronique à balayage (MEB) polyvalent et performant conçu pour offrir des images haute définition et une analyse détaillée des échantillons dans divers domaines scientifiques et industriels. Équipé d'un canon d'électrons thermionique à filament de tungstène, il permet une excellente qualité d'image et une grande stabilité de faisceau. Le Vega3 SBH se distingue par sa flexibilité d'utilisation grâce à son système de vide variable, permettant l'observation d'échantillons non-conducteurs sans préparation complexe.



*Figure III.34: MEB Tescan Vega3 SBH*



*CHAPITRE IV:*  
*RÉSULTATS ET DISCUSSIONS*

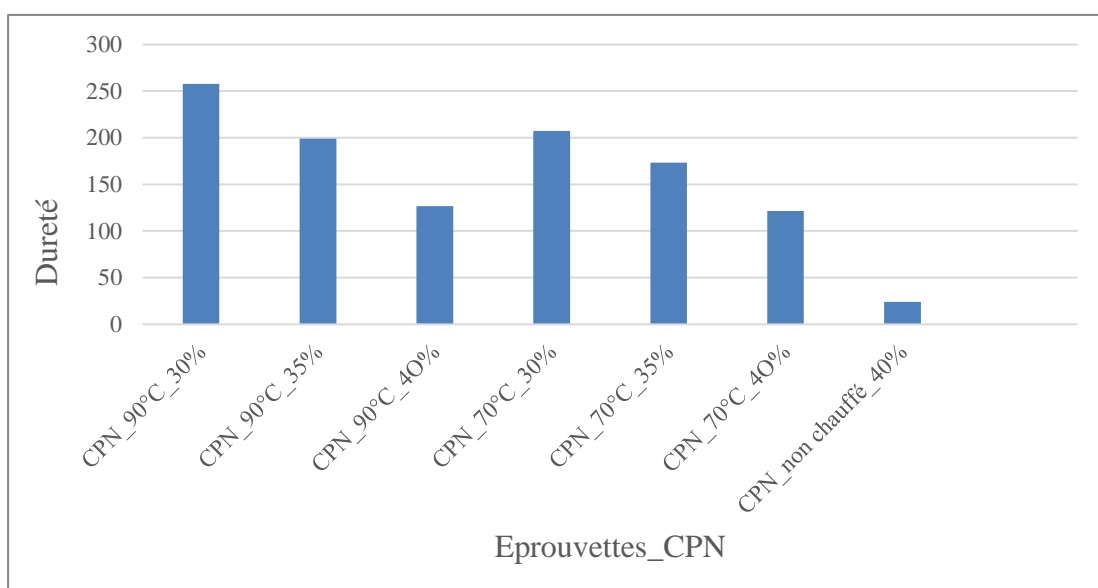
### IV.1 Essais de dureté :

Nous avons réalisé l'essai de microdureté sur des éprouvettes de FND/polyester est d'évaluer la distribution homogène des composants, d'analyser l'impact de l'ajout de FND sur les propriétés mécaniques du polyester, de déterminer les propriétés mécaniques locales, d'étudier la compatibilité entre les composants, ainsi que d'évaluer l'impact des températures et d'identifier les zones potentielles de faiblesse et de résistance du matériau composite. Le tableau représente les résultats du test de microdureté des éprouvettes CPN.

**Tableau IV.1:** Les résultats de test microdureté des éprouvettes CPN

CPN_50°C(16h)_90°C(1h)					Moy
30%	01	275.2	226.1	272.2	257.83
35%	02	164.7	150.9	281.6	199.06
40%	01	169.8	122.5	87.8	126.7
CPN_50°C(16h)_70°C(1h)					Moy
30%	/	154.2	209.8	257.2	207.066
35%	/	120	236	163.3	173.1
40%	/	171.9	90.9	101.6	121.46
40%	/	109.4	96.1	80.1	95.2
Non chauffé					Moy
35%	/	21	40.6	23.9	28.5

Les résultats des tests de microdureté sur des échantillons CPN ont montré des effets variables en fonction du pourcentage de poudre de noyau de datte et de la température de traitement. La dureté a été mesurée à l'aide de la méthode Vickers Hardness Test (VHT) pour des pourcentages de poudre de noyau de datte de 30 %, 35 % et 40 %, et à des températures de 50 °C pendant 16 heures, puis 90 °C durant une heure, et 50°C durant 16 heures, ensuite 70 °C durant une heure. Il a été observé que la dureté des échantillons augmente de manière significative lorsqu'ils sont chauffés à 90 °C par rapport à 70 °C. Cependant, l'augmentation du pourcentage de poudre de noyau de datte de 30 % à 40 % entraîne une diminution générale de la dureté.



**Figure IV.1:** Histogramme de dureté/Eprouvettes\_CPN

## IV.2 Courbes de flexion des éprouvettes CPN:

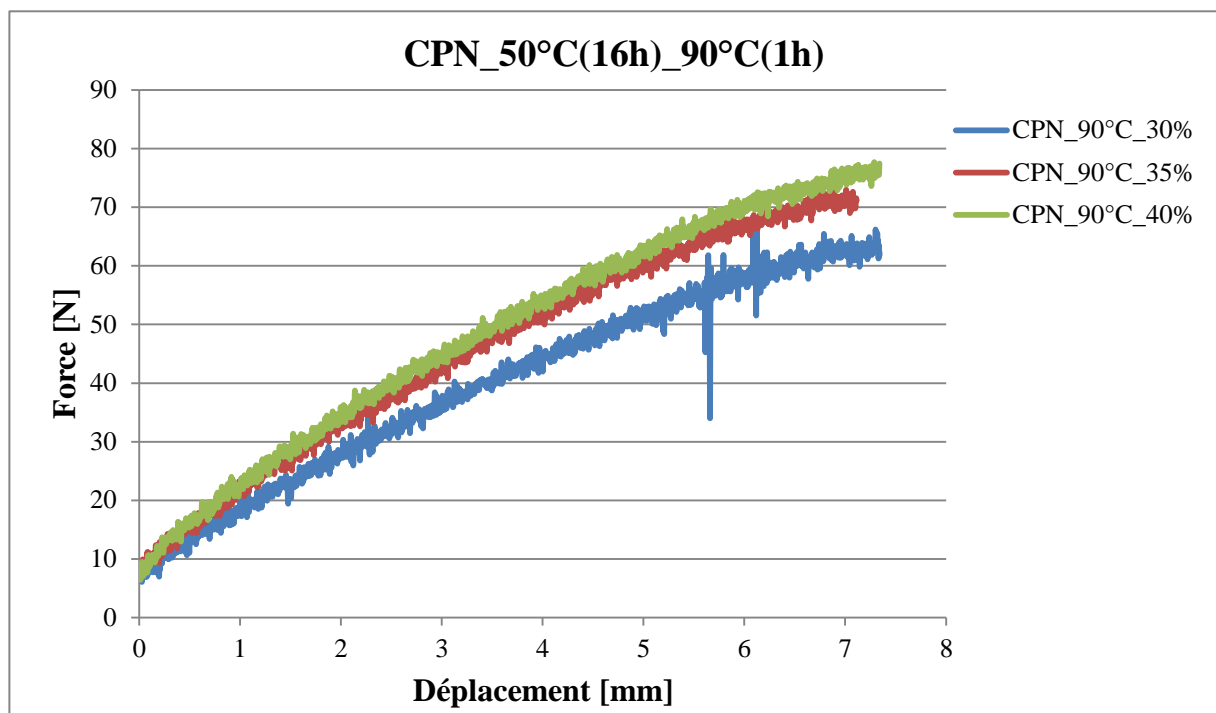
On considère le matériau préparé, un matériau isotrope et homogène afin d'appliquer la loi de Hook, afin de calculer les différentes propriétés mécaniques après l'essai de flexion 3 points.

- Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN 50°C (16h) 90°C (1h):

**Tableau IV.2:** Dimensions des éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_90°C(1h)

CPN_50°C(16h)_90°C(1h)					
Percentage de FND	N° des éprouvettes	Épaisseur d [mm]	Portée L [mm]	Largeur b [mm]	vitesse de sollicitation R (mm/min)
30%	01	5.8	92.8	19.8	2.47
35%	01	5.8	92.8	19.8	2.47
40%	01	5.8	92.8	19.8	2.47
<b>moy</b>	/	5.8	92.8	19.8	2.47

Nous avons réglé la portée et la vitesse de sollicitation à la valeur moyenne.



**Figure IV.2:** Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_90°C(1h)

En supprimant la partie non linéaire de ces courbes on obtient les courbes linéaires de la figure IV.3 (partie élastique). Les pentes "m" des différentes droites sont déterminées à partir des équations des courbes de tendances obtenues en utilisant le logiciel Excel.

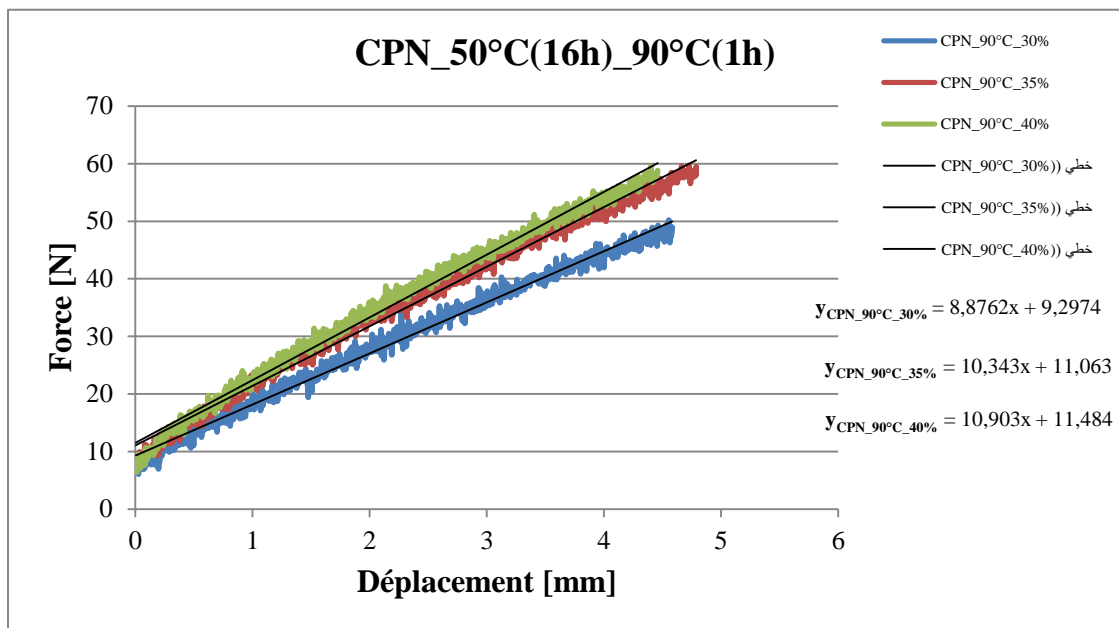


Figure IV.3: Partie linéaire de la courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_90°C(1h)

La relation (3.2) est alors utilisée pour la détermination des différents modules d'élasticité en flexion. Le tableau IV.3 résume les résultats obtenus.

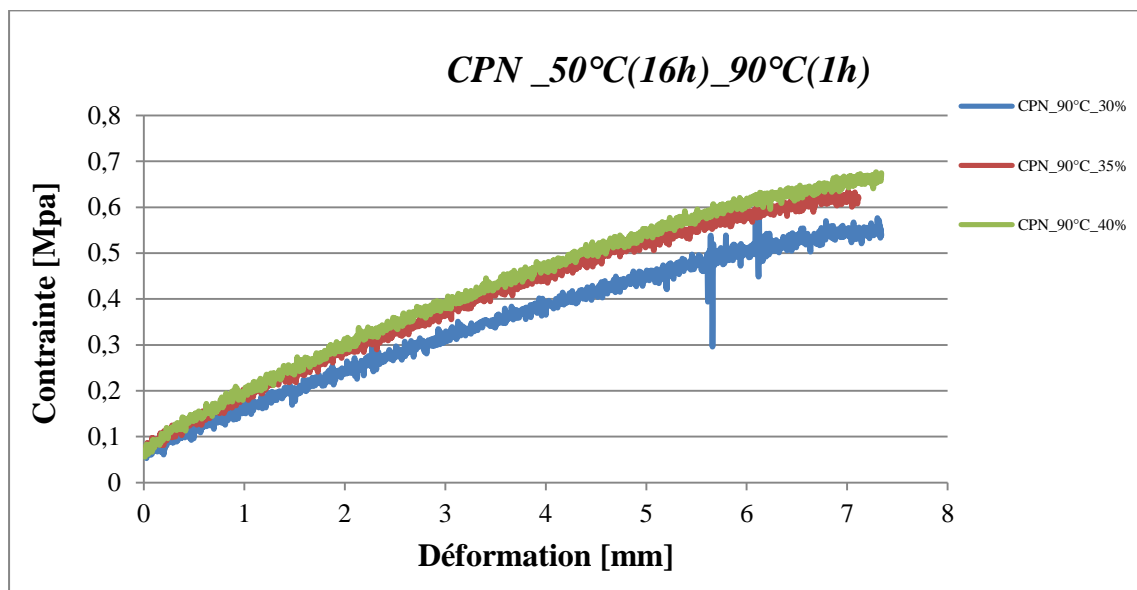


Figure IV.4: Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_90°C(1h)

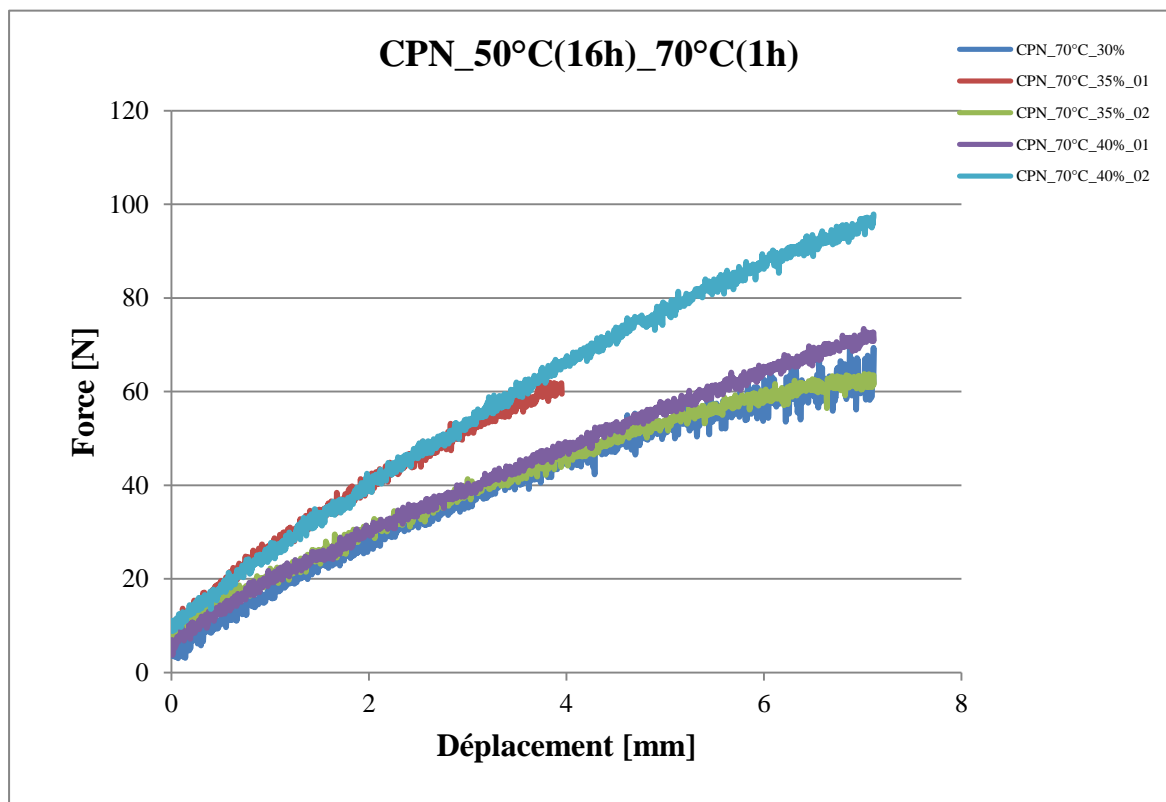
Tableau IV.3: Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_90°C(1h)

CPN_50°C(16h)_90°C(1h)		
Pourcentage de FND	N° des éprouvette	Module d'élasticité en flexion [MPa]
30%	01	459.76
35%	01	534.75
40%	01	563.71

- Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_50°C (16h)\_70°C (1h):

**Tableau IV.4:** Dimensions des éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_70°C(1h)

CPN_50°C(16h)_70°C(1h)					
Percentage de FND	N° des éprouvettes	Épaisseur d [mm]	Portée L [mm]	Largeur b [mm]	Vitesse de sollicitation R (mm/min)
30%	01	5.8	92.8	19.8	2.45
35%	01	5.8	92.8	19.8	2.47
	02	6.2	99.2	19.8	2.64
40%	01	7	112	19.8	2.98
	02	6.2	99.2	19.8	2.64
<b>moy</b>	/	6.2	99.2	19.8	2.63



**Figure IV.5:** Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_70°C(1h)

En supprimant la partie non linéaire de ces courbes on obtient les courbes linéaires de la figure IV.6 (partie élastique). Les pentes "m" des différentes droites sont déterminées à partir des équations des courbes de tendances obtenues en utilisant le logiciel Excel.

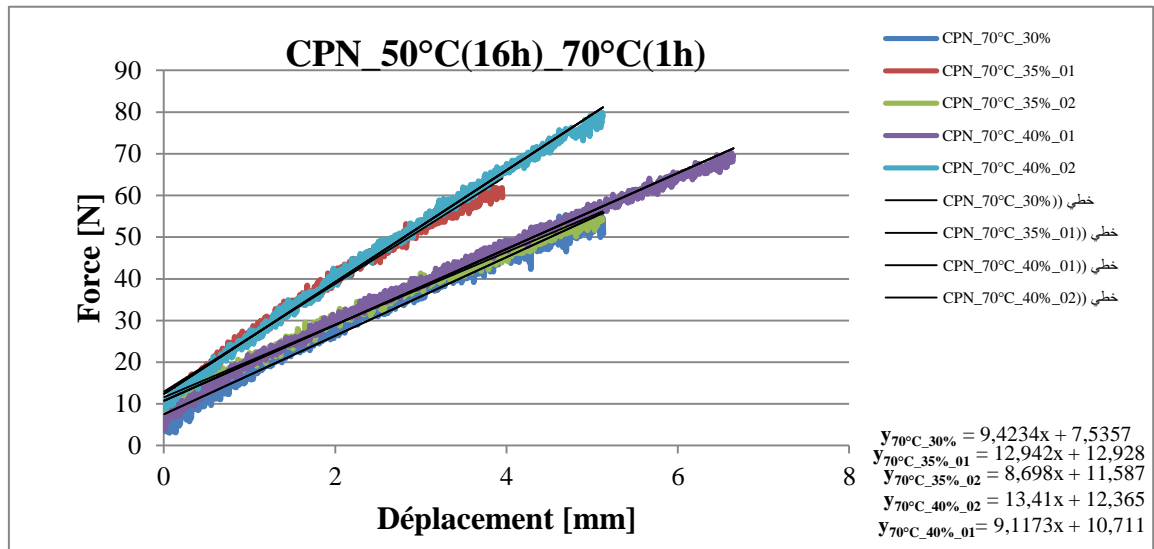


Figure IV.6: Partie linéaire de la courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_50°C (16h)\_70°C(1h)

La relation (3.2) est alors utilisée pour la détermination des différents modules d'élasticité en flexion. Le tableau IV.5 résume les résultats obtenus.

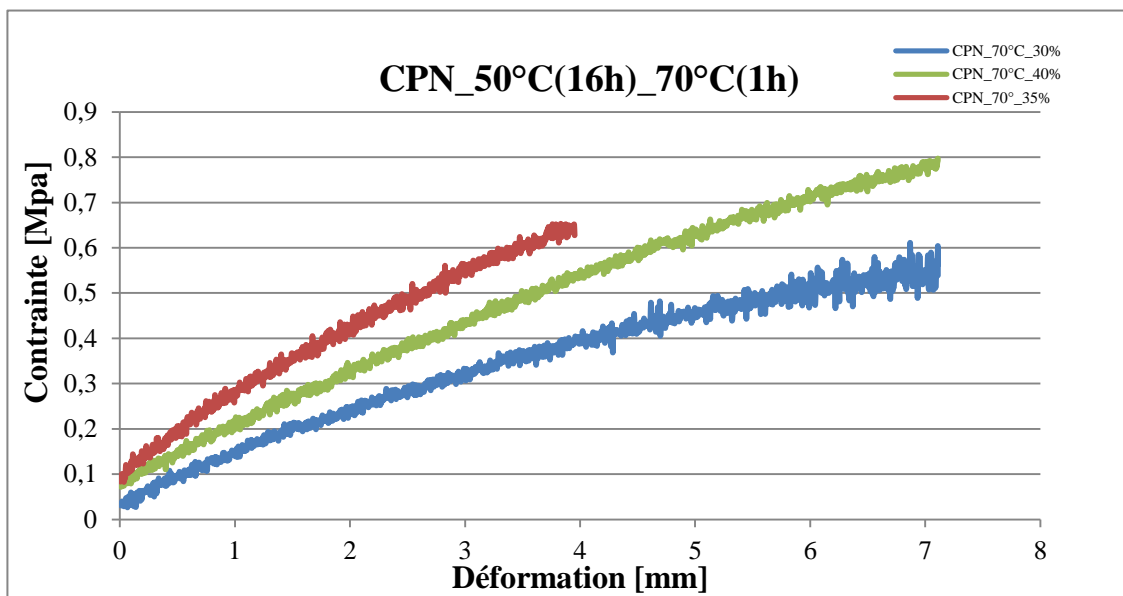


Figure IV.7: Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_70°C(1h)

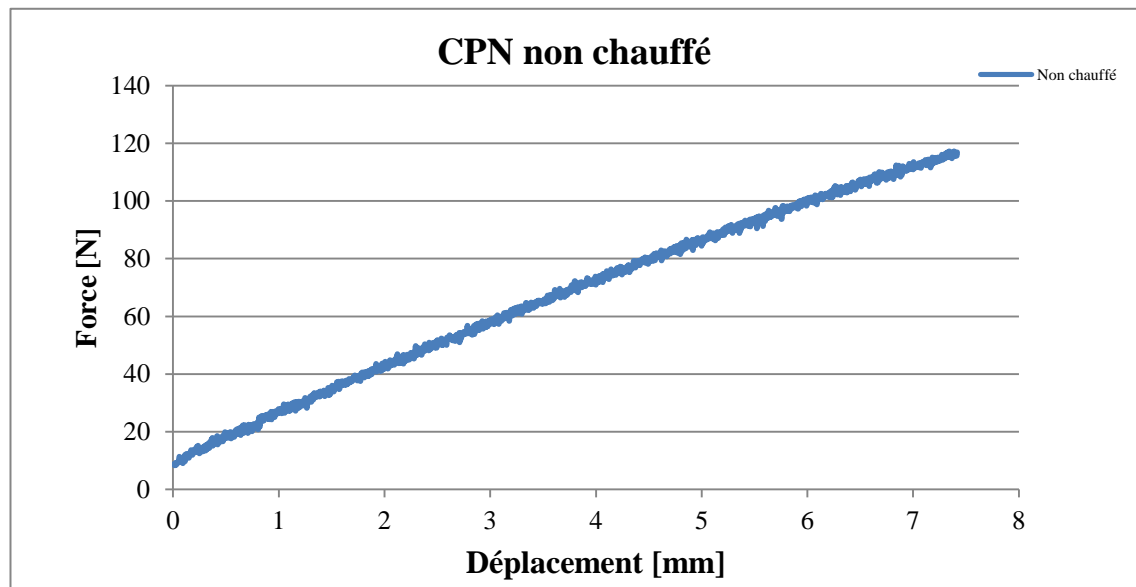
Tableau IV.5: Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CPN\_50°C(16h)\_70°C(1h)

CPN_50°C(16h)_70°C(1h)		
Percentage de FND	N° des éprouvette	Module d'élasticité en flexion [MPa]
30%	01	487.17
35%	01	669.22
	02	449.42
<b>Moy</b>	/	559.32
40%	01	693.53
	02	471.14
<b>Moy</b>	/	582.33

➤ Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_non chauffé\_40% :

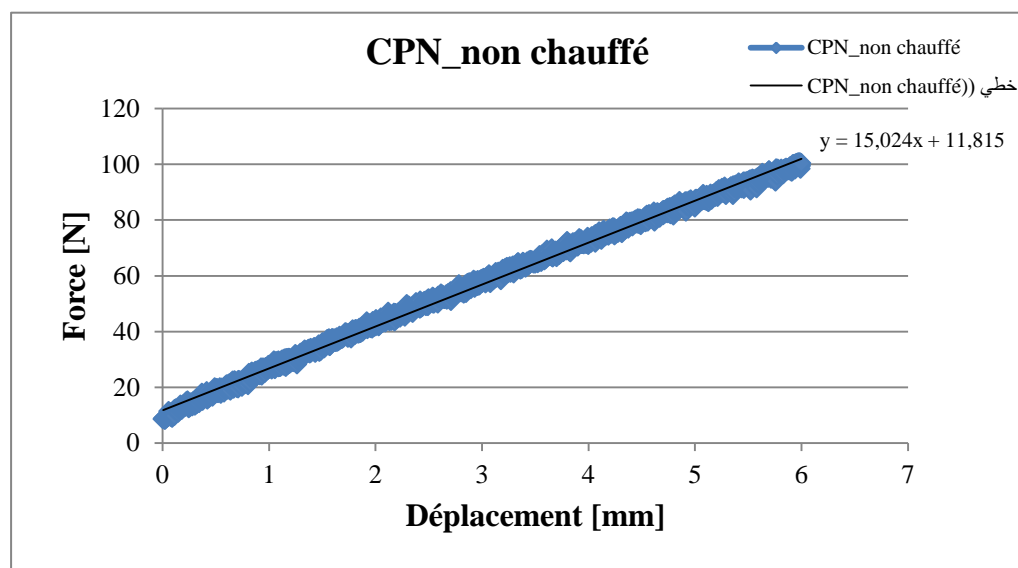
**Tableau IV.6:** Dimensions des éprouvettes CPN\_non chauffé

CPN_non chauffé					
Percentage de FND	N° des éprouvettes	Épaisseur d [mm]	Portée L [mm]	Largeur b [mm]	vitesse de sollicitation R (mm/min)
40%	01	5.8	92.8	19.8	2.47



**Figure IV.8:** Courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_non chauffé

En supprimant la partie non linéaire de ces courbes, on obtient les courbes linéaires de la figure IV.9 (partie élastique). Les pentes "m" des différentes droites sont déterminées à partir des équations des courbes de tendances obtenues en utilisant le logiciel Excel.



**Figure IV.9:** Partie linéaire de courbe force/déplacement pour les éprouvettes CPN\_non chauffé

La relation (3.2) est alors utilisée pour la détermination des différents modules d'élasticité en flexion. Le tableau IV.7 résume les résultats obtenus.

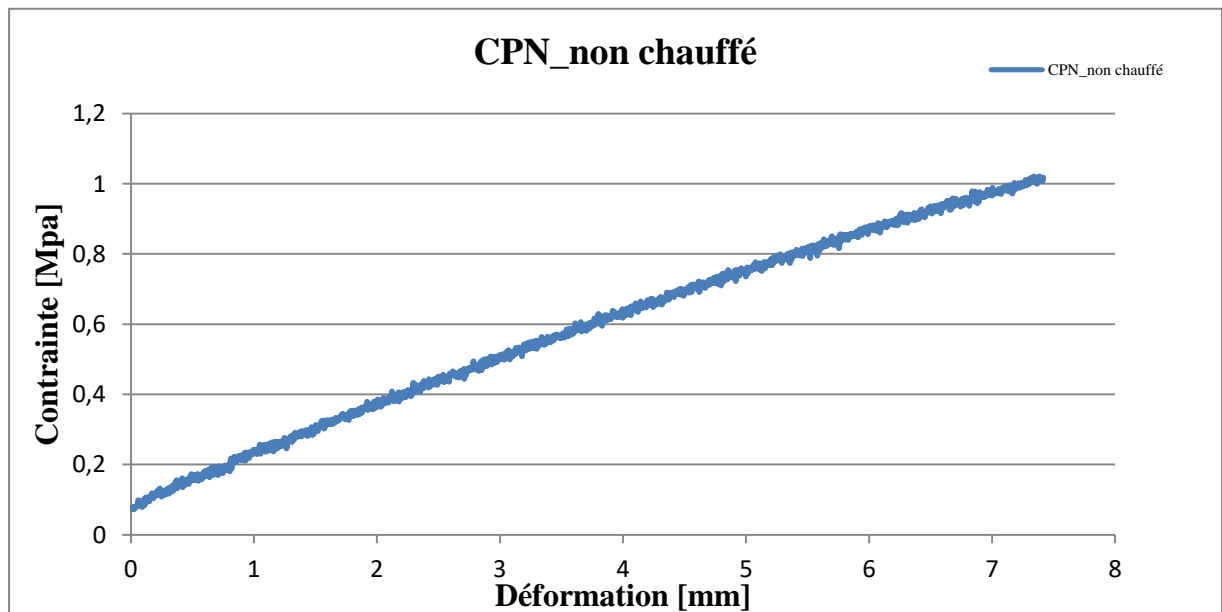


Figure IV.10: Courbe contrainte/déformation pour les éprouvettes CPN\_non chauffé

Tableau IV.7: Valeurs des modules d'élasticité pour les éprouvettes CNP non chauffé

CPN_non chauffé		
Pourcentage de FND	N° des éprouvette	Module d'élasticité en flexion [MPa]
40%	01	818.61

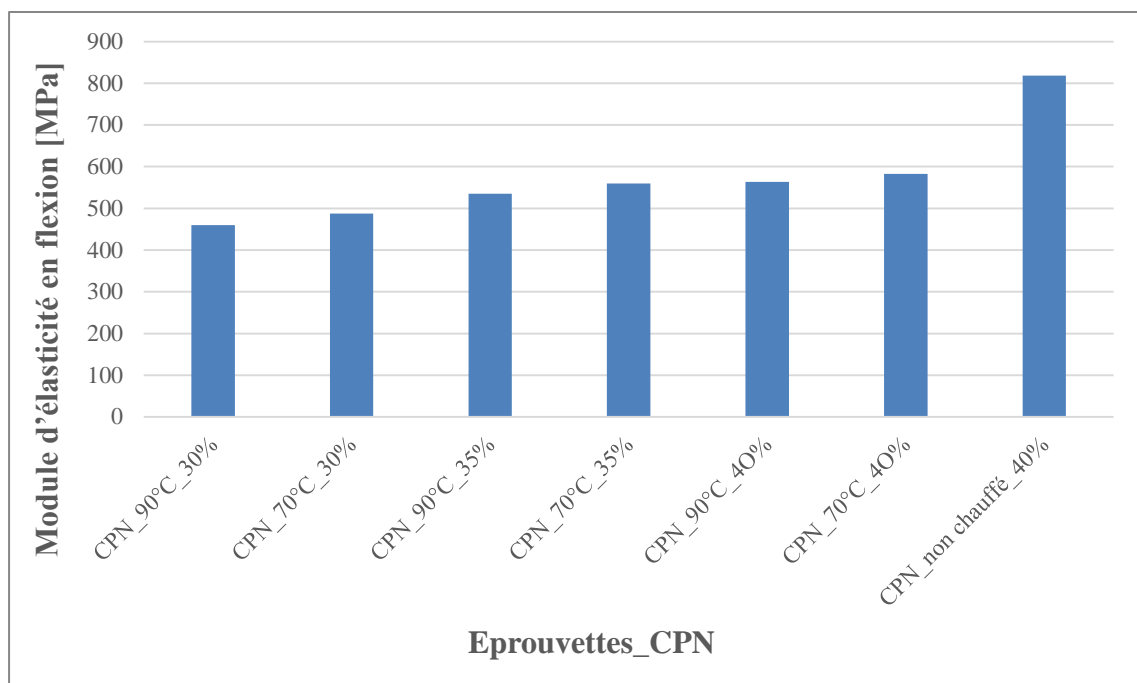


Figure IV.11: Histogramme de Module d'élasticité en flexion /Epreuves\_CP\_N

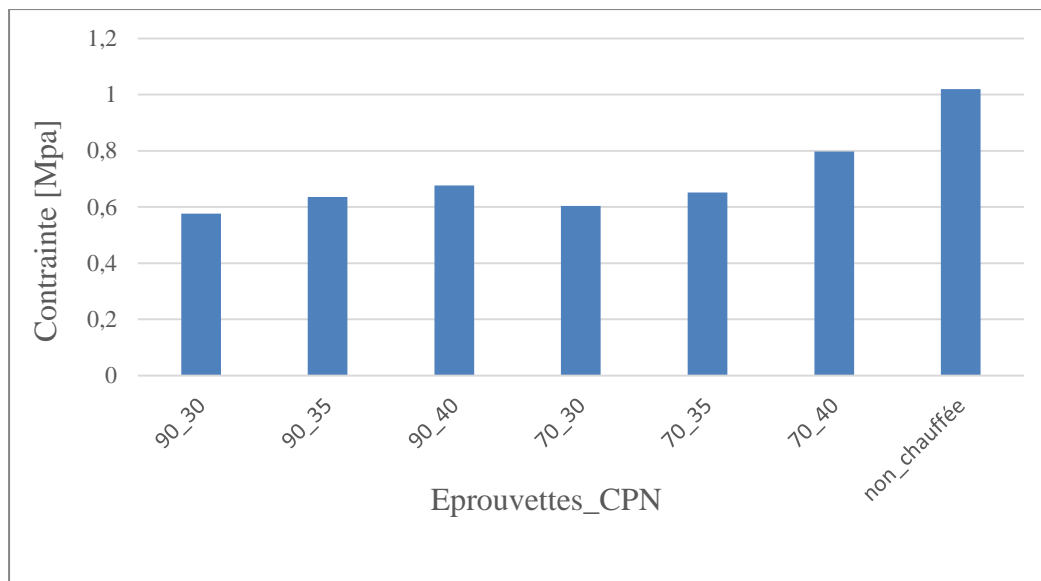


Figure IV.12: Histogramme de contrainte/Eprouvettes\_CPN



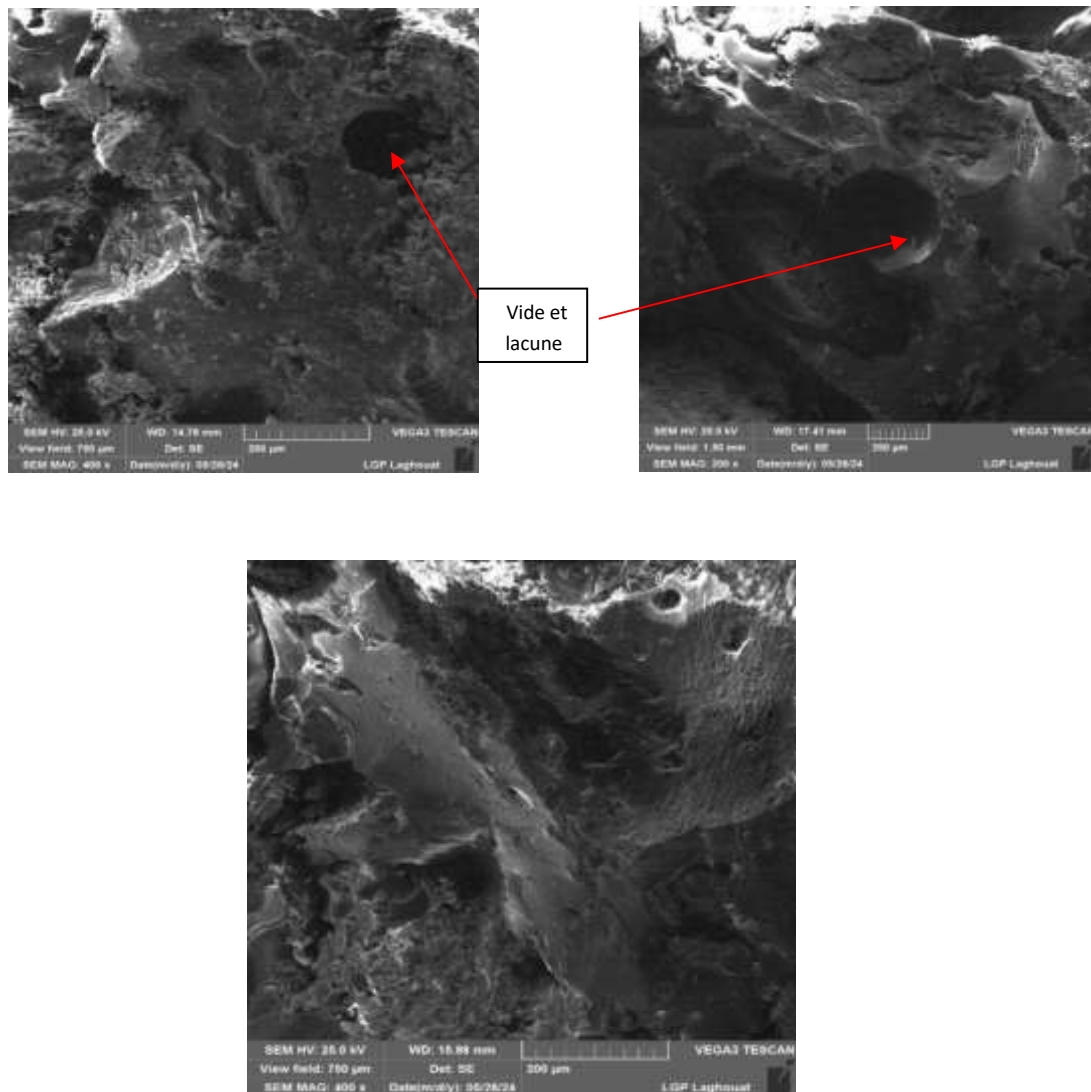
Figure IV.13: Éprouvettes après essai de flexion 3 points

### IV.3 Caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB):

➤ Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30 et 35, 40 % de renfort chauffés à 50 °C pendant 16 h, puis à 90 °C pendant 1 h:

Les figures IV.14 montrent la visualisation par MEB de trois échantillons de CPN avec différentes tailles de renfort (A1, B1 et C1). Les figures donnent des informations utiles sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau CPN. Les figures montrent une répartition aléatoire des fibres dans la matrice pour tous les échantillons. Les fibres poudre (A1) sont complètement recouvertes par la matrice et forment un matériau homogène avec peu de défauts. Dans ce cas, une bonne interface fibre-matrice est obtenue.

L'augmentation de la taille de la fibre (de B1 à C1) a un effet négatif sur l'homogénéité et sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice. Les figures IV.14 (B1 et C1) montrent que la matrice apparaît avec plus d'agrégation sur les surfaces de la fibre sans enduire les surfaces entières des fibres de taille moyenne et grande. Ceci peut être dû à la méthode de préparation des échantillons CPN obtenue en mélangeant la matrice (polyester) et le renfort. Dans ce cas, l'hétérogénéité de la morphologie de la fibre constitue la principale cause de l'hétérogénéité du matériau CPN. En effet, cette hétérogénéité rend l'opération de mélange plus difficile, ce qui favorise la présence de défauts et de vide dans le produit final.

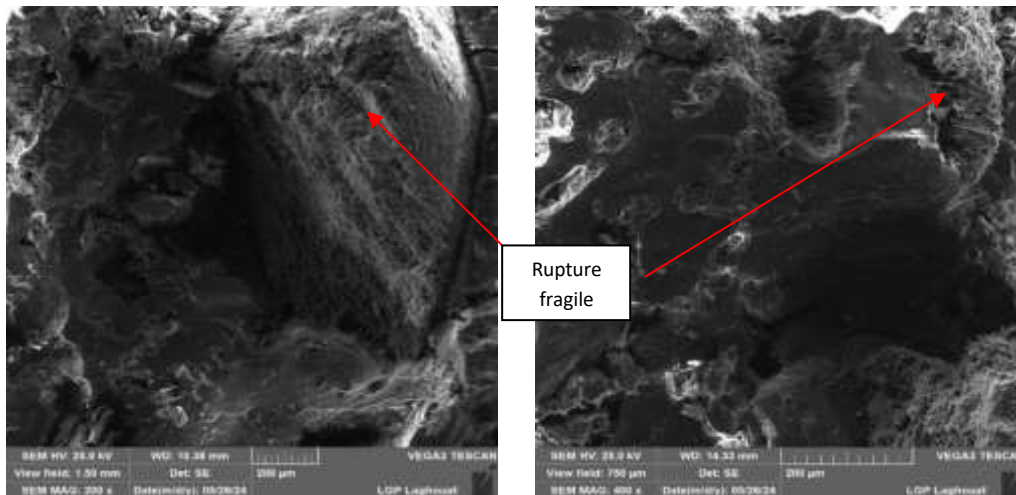


**A1: 30% ,90°C, B1 : 35% 90°C, C1 : 40% 90°C**

**Figure IV.14:** Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30, 35 et 40 % de renfort (A1, B1 et C1) Chauffé à 90 °C (A2, B2).

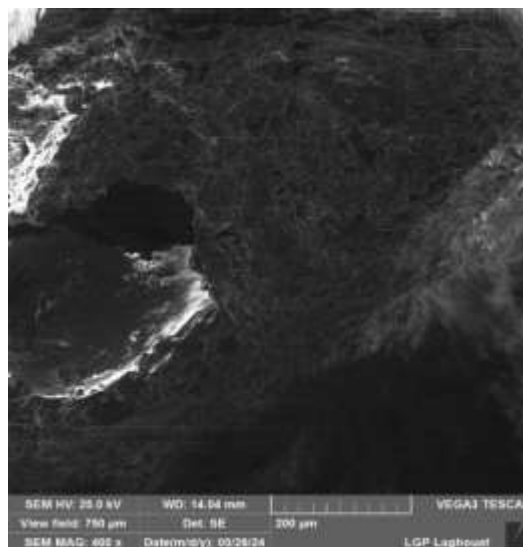
En conclusion, l'amélioration de l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau CPN est inversement proportionnelle à la taille du renfort. Ce résultat confirme les résultats de la caractérisation mécanique discutée ci-dessus.

➤ Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30 et 35 %, 40 % de renfort chauffés à 50 °C pendant 16h, puis 70 °C durant 1 h:



**Figure IV.15:** Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 30 et 35 % de renfort, Chauffé à 70 °C (A2, B2).

A2: 30%, 70°C, B2: 35% 70°C, C2: 40% 70°C



**Figure IV.16:** Visualisation par MEB d'échantillons CPN avec 40 % de renfort, chauffé a 70°C (C2)

Les figures IV.15 montrent la visualisation par MEB d'échantillons "A2, B2", avec 30, 35 % de renforcement, qui ont la même taille du renfort (0,1-0,315 mm). Les figures IV.15 montrent clairement que les fibres sont bien enrobées dans tous les échantillons. On peut observer que la visualisation de l'échantillon A2 montre des fibres, réparties aléatoirement dans la matrice, enrobées par la matrice avec un bon état d'adhésion avec moins de vide que les échantillons A1, B1, C1.

Aussi les visualisations de la figure IV.16 montrent un bon état d'adhésion des interfaces fibre-matrice pour tous les échantillons "C2" à 40 % de fibres dû à l'augmentation du pourcentage massique des fibres de dattes, avec une rupture fragile due à la rigidité des éprouvettes après un chauffage long de 16 heures.

En conclusion, l'état d'adhérence des interfaces fibre-matrice est amélioré en diminuant la température de réticulation. Cette amélioration de l'état d'adhésion explique et confirme les résultats des caractérisations mécaniques des échantillons avec les travaux précédents. [36]

#### IV.4 Conclusion générale:

Afin de promouvoir l'utilisation des déchets dans la construction civile et mécanique, deux nouveaux matériaux composites à base de déchets de composantes végétales sont développés et étudiés. Le premier composite thermodurcissable est élaboré à partir de la plante grappe de palme utilisée comme renfort. La matrice est obtenue en faisant durcir la résine thermodurcissable qui est le polyester. Le deuxième composite thermodurcissable est basé sur les déchets des fruits de palmiers dattiers (noyaux des dattes), utilisés sous forme de particules comme renfort et de la résine polyester comme matrice.

Le premier composite, à base des déchets de fibre de palme et du polyester, utilise comme fibres le palmier qui pousse dans le sud algérien comme renfort. Malheureusement, après le traitement chimique de la fibre, on n'a pas pu fabriquer ce composite à cause du manque de moyens pour élaborer un matériau homogène et prêt à l'utilisation.

Pour le deuxième composite (particules de noyaux des dattes et polyester), les particules sont mélangées avec différentes fractions massiques comprises entre 30 % et 40 % (70/30, 65/35 et 60/40 %) afin d'étudier l'effet de la fraction massique du renfort sur les propriétés mécaniques du composite, et chauffées à des températures de 70 et 90 °C (après un chauffage à 50 °C pendant 16 heures). Du point de vue cohésion matrice/renfort, le matériau obtenu est généralement plus ou moins homogène. Des essais de flexion à trois points sont effectués afin d'analyser le comportement mécanique à la fois de la matrice pure et du composite. Cependant, les résultats obtenus ont montré une amélioration du module de flexion et de la résistance à la flexion pour une quantité supérieure ou égale à 40 % de renfort. À partir de ce niveau de renforcement, le matériau composite devient de plus en plus fragile selon des études précédentes.

Les mesures ont montré que la dureté du matériau CPN est augmentée avec la diminution du module de flexion E du matériau, d'où contrairement à la résistance à la flexion, ce qui implique son utilisation potentielle en tant que matériau de substitution, en particulier pour les pays ayant de nombreuses oasis de palmiers dattiers. On peut envisager une multitude d'applications potentielles du CPN vu sa densité, notamment si les propriétés mécaniques sont acceptables.

D'autre part, les résultats obtenus par SEM ont montré l'influence de la taille de la fibre et de la quantité de la matrice sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau CPN. Il a été trouvé qu'une bonne adhérence peut être obtenue en utilisant de petites fibres. De plus, afin de préserver une bonne morphologie des fibres et d'assurer une bonne interface fibre-matrice, le processus de préparation du composite doit être amélioré. Il est important de noter que le matériau (CPN) est un matériau isolant, renouvelable, obtenu à partir de déchets, et qu'il peut être totalement utilisé comme isolant thermique et électrique.

Les résultats des essais de flexion montrent que la contrainte maximale du matériau CPN reste relativement faible. Pour cette raison, on recommande d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau CPN par l'amélioration du protocole de préparation. En outre, d'autres possibilités peuvent être envisagées, telles que le renforcement du CPN par un autre matériau pour obtenir un matériau hybride, multicouche ou un panneau sandwich. Les mesures de conductivité thermique montrent que la conductivité thermique du matériau CPN est étroitement liée à la teneur en fibres et à la taille du renforcement et qu'elle est inversement.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **M. Oumsalem**, « Effet du taux et de la taille des fibres lignocellulosiques sur les propriétés diélectriques des composites ( pvc/diss) », ummto, 2016
- [2] **M. Salih** " Valorisation des déchets comme constituants des bio-composites ».2018.
- [3] **Djebbloun Youcef** «Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites" (2004).
- [4] **A. Chevalier** "Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale. 32, 1952, 355, 205-236 ".
- [5] **M.Walid Azier**, "Etude comparative de trois pieds mâles de palmier dattier (Phoenix dactylifera L.) et l'impact de leurs pollens sur quelques caractéristiques physicochimiques des dattes, dans la région d'El Maleh (Biskra). mémoire d'ingénieur d'état en Agronomie à l'université de Biskra "2007.
- [6] **Bellabes. Abderrahmane Ghazi. Ali**, "Analyse de défaillance d'une articulation en composite "2020.
- [7] **M. Amine, B. Henni, et H. D. Tahar**, « contribution a l'étude de la vibration des plaques en materiaux composites sous chargements mecanique et thermomecanique », 2020.
- [8] **M. Debbache**, "De la conception a la réalisation d'une pale éolienne en materiaux composites" 2012.
- [9] **R. Ouadday** « Étude des structures sandwichs verre/époxy de grandes épaisseurs utilisées comme extension d'avant directrices de turbines hydroélectriques », août 2013. Consulté le: 23 mai 2024.
- [10] **H. Manel**, « étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère », 2011.
- [11] « Memoire Online - Etude du comportement mécanique des matériaux composites destinés à l'aéronautique - **Asma Bessaad** ».
- [12] **S. Belhenini**, « Matériaux Composites Notes de cours ».
- [13] **M. Abida**, « Comportement hygroscopique et couplage hygromécanique dans les composites lin / époxy : approche expérimentale multi-échelle et modélisation. », 2018.
- [14] **Page. J**, « Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée », 2017
- [15] **F. Michaud**, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au postformage », 2003
- [16] **A. Nenonene**, « Élaboration 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 », phd, 2009.

- [17] **J. Biagiotti, D. Puglia, et J. M. Kenny**, « A Review on Natural Fibre-Based Composites-Part I », *Journal of Natural Fibers*, oct. 2004
- [18] « Les particularités de la cellule végétale ». Disponible sur: <https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/biologie-physiologie-vegetale/chap1b/Chapitre-3/Sous-section-3-1-2.html>
- [19] **G. Markovic, V. P. M.**, « Chapter 2 Cellulose Based Rubber Nanocomposites », 2017.
- [20] **A. Bendahou, Y. Habibi, H. Kaddami, et A. Dufresne**, « Physico-Chemical Characterization of Palm from Phoenix Dactylifera-L, Preparation of Cellulose Whiskers and Natural Rubber-Based Nanocomposites », *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 3, p. 81-90, mars 2009
- [21] **T. Leplanois**, « Étude par les éléments finis du module d'Young selon les caractéristiques des fibres élémentaires de chanvre et de coco », sept. 2017.
- [22] **M. Dallel**, « Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*): caractérisation physico-chimique de la fibre au fil », déc. 2012.
- [23] **M. Haddad.**, « Propriétés de transport des matériaux hétérogènes à renfort naturel », Thesis, UB1, 2015.
- [24] **J. Hernández Beltrán, I. Hernandez De Lira, M. Cruz-Santos, A. Saucedo-Luevanos, F. Hernández-Terán, et N. Balagurusamy**, « Insight into Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass to Increase Biogas Yield: Current State, Challenges, and Opportunities », *Applied Sciences*, vol. 9, p. 3721, sept. 2019.
- [25] **I. Nanou et H. Yousfi**, « Etude comparative sur les composites a fibres du palmier dattier »,
- [26] **A. Saaidia**, « Thèses-Algérie: Doctorat, Magister, Master... » *Thèses de doctorat en Génie mécaniques, l'université du 8 MAI 1945 GUELMA*, 2018.
- [27] **F. Ben abbes**, « Etude de quelques propriétés chimiques et biologiques d'extraits de dattes « *Phoenix dactylifera L.* » ».
- [28] « Le secteur phoenicicole algérien : situation et perspectives à l'horizon 2010 | Raddo ».
- [29] **H. Zenchi et F. Abdoun**, « Palmier-dattier : Botanique et écologie », *Encyclopédie berbère*, no 37, Art. no 37, janv. 2015.
- [30] **M. Ait-El-Mokhtar**, « Rôles des champignons mycorhiziens arbusculaires autochtones et du compost dans l'amélioration de la tolérance du palmier dattier au stress salin », 2020.
- [31] « Statistiques | FAO | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ».
- [32] **EL. Benmehdi, R. Mebarki, et A. / P. Boulal**, « Valorisation des noyaux de dattes par production de bioénergie dans la région d'Adrar », Thesis, Université Ahmed Draïa -Adrar, 2019.

## Références bibliographiques

---

[33] **M. Alma'adeed, R. Kahraman, P. N. Khanam, ET S. Al-ma'adeed**, « Characterization of untreated and treated male and female date palm leaves », *Materials & Design*, vol. 43, p. 526-531, oct. 2012.

[34] **Z. Boussena et M. Khali**, « Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil] », *Nutr. Santé.*, vol. 5, n° 2, p. 100-106, déc. 2016.

[35] **Z. Boussena et M. Khali**, « Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil] », *Nutr. Santé.*, vol. 5, n° 2, p. 100-106, déc. 2016.

[36] **M Tahar**, «Contribution au développement des matériaux de construction à base des sous-produits du palmier dattier` Thèse Université Mohamed Khider – Biskra, » Juillet 2018