



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Génie mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :

**Lasaad NINOUH**

Le : mercredi 10 juillet 2019

## **Caractérisation d'un bio-composite polypropylène/fibres de palmier dattier en flexion trois points**

---

### **Jury :**

Dr. Nouredine DRIAS	MCB	Université de Biskra	Président
Dr. Youcef DJEBLOUN	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. Hocine DJEMAI	MCB	Université de Biskra	Examineur

# Dédicace

*A mes parents,  
Mes frères et ma sœur,  
Mes collègues et mes amis.*

# *Remerciements*

---

## *Remerciements*

*En premier temps, je remercie dieu Allah tout puissant de m'avoir accordé le courage pour accomplir ce modeste travail.*

*Je remercie mon Rapporteur Docteur Youcef DJABLOUN qui m'a proposé ce sujet et qui m'a bien guidé tout le long de ce travail. Sans oublier mon Co -Rapporteur Mr : Tarek DJOUDI pour son conseil et son expérience dans ce domaine.*

*Enfin je remercie tous les enseignants du département de génie mécanique de l'université de Mohamed KHIDER de Biskra.*

*Lasaad NINOUH*

# Sommaire

---

Remerciement.....	ii
Liste des symboles.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux .....	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites	
Introduction .....	4
I. Généralité sur les matériaux composites .....	4
I.1. Définition .....	4
I.2. Constituent des matériaux composites.....	5
I.2.1. Matrice .....	5
a. Matrices thermodurcissables .....	5
b. Matrices thermoplastiques .....	6
I.2.2. Renforts .....	6
a. Classification des renforts .....	6
I.2.3. Renforts végétaux.....	7
I.3.1. Classification des fibres végétales.....	7
a. Les fibres des feuilles.....	7
b. Les fibres des tiges.....	7
c. Les fibres des bois.....	7
d. Les fibres des surfaces .....	7
I.3.2. Processus d'extraction des fibres .....	7
I.4. Classification des composites .....	8
I.5. Matériaux Composites Bio-Sources .....	9
I.5.1. Définition .....	9
I.5.2. Avantages et inconvénients des bio-composites .....	9
I.6. Procédés de fabrication de composite bio-sources .....	9
I.6.1. L'injection .....	9
I.6.2. La thermo-compression.....	10
I.7. Domaines d'utilisation.....	11
Références .....	13

---

# Sommaire

---

## Chapitre II : Comportement élastique des matériaux composites

Introduction .....	18
II.1. Généralité sur le comportement élastique du matériau composite.....	18
II.1.1. Elasticité linéaire .....	18
II.1.2. Matériau anisotrope .....	19
II.1.3. Matériau monoclinique.....	19
II.1.4. Matériau orthotrope .....	20
II.1.5. Matériau unidirectionnel.....	21
II.1.6. Matériau isotrope.....	22
II.2. Modules de l'ingénieur .....	22
II.2.1. Pour un composite unidirectionnel .....	22
a. Traction longitudinale.....	23
b. Traction transverse .....	23
c. Cisaillement longitudinal.....	24
d. Cisaillement transverse.....	25
II.3. Flexion trois point « Approche théorique » .....	25
Références .....	27

## Chapitre III : Matériaux et caractérisation mécanique

Introduction .....	29
III.1. Matériaux et essais mécanique.....	29
III.1.1. Matériaux .....	29
III.1.2. Présentation du matériau .....	29
III.1.3. Préparation des éprouvettes.....	31
III.1.2. Essais de Flexion 3 points .....	33
a. Principe .....	33
b. Machine de Flexion .....	34
III.2. Résultat et discussion .....	35
Références .....	47
Conclusion générale.....	49

# Les symboles

Liste

## Liste des symboles

F	Force	N
$\varepsilon$	Déformation	%
$\varepsilon_{\max}$	Déformation maximal	%
$\varepsilon_{\text{moy}}$	Déformation moyen	%
$E_{e,t}$	Déformation écartype	%
$\sigma$	Contrainte	Mpa
$\sigma_{\max}$	Contrainte maximal	Mpa
$\sigma_{\text{moy}}$	Contrainte moyen	Mpa
$\sigma_{e,t}$	Contrainte écartype	Mpa
L	Longueur	mm
K	La rigidité à la flexion	N/mm
E	Module de Young	Mpa
$E_{\text{moy}}$	Module de Young moyen	Mpa
$E_{e,t}$	Module de Young écartype	Mpa
$\nu$	Coefficient de poisson	
$\nu_{LT}$	Coefficient de poisson longitudinal transversal	
$\nu_{TL}$	Coefficient de poisson transversal longitudinal	
$\lambda$ et $\mu$	Coefficient de Lamé	Mpa
$X_1, X_2, X_3$	Direction cartésien	
L, T, T'	Direction des fibres	
C	Tenseur de rigidité	Mpa
S	Tenseur de souplesse	Mpa <sup>-1</sup>

# Les figures

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

Figure I.1 : Matériau composite.....	4
Figure I.2 : Différents types de matrice. ....	5
Figure I.3 : Classification des Renforts.....	7
Figure I.4 : Techniques d'extraction des fibres végétales.....	8
Figure I.5 : Classification schématique des différents types de composites.....	9
Figure I.6 : Presse pour injection de granulés pré-renforcés. ....	10
Figure I.7 : Presse de thermo-compression.....	11
Figure I.8 : Utilisation des fibres naturelles avec des bio composites.....	12
Figure I.9 : Pièces élaborées en matériaux composites à fibres végétales Mercedes Benz A-Class .....	13
Figure I.10 : Réalisation des pièces renforcées par des fibres végétales .....	13

### Chapitre II : Comportement élastique des matériaux composites

Figure II.1: Plan de symétrie.....	19
Figure II.2 : Couche de matériau composite orthotrope .....	20
Figure II.3 : Composite unidirectionnel.....	21
Figure II.4 : La rigidité à la flexion K.....	25
Figure II.5 : Essais de flexion trois points .....	26

### Chapitre III : Matériaux et caractérisation mécanique

Figure III.1 : Palme de palmier dattier.....	29
Figure III.2 : Extrudeuse.....	30
Figure III.3 : Presse de compression à chaud. ....	30
Figure III.4 : Matériaux composite sous forme des plaques.....	30
Figure III.5 : Dimensions des éprouvettes. ....	31
Figure III.6 : Guillotine CIDAN .....	32
Figure III.7 : Les éprouvettes finaux.....	33
Figure III.8 : Flexion 3 points .....	33
Figure III.9 : Appareille INSTRON modèle 5969.....	34
Figure III.10 : Les éprouvettes après l'essai de flexion.....	35
Figure III.11 : Charge - Déplacement PPV*00%. ....	36
Figure III.12 : Charge - Déplacement PFR *04%.....	36
Figure III.13 : Charge - Déplacement PFR *07%.....	37
Figure III.14 : Charge - Déplacement PFR *10%.....	37

# Les figures

## Liste

---

Figure III.15 : Charge - Déplacement PFR*15%.....	38
Figure III.16 : Charge - Déplacement Vf= 0 - 15%.....	38
Figure III.17 : Contrainte maximale et Déformation maximale .....	40
Figure III.18 : Contrainte - Déformation Vf= 00%. .....	40
Figure III.19 : Contrainte - Déformation Vf= 04%. .....	41
Figure III.20 : Contrainte - Déformation Vf= 07%. .....	41
Figure III.21 : Contrainte - Déformation Vf= 10%. .....	42
Figure III.22 : Contrainte - Déformation Vf= 15%. .....	42
Figure III.23 : Contrainte - Déformation Vf= 00-15%. .....	43
Figure III.24 : Module d'Young des différentes fractions massiques de composite. ....	44
Figure III.25 : Contrainte Max (MPa) -Déformation Max (%) des différents fractions massiques de composite.....	45
Figure III.26 : Module d'Young des différents types des composites de fraction massique 04%. .....	45
Figure III.27 : Propriété mécanique des différents types des composites de fraction massique 04%. .....	46



# *Les tableaux*

*Liste*

---

## **Liste des tableaux**

### Chapitre III : Matériaux et caractérisation mécanique

Tableau III.1 : propriétés de POLYPROPYLENE .....	29
Tableau III.2 : Dimensions des éprouvettes pour essais de flexion. ....	31
Tableau III.3 : Dimensions des éprouvettes pour essais de flexion selon h et b.....	32
Tableau III.4 : Caractiristiques des éprouvettes (Module de Young).....	39
Tableau III.5 : Caractiristiques des éprouvètte (Contrainte et Déformation). ....	44

---

*Introduction*  
*générale*

---

### Introduction générale

Ces dernières années, les composites se sont énormément développés et impliqués dans de nombreux secteurs : aéronautique, automobiles, bâtiment... Toutefois face à des contraintes économiques et environnementales toujours plus exigeantes, l'utilisation des renforts végétaux dans les composites à matrice organique (thermodurcissable et thermoplastique) apparaît aujourd'hui comme une alternative de choix. L'intérêt pour ces fibres réside notamment dans leurs bonnes propriétés spécifiques: biodégradabilité, renouvelable, faible densité et coût. La recherche sur le sujet s'est ainsi fortement dynamisée au cours de ces dernières années et un certain nombre de produits commencent à apparaître sur le marché (balustrades, bardage, palettes, fenêtres...). De nouvelles applications et des composites plus performants sont déjà anticipés, mais les connaissances restent insuffisantes et des études doivent être menées afin de mieux comprendre certains mécanismes.

Plusieurs fibres naturelles ont été proposées comme substituant aux fibres végétales parmi lesquelles le chanvre, le lin, le jute, le sisal, l'alfa et le palmier dattier... . Nous nous intéresserons dans cette étude aux fibres de palmier dattier qui constitue l'une des richesses végétales les plus abondantes dans nos région et qui de nos jours, restent peu exploitées. En effet, les travaux annuels d'entretien des palmiers dattiers génèrent des quantités importantes de déchets composés essentiellement de palmes qui peuvent être utilisés comme renfort fibreux dans les composites. Nous tenterons à travers ce travail de valoriser ces déchets agricoles et leur utilisation comme renfort dans les biomatériaux composites à base de polypropylène.

Le but de cette étude a caractérisé des biomatériaux composite à base de polypropylène renforcé de fibres courtes de rachi de palme de palmier dattier de notre région (Biskra). Ce matériau a été moulé par la technique de mise en oeuvre thermo-compression. Plusieurs plaques ont été élaborées avec différentes fractions massiques de fibres. Enfin, des essais de flexion trois ont été réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques de ces matériaux. Par la suite, nous avons comparé nos résultats par des autres travaux.

Pour mener à terme ce projet, nous avons structuré ce travail en trois chapitres suivants:

#### CHAPITRE I : Généralité sur les matériaux composites

Généralités sur les matériaux composites, dans ce chapitre, on donne un aperçu sur les matériaux composites d'une manière générale. Par la suite, Nous avons consacré la dernière partie de ce chapitre aux biomatériaux composites, procédés de fabrication et domaines d'utilisation.

#### CHAPITRE II : Comportement élastique des matériaux composites

Comportement élastique des matériaux composites, ce chapitre est mené l'étude du comportement élastique des matériaux composites.

Une présentation de la théorie de l'essai de flexion trois point.

### CHAPITRE III : Matériaux et caractérisation mécanique

Matériaux et caractérisation mécaniques, dans ce chapitre il ya trois parties : A la première partie, nous avons présenté le matériaux composite, leurs constituants et leur élaboration. A la deuxième partie, nous avons découpé les plaques composites pour mener des éprouvettes rectangulaire normalisés. A la troisième partie, nous avons déterminé les propriétés mécaniques : module de young, déformation maximal et contrainte maximal de ces biomatériaux composites a partir des essais de flexion trois points.

Enfin, une conclusion générale.

# Chapitre I.

## Généralité sur les matériaux composites

### *Sommaire*

---

Introduction .....	4
I. Généralité sur les matériaux composites .....	4
I.1. Définition .....	4
I.2. Constituent des matériaux composites.....	5
I.2.1. Matrice .....	5
a. Matrices thermodurcissables .....	5
b. Matrices thermoplastiques .....	6
I.2.2. Renforts .....	6
a. Classification des Renfort .....	6
I.2.3. Renforts végétaux.....	7
I.3.1. Classification des fibres végétales.....	7
a. Les fibres des feuilles.....	7
b. Les fibres des tiges.....	7
c. Les fibres des bois.....	7
d. Les fibres des surfaces .....	7
I.3.2. Processus d'extraction des fibres .....	7
I.4. Classification des composites .....	8
I.5. Matériaux Composites Bio-Sources .....	9
I.5.1. Définition .....	9
I.5.2. Avantages et inconvénients des bio-composites .....	9
I.6. Procédés de fabrication de composite bio-sources .....	9
I.6.1. L'injection .....	9
I.6.2. La thermo-compression.....	10
I.7. Domaines d'utilisation.....	11
Références .....	13

---

### Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons en un premier temps, une généralité sur les matériaux composites qui est dédié à une définition de ces matériaux, leurs constituants et leurs classifications, cette étude bibliographique donne un aperçu sur les matériaux bio-composites d'une manière générale. Les différents procédés de mises en œuvre utilisées dans notre travail. Enfin quelques domaines d'application.

### I. Généralité sur les matériaux composites

#### I.1. Définition

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements des fibres, des renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Le schéma général d'un matériau composite est donné sur la figure I.1. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes [ELA-11, BER-10].

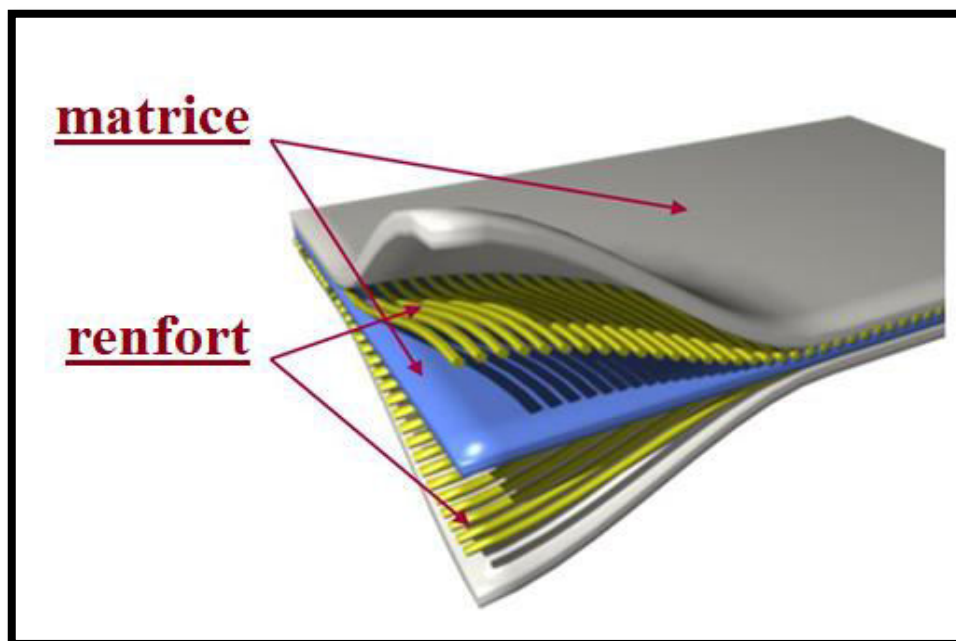


Figure I.1 : Matériau composite [WIK-17].

## I.2. Constituent des matériaux composites

### I.2.1. Matrice

La matrice constituant le matériau composite est une résine polymère qui existe en grand nombre et chacune a un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés [LAU-08].

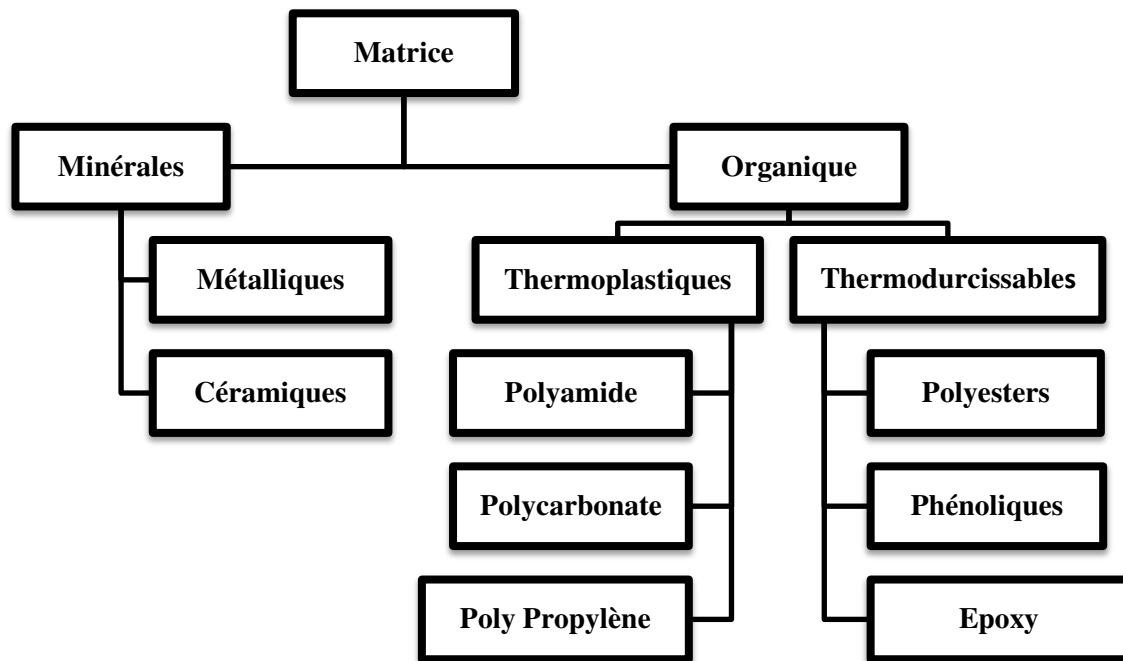


Figure I.2 : Différents types de matrice.

#### a. Matrices thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solutions sous forme de polymère réticule en suspension dans des solvants.

Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes et furaniques) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables [LAU-08].

**b. Matrices thermoplastiques**

Les polymères thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces polymères sont solides et nécessitent une transformation à très haut température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate et polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques [LAU-08].

**I.2.2. Renforts**

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres est disponible sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique, tissus surfaciques, multidirectionnelle [LAU-08].

**a. Classification des renforts**

Les Renforts peuvent être classés en fonction de leur nature ,

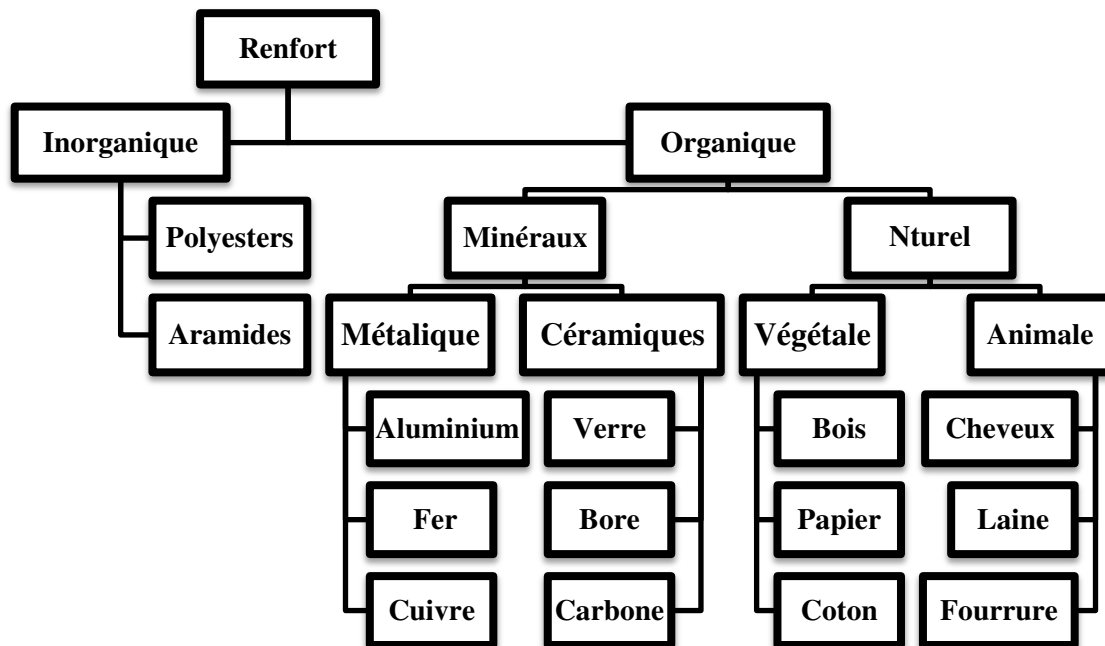


Figure I.3 : Classification des Renforts.



### I.2.3. Renforts végétaux

Les fibres végétales sont issues de la biomasse, elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante. Elles sont principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. Elles sont surtout utilisées pour leurs avantages inégalés : leur faible densité, leur pouvoir d'isolant thermique, leurs propriétés mécaniques, et notamment pour leur biodégradabilité et atouts écologiques [FRD-12].

### I.3.1. Classification des fibres végétales

#### a. Les fibres des feuilles

Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides [NIL-75].

#### b. Les fibres des tiges

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de lin, de kernaf et de chanvre [NIL-75, COU-83].

#### c. Les fibres des bois

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous [KRI-05].

#### d. Les fibres des surfaces

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre [BLE-99].

### I.3.2. Processus d'extraction des fibres

Ces procédés de séparation des fibres généralement utilisés de nos jours sont schématisés dans le diagramme de la figure I.4 :

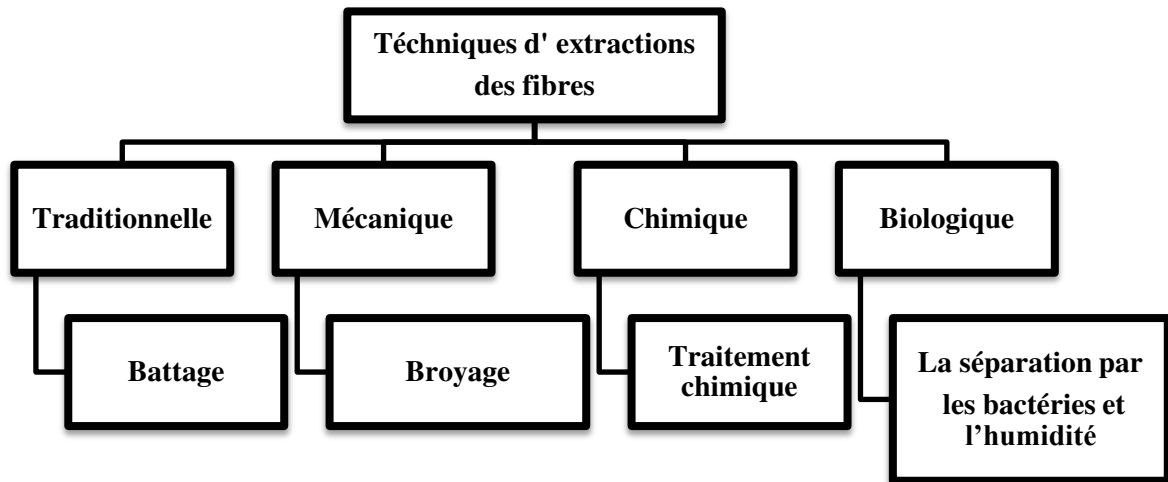


Figure I.4 : Techniques d'extraction des fibres végétales.

#### I.4. Classification des composites

Le domaine des matériaux composites est très vaste et peut être divisé en deux catégories principales (figure I.5) : les composites renforcés et les composites structuraux. Chacune de ces catégories se divise au moins en deux sous catégories.

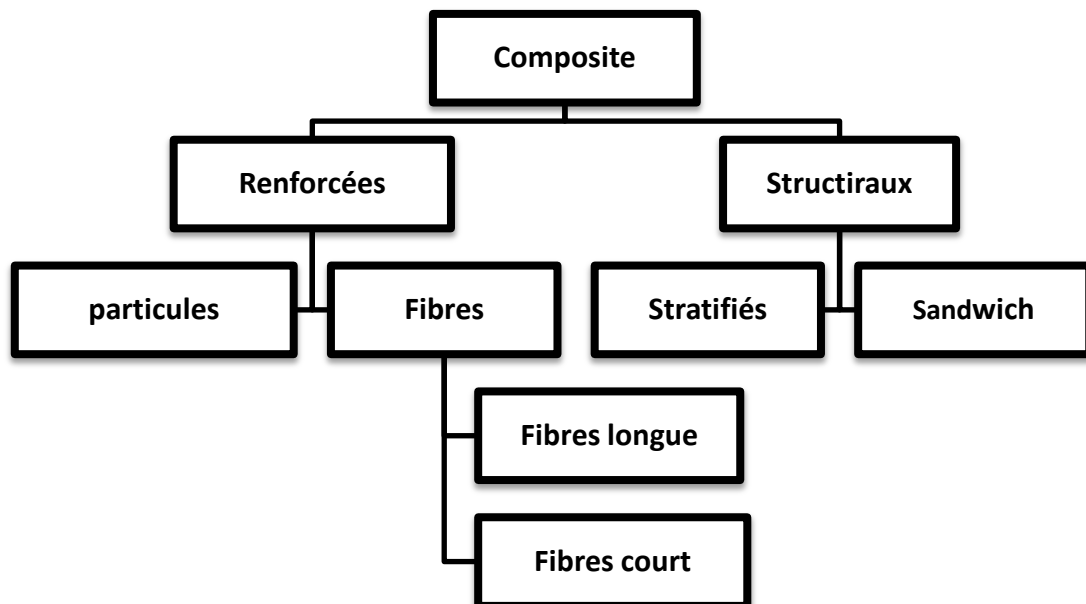


Figure I.5 : Classification schématique des différents types de composites.

### I.5. Matériaux Composites Bio-Sources

#### I.5.1. Définition

Les matériaux composites Bio-Sources sont des matériaux composites à base de bio-constituent (renfort bio ou matrice bio , ou les deux) .

#### I.5.2. Avantages et inconvénients des bio-composites

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

- Respecter l'environnement « Biodégradable, Recyclable ».
- Poids légers.
- Pas cher « les fibres », disponibilité des matières premières.
- Inoxydable.
- Ne pas libérer d'émissions toxiques.
- Possibilité de prendre plusieurs formes.

Cependant certains inconvénients :

- La sensibilité à la chaleur.
- Sensibilité aux produits chimiques « matrice ».

### I.6. Procédés de fabrication de composite bio-sources

La production de pièces en composites à matrice thermoplastique et renfort naturel peut être effectuée par plusieurs techniques. La thermo-compression et l'injection sont de loin les plus utilisées. Dans la suite, on se limitera à détailler ces deux techniques de transformation [SOF-11].

#### I.6.1. L'injection

La qualité des pièces injectées ainsi que les cadences de production élevées font que cette technique de moulage soit largement utilisée dans la fabrication de pièces en composite. Pour les deux types de matières alimentant le système d'injection, obtenu par extrusion, l'injection se fait de façon classique similaire au cas des polymères thermoplastiques non renforcés.

La forme et le nombre de vis servant à mélanger et faire avancer la matière fondue jusqu'à la sortie sont déterminants de la qualité de la matière à la sortie. Un moule est monté en face de la buse et contient une empreinte à remplir (Figure I.6). Les différents constituants du système d'injection (moule, vis, buse,...etc.) doivent tenir compte de l'effet de la présence des fibres dans la matière à injecter. En effet, le renfort entraîne généralement l'usure par friction des composants de ce système [SOF-11].

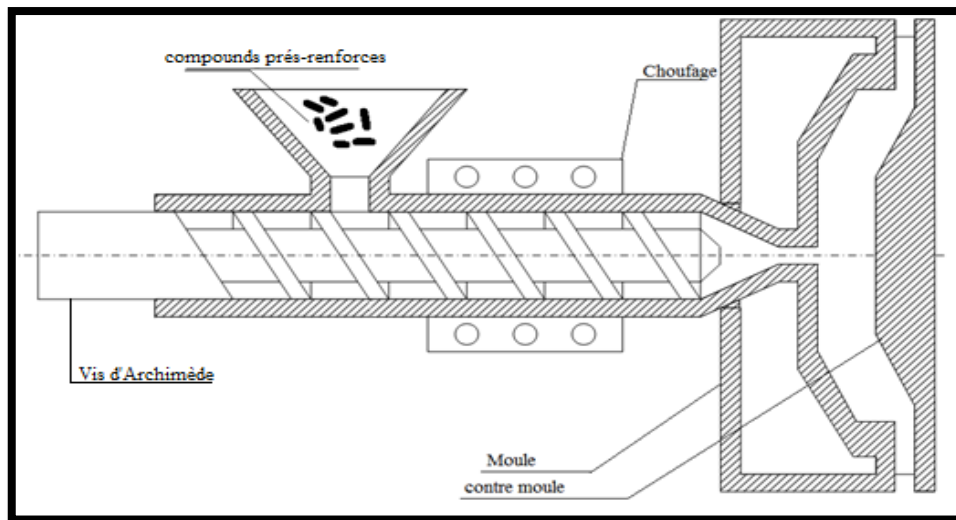


Figure I.6 : Presse pour injection de granulés pré-renforcés.

### I.6.2. La thermo-compression

La thermo-compression consiste à appliquer une pression sur la matière à mettre en œuvre dans un moule chaud fermé. Les composites fibres de verre/thermoplastiques sont largement produits en utilisant cette technique pour des applications dans le domaine de l'automobile.

Ce procédé permet de réaliser des pièces semi-structurelles plus ou moins complexes avec de bonnes propriétés mécaniques. Le semi produit est mis dans la moitié inférieure du moule, déjà chaude. La partie supérieure du moule vient rentrer en contact avec l'ensemble fibre/matrice. Le refroidissement par des fluides permet de consolider la pièce qui peut être à la fin extraite du moule [WAK-00].



Figure I.7 : Presse de thermo-compression [SUT-19].

### I.7. Domaines d'utilisation

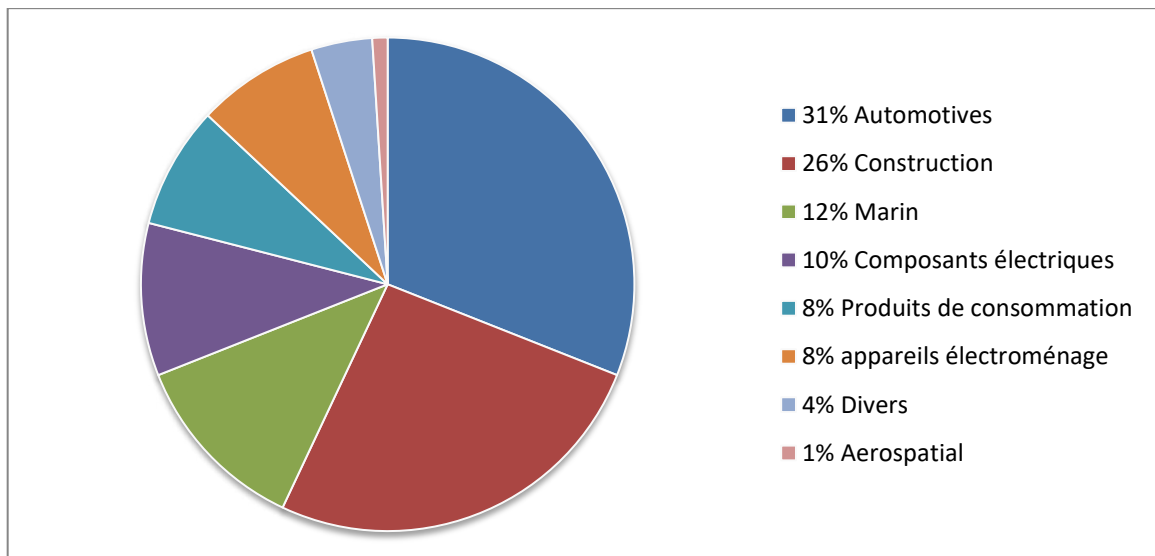


Figure I.8 : Utilisation des fibres naturelles avec des bio composites [SAL-16].

Les composites à base de fibres végétales trouvent de plus en plus des applications industrielles et leurs utilisations augmentent de jour en jour.

Les principales raisons sont la disponibilité d'un grand éventail de fibres végétales, le respect de l'environnement et recyclable quand ils sont combinés avec des polymères adéquats.

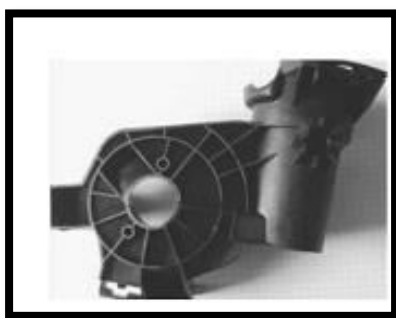
L'incorporation des fibres végétales à savoir le lin, le chanvre, le jute, le ramie,

le sisal, le kernaf, le coco, l'abaca et d'autres fibres, dans des matériaux thermoplastiques ou thermodurcissables en remplacement des fibres de verre est un concept qui commence à être industrialisé et commercialisé.

Les composites renforcés par des fibres végétales trouvent des applications dans la fabrication des habitacles (figure I.9) de plusieurs marques de voitures, de petits bateaux et kayaks, et même dans la boiserie et les constructions en génie civil ou bien dans des structures secondaires (figure I.10) dans des applications qui répondent au souci de la préservation de l'environnement [SAL-16].



Figure I.9 : Pièces élaborées en matériaux composites à fibres végétales Mercedes Benz A-Class [SAL-16].



(a) Compresseur ;



(b) Les aubes ;

Figure I.10 : Réalisation des pièces renforcées par des fibres végétales [SAL-16].

### Références

- [ASH-04] Ashimori, M., Katayama, T., Aoyama, E., & Nagai, S. (2004). Study on splitting of bamboo fibers due to freezing and tensile strength of FRTP using bamboo fibers. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 47(4), 566- 569.
- [BAR-10] N.M. Barkoula, S.K. Garkhail, T. Peijs, Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate, *Ind. Crops Prod.* 31 (2010) 34–42.
- [BEN-08] Bendahou, A., Kaddami, H., Sautereau H., Raihane M., Erchiqui F. Dufresne, A. Short Palm Tree Fibers Polyolefin Composites: Effect of Filler Content and Coupling Agent on Physical Properties. 2008, *Macromolecular Materials & Engineering*, v.293, p.140–148.
- [BEN-10] Bendahou, A., Kaddami, H., Dufresne, A. Investigation on the effect of cellulosic nanoparticles morphology on the properties of natural rubber based nanocomposites. *European Polymer Journal* 2010,v.46, p.609-620.
- [BER-10] BERTHELOT Jean-Marie (2010) Matériaux composites (5° Éd.) : Comportement mécanique et analyse des structures. Edition Lavoisier.
- [BIS-10] Biswas, S., Satapathy, A. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites. *Materials and Design*, 2010, v.31, p.1752-1767.
- [BLE-99] BLEDZKI, A. K and GASSAN. J.," Composites reinforced with cellulose based fibers «, ELSEVIER, *Progress in polymer science*, volume 24, pp.221-274, (1999).
- [BRE-06] Bréard, J., Bizet, L., Montrelay, N., Baley, C. Comparaison des propriétés de composites mats verre/polyester et lin/ polyester pour faisabilité par procédé RTM. *Revue des composites et des matériaux avancés, Renforcement des polymères par des fibres végétales* 2006, v.16, n.1, p.101-113.
- [CAL-13] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Fundamentals of materials science and engineering* (Vol. 471660817). Wiley.
- [CHA-05] Chand, N., Jain, D. Effect of sisal fibre orientation on electrical properties of sisal fibre reinforced epoxy composites. *Composites: Part A*, 2005, v. 36, p.594-602.
- [COU-83] COUTTS, R.S.P., Flax fibers as a reinforcement in cement mortar, the international journal of cement composites and lightweight concrete, vol.5 N°4,pp 257-262, (1983).
- [D'AN97] D'anselme, T. *Matériaux composites renforcés par des fibres végétales en particulier par des fibres de lin*. Thèse, Université de Rennes 1, Rennes, 1997. 59 p.

[ELA-11] Elouaer, A. (2011). Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales (Doctoral dissertation, Reims).

[FAR-12] O. Faruk, A.K. Bledzki, H.P. Fink, M. Sain, Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010, *Prog. Polym. Sci.* 37 (2012) 1552–1596.

[FRD-12] « Fibres et renforts végétaux Solutions composites », Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France (Mars 2012).

[GRA-09] N. Graupner, A.S. Herrmann, J. Müssig, Natural and man-made cellulose fibrereinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40 (2009) 810–821.

[HAR-09] Harish, S., Michael D.P., Bensely, A., Mohan Lal, D., Rajadurai, A. Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. *Materials Characterization*, 2009, v.60, p.44-49.

[HAS-07] Haseena, A. P., Unnikrishnan, G., Kalaprasad, G. Dielectric properties of short sisal/coir hybrid fibre reinforced natural rubber composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.763-786.

[KAD-06] Kaddami, H., Dufresne, A., Khelifi, B., Bendahou, A., Taourirte, M., Raihane, M., Issartel, N., Sautereau, H., Gérard, J.-F., Sami, N. Short palm tree fibers - Thermoset matrices composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. 2006,v.37 p.1413 – 1422.

[KRI-05] KRIKER. A., " Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec". Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, (2005).

[LAU-08] LAURENT GORNET." Généralités sur les matériaux composites". Engineering schéol. (2008).

[MOH-10] : Mohamed RAGOUBI ; Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne ; 14 Décembre 2010.

[MOR-00] Morel, P., Poncet, L., & Rivière, L. M. (2000). Les supports de culture horticoles: les matériaux complémentaires et alternatifs à la tourbe. Editions Quae.

[NGU-04] Nguyen-Thuc, B. H., & Maazouz, A. Elastomer-modified epoxy/amine systems in a resin transfer moulding process. *Polymer International*, 2004, v.53, p.591– 602.

[NIL-75] NILSON, L" Reinforced Concrete with Sisal and other vegetable fiber.Swedish Council for Building Research", document D14, (1975).



- [NTE-07] Ntenga, R. (2007). Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II; Université de Yaoundé).
- [OKS-03] K. Oksman, M. Skrifvars, J.F. Selin, Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1317–1324.
- [QUE-05] Quelenis, N. Les matériaux composites à base de fibres végétales. *Fiche technique Agro-industrie*, 2005, v. fiche n°12.
- [RAO-07] Rao, K. M. M., & Rao, K. M. (2007). Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite structures*, 77(3), 288-295.
- [RUS-12] D. Rusu, S.A.E. Boyer, M.-F. Lacrampe, P. Krawczak, Bioplastics in Automotive Applications, *Bioplastic magazine* 01 (2012) 1-3.
- [SAL-16] Salah AMROUNE, « Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier », Université de Guelma 2016.
- [SAP-05] Sapuan, S. M., Maleque, M.A. Design and fabrication of natural woven fabric reinforced epoxy composite for household telephone stand. *Materials and Design*, 2005, v.26, p.65-71.
- [SAT-09] Satyanarayana, K. G., Ramos, L. P., & Wypych, F. (2009). Comparative study of Brazilian natural fibers and their composites with others. Natural fibre reinforced polymer composites. Kottayam, Kerala (India), 473-522.
- [SBI-08] Sbiai, A., Kaddami, H., Fleury, E., Maazouz, A., Erchiqui, F., Koubaa A., Soucy J., Dufresne, A. Effect of the Fiber Size on the Physicochemical and Mechanical Properties of Composites of Epoxy and Date Palm Tree Fibers. *Macromolecular Materials & Engineering* 2008, v.293, p.684-691.
- [SBI-10] Sbiai, A., Maazouz, A., Fleury, E., Sautereau, H., Kaddami, H., .Short Date Palm Tree Fibers / Polyepoxy Composites Prepared using RTM Process: Effect of TEMPO Mediated Oxidation of the Fibers. *BioResources*, 2010, v.5, n.2, p.672-689.
- [SHI-06] Shi, J. L. (2006). La relation entre les propriétés des panneaux de fibres de densité moyenne et les caractéristiques du bois (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis. Laval University. Dept of Wood science and Technology).
- [SOF-11] Sofien Bouzouita, Optimisation des interfaces fibre/matrice de composites à renfort naturel, Soutenue le 19 décembre 2011.
- [TOK-08] Tokoro, R., Vu, D. M., Ōkubo, K., Tanaka, T., Fuji, T., & Fujiura, T. (2008). How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers. *Journal of Materials Science*, 43(2), 775-787.

[TOW-08] Towo, A. N., Ansell, M.P. Fatigue of sisal fibre reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture. *Composites Science and Technology*, 2008, v.68, p.915-924.

[TUN-04] Tung, N. H., Yamamoto, H., Matsuoka, T., & Fuji, T. (2004). Effect of surface treatment on interfacial strength between bamboo fiber and PP resin. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 47(4), 561-565.

[USI-10]:

[http://www.usinenouvelle.com/article/page\\_article.cfm?idoc=108795&numpage=3](http://www.usinenouvelle.com/article/page_article.cfm?idoc=108795&numpage=3)  
(10/11/2010)

[WAK-00] Wakeman M.D., Rudd C.D., (2000), Compression moulding of thermoplastic composites, in *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly and C. Zweben, Editors, Elsevier Science Ltd: Oxford.

[WIK-17]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau\\_composite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite) (2017)

# Chapitre II.

## Comportement élastique des matériaux composites

### *Sommaire*

---

Introduction .....	18
II.1. Généralité sur le comportement élastique du matériau composite.....	18
II.1.1. Elasticité linéaire .....	18
II.1.2. Matériau anisotrope .....	19
II.1.3. Matériau monoclinique.....	19
II.1.4. Matériau orthotrope .....	20
II.1.5. Matériau unidirectionnel.....	21
II.1.6. Matériau isotrope .....	22
II.2. Modules de l'ingénieur .....	22
II.2.1. Pour un composite unidirectionnel .....	22
a. Traction longitudinale.....	23
b. Traction transverse .....	23
c. Cisaillement longitudinal.....	24
d. Cisaillement transverse.....	25
II.3. Flexion trois point « Approche théorique » .....	25
Références .....	27

---

**Introduction**

Le terme « comportement » fait référence au comportement des matériaux après l'exposition à certaines contraintes, ce qui a conduit à la nécessité de créer des lois physiques qui reflètent ces comportements.

Dans ce chapitre est menée l'étude du comportement élastique des matériaux composites. Une présentation de la théorie de flexion trois points.

**II.1. Généralité sur le comportement élastique du matériau composite**

**II.1.1. Elasticité linéaire**

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{II.1}$$

Avec :

$\{\sigma\}$  : Vecteur des contraintes

$[C]$  : Tenseur de rigidité

$\{\varepsilon\}$  : Vecteur de la déformation

Ou sous forme condensée :

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \tag{II.2}$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduit la matrice de rigidité C, symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général par 21 coefficients indépendants. La relation d'élasticité peut s'écrire sous la forme inverse, suivant :

Avec  $S = C^{-1}$  II.3

S : matrice de flexibilité ou de souplesse (symétrique).

### II.1.2. Matériau anisotrope

Dans le cas le plus général, la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique ou matériau anisotrope.

### II.1.3. Matériau monoclinique

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie.

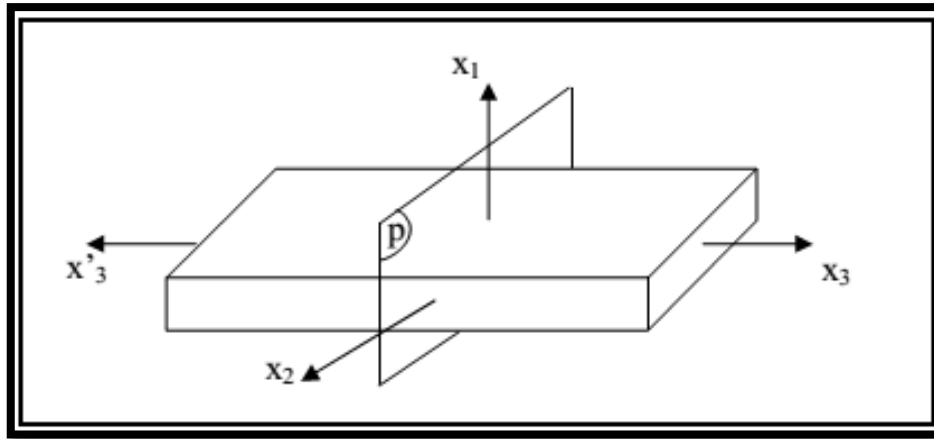


Figure II.1: Plan de symétrie [YOU-04].

La forme de la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être telle qu'un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifie pas la matrice. Dans le cas où le plan de symétrie est le plan (1,2), l'exploitation des changements de base conduit à une matrice de rigidité de la forme [YOU-04] :

$$\begin{bmatrix}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\
 C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\
 C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\
 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\
 C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66}
 \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est réduit à 13.

II.1.4. Matériau orthotrope

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90 ° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame.

Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope [COM-19].

Les directions principales (1, 2) seront prises respectivement suivant la direction chaîne et la direction trame ; ces directions seront également notées L et T (figure II.2) [COM-19].

La direction 3 orthogonale au plan de la couche sera également notée T'.

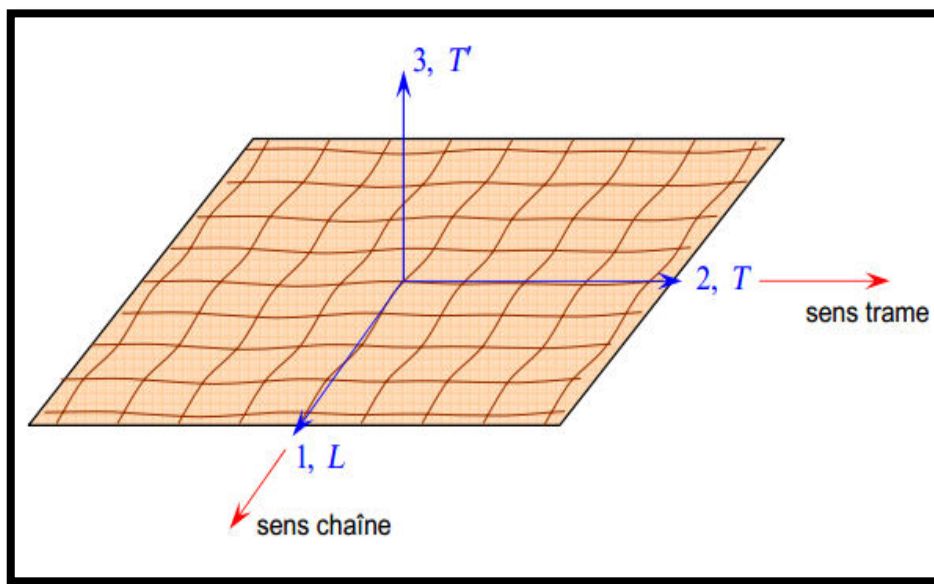


Figure II.2 : Couche de matériau composite orthotrope [COM-19].

La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent. L'invariance de la matrice dans un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$\begin{bmatrix}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\
 C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\
 C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}
 \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

Où :

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{44}, S_{55}, S_{66}$$

**II.1.5. Matériau unidirectionnel**

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposés dans une matrice (figure II.3a). Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres, d'où l'importance de son étude. La cellule élémentaire d'un tel matériau peut être considérée, en première approximation, comme constituée (figure II.3b) d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice, à base circulaire ou mieux hexagonale [COM-19].

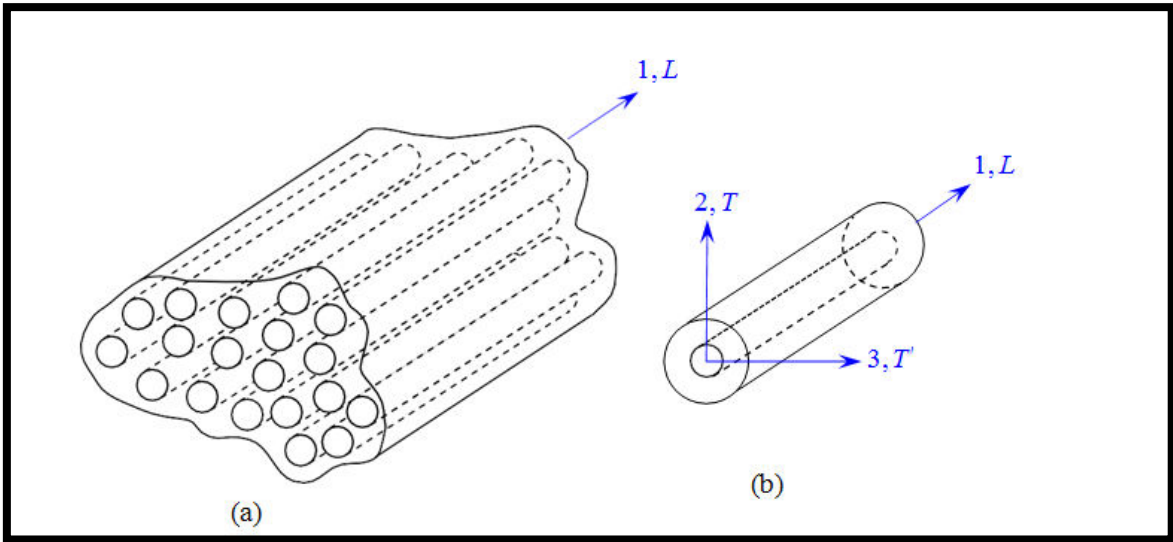


Figure II.3 : Composite unidirectionnel [COM-19].

La matrice de rigidité s'écrit donc suivant :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Les propriétés du matériau orthotrope à isotrope transverse sont déterminées par 5 constantes d'élasticité indépendantes.

Où:

$$S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{23}, S_{66}$$

### II.1.6. Matériau isotrope

Un matériau est isotrope si ses propriétés sont indépendantes du choix des axes de référence. Il n'existe alors pas de direction privilégiée, et la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être invariante dans tout changement de bases orthonormées [YOU-04].

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est donc réduit à 2, et conduit à la matrice de rigidité :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Généralement, les constantes de rigidité sont exprimées en introduisant les coefficients de Lamé  $\lambda$  et  $\mu$  :

$$\begin{cases} C_{11} = \lambda + 2\mu \\ C_{12} = \lambda \end{cases} \quad \text{II.8}$$

## II.2. Modules de l'ingénieur

### II.2.1. Pour un composite unidirectionnel

Les modules de l'ingénieur sont les modules d'Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement. Ces modules sont mesurés dans des essais simples tels que des essais de traction uni axiale ou de cisaillement [COM-19].



**a. Traction longitudinale**

Dans un essai de traction longitudinale, toutes les contraintes sont nulles, excepté la contrainte  $\sigma_1$  :

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_i = 0, \quad i = 2, 3, \dots, 6.$$

En fonction des constantes de rigidité, les équations d'élasticité s'écrivent:

$$\sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{12}\varepsilon_3,$$

$$0 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 + C_{23}\varepsilon_3,$$

$$0 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{23}\varepsilon_2 + C_{22}\varepsilon_3,$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0.$$

De ces relations, nous tirons :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}} \varepsilon_1,$$

$$\sigma_1 = \left( C_{11} - 2\frac{C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} \right) \varepsilon_1. \quad \text{II.9}$$

Nous en déduisons le module d'Young longitudinal  $E_L$  et le coefficient de Poisson  $\nu_{LT}$  dans une traction longitudinale:

$$E_L = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}}, \quad \nu_{LT} = \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}}. \quad \text{II.10}$$

**b. Traction transverse**

Dans un essai de traction transverse, par exemple selon la direction 2, le champ des contraintes imposé est :

$$\sigma_2 \neq 0, \quad \sigma_i = 0, \quad i \neq 2.$$

Les équations d'élasticité, en fonction des constantes de rigidité, s'écrivent dans ce cas :

$$0 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{12}\varepsilon_3,$$

$$\sigma_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 + C_{23}\varepsilon_3,$$

$$0 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{23}\varepsilon_2 + C_{22}\varepsilon_3,$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0.$$

D'où l'on tire :

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= -\frac{C_{12}(C_{23} - C_{22})}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}\varepsilon_2, \\ \varepsilon_3 &= -\frac{C_{12}^2 - C_{11}C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}\varepsilon_2, \\ \sigma_2 &= \left[ C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22} - 2C_{23}) + C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}} \right] \varepsilon_2.\end{aligned}\quad \text{II.11}$$

$$\begin{aligned}E_L &= C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22} - 2C_{23}) + C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}, \\ \nu_{TL} &= \frac{C_{12}(C_{23} - C_{22})}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}, \\ \nu_{TT'} &= \frac{C_{12}^2 - C_{11}C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}.\end{aligned}\quad \text{II.12}$$

\*Ces relations, montrent que les coefficients  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $\nu_{TL}$  et  $\nu_{LT}$  sont liés par la relation :

$$\frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}.\quad \text{II.13}$$

### c. Cisaillement longitudinal

Un essai de cisaillement longitudinal correspond à l'un des états de contraintes:

$$\begin{cases} \sigma_5 \neq 0, \\ \sigma_i = 0 \quad \text{si } i \neq 5, \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} \sigma_6 \neq 0, \\ \sigma_i = 0 \quad \text{si } i \neq 6. \end{cases}$$

Dans le deuxième cas, les équations d'élasticité s'écrivent :

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = 0, \\ \sigma_6 &= C_{66}\varepsilon_6.\end{aligned}$$

Nous en déduisons le module de *cisaillement longitudinal*  $G_{LT}$  :

$$G_{LT} = C_{66} \quad \text{ou} \quad G_{LT} = \frac{1}{S_{66}}.\quad \text{II.14}$$

Les directions  $T$  et  $T'$  étant équivalentes, nous avons :

$$G_{LT'} = G_{LT} = C_{66}$$

**d. Cisaillement transverse**

Dans un essai de cisaillement transverse, le champ des contraintes s'exprime par :

$$\begin{aligned} \sigma_4 &\neq 0, \\ \sigma_i &= 0 \quad \text{si } i \neq 4 \end{aligned}$$

D'où les relations :

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= 0 \quad \text{si } i \neq 4, \\ \sigma_4 &= \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23})\varepsilon_4 \end{aligned}$$

Le module de cisaillement transverse  $G_{TT'}$  s'écrit donc :

$$G_{TT'} = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \quad \text{ou} \quad G_{TT'} = \frac{1}{2(S_{22} - S_{23})} \quad \text{II.15}$$

Le module de cisaillement transverse  $G_{TT'}$  est lié au module d'Young transverse  $E_T$  et au coefficient de Poisson  $\nu_{TT'}$ , par l'expression :

$$G_{TT'} = \frac{E_T}{2(1 + \nu_{TT'})} \quad \text{II.16}$$

**II.3. Flexion trois point « Approche théorique »**

L'enregistrement de la courbe « Charge-Déplacement » permet de calculer à l'intérieur de la zone linéaire, la rigidité à la flexion  $K$  :

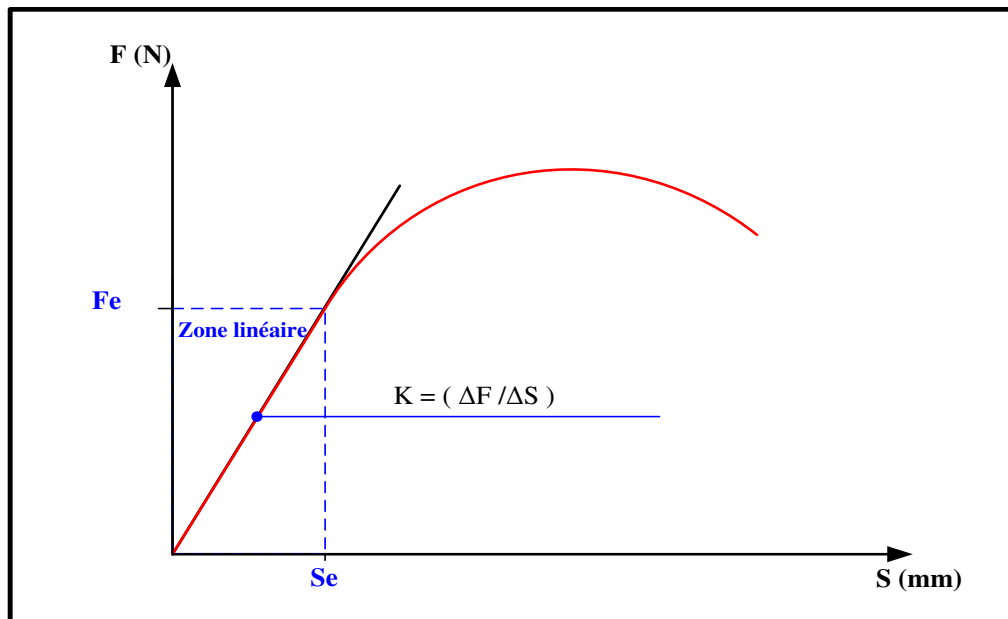


Figure II.4 : La rigidité à la flexion  $K$ .

$$\bullet \quad K = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{II.17}$$

- K : La rigidité à la flexion.
- F : Charge (N).
- S : Déplacement (mm).

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

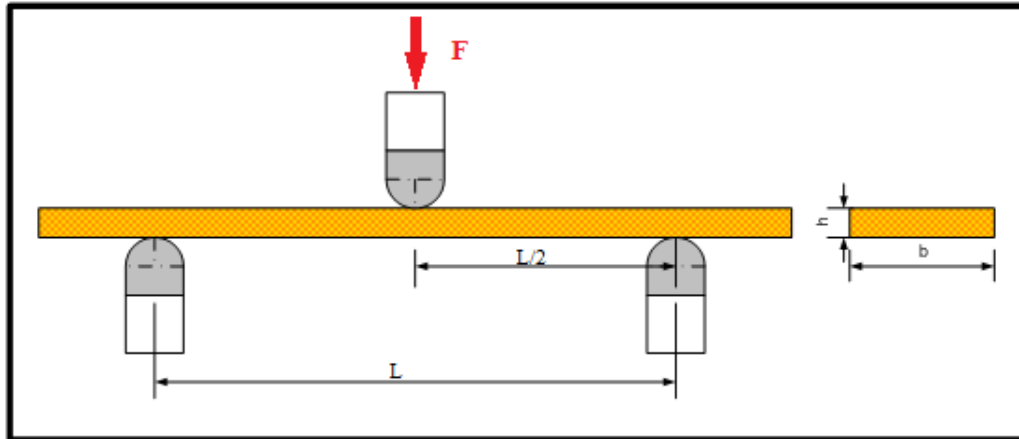


Figure II.5 : Essais de flexion trois points.

$$\bullet \quad M_z(x) = \frac{F}{2} X = E_x I_z \frac{d^2 U_y}{dx^2} \quad \text{II.18}$$

- $E_x$  : module d'élasticité selon la direction x.
- $I_z = \frac{bh^3}{12}$  : moment d'inertie.
- $U_y(x)$  : la flèche à la coordonnée x.
- L : la distance entre les appuis.

$$\bullet \quad U_y(x) = \frac{F}{4E_x I_z} \left[ \frac{X^3}{3} - X \left( \frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad \text{II.19}$$

Soit  $S$ , le déplacement maximal « flèche », en  $X = \frac{l}{2}$ , on en déduit le module d'élasticité  $E_x$  «  $E_f$  »:

$$\bullet \quad E_z(x) = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{1}{4b} \left( \frac{L}{h} \right)^3 K \quad \text{II.20}$$

$$\bullet \quad E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{II.21}$$

**Références**

[COM-19]:

<http://www.compomecagrimp.com/app/download/6171693/MécaniqueComposites+Chapitre+10.pdf>

<http://www.compomecagrimp.com/app/download/6171689/M%C3%A9caniqueComposites+Chapitre+9.pdf>

(10/04/2019)

[YOU-04] DJEBLOUN Youcef, (2004), mémoire de magistère « Etude de la rupture en mode I d'ouverture des matériaux composites ».

# Chapitre III.

## Matériaux et caractérisation mécanique

### *Sommaire*

---

Introduction .....	29
III.1. Matériaux et essais mécanique.....	29
III.1. 1. Matériaux .....	29
III.1.2.Présentation du matériau .....	29
III.1.3. Préparation des éprouvettes.....	31
III.1.2. Essais de Flexion 3 points .....	33
a. Principe .....	33
b. Machine de Flexion .....	34
III.2. Résultat et discussion .....	35
Références .....	47

---

### Introduction

Ce chapitre porte sur deux étapes ; en premier la présentation du matériau utilisée, en deuxième la connaissance des propriétés mécaniques du matériau composite « bio-sources PP/fibres de palmier dattier » par l'essai de flexion trois points.

### III.1. Matériaux et essais mécanique

#### III.1. 1. Matériaux

Le matériau considéré dans cette étude est un matériau composite « bio-sources » à des constituant suivantes:

- matrice polymère « polypropylène » avec des propriétés suivantes :

résines	$T_f$ [C]	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)
polypropylène	900	1 200	20 à 35	1,1 à 1,4

Tableau III.1 : propriétés de polypropylène [LAU-08].

- Fibres de palmier dattier; les fibres utilisant dans ce travail sont les fibres courtes de rachis.

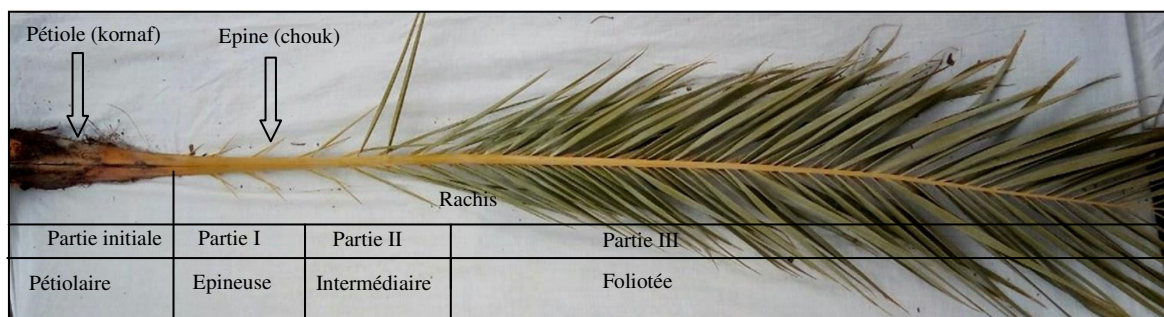


Figure III.1 : Palme de palmier dattier [MOH-18].

#### III.1.2. Présentation du matériau

La préparation des matériaux composites utilisé, dans cette expérience est mené à travers deux étapes de base, à savoir la :

- Les compounds prés-renforcent ; obtenus à partir des mélanges des fibres courtes de rachis palmier dattier et des granules de polypropylène par une extrusion dans une machine d'extrudeuse.

La figure suivante (Figure. III.2) représente la machine Extrudeuse :



Figure III.2 : Extrudeuse (France).

▪ Moulage par compression à chaud ; les compounds met dans le moule préparé, mettre ce moule à tour de rôle dans la presse thermique « Cette méthode s'appelle La thermo-compression » et enfin nous obtenons des plaques, nous répétons ce processus pour élaborer des plaques de différents fractions massiques : ( $V_{f0}= 00\%$ ,  $V_{f1}= 04\%$ ,  $V_{f2}= 07\%$ ,  $V_{f3}= 10\%$  et  $V_{f4}=15\%$ ).



Figure III.3 : Presse de compression à chaud (Enec B).

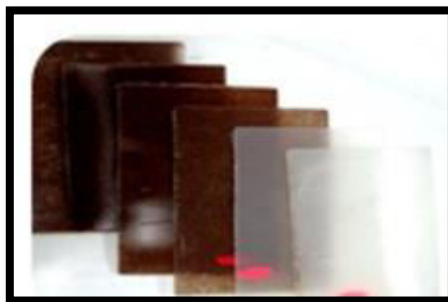


Figure III.4 : Matériaux composite sous forme des plaques.



**III.1.3. Préparation des éprouvettes**

Les dimensions des éprouvettes pour les essais de flexion trois points menées selon les normes « Thermoplastiques et Thermo durcis » :

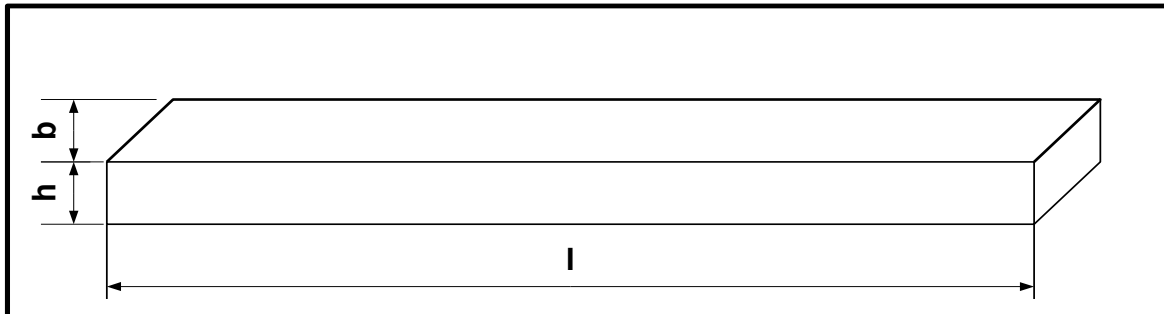


Figure III.5 : Dimensions des éprouvettes.

- $l$  = Longueur de l'éprouvette ;
- $b$  = Largeur de l'éprouvette ;
- $h$  = épaisseur de l'éprouvette ;

Le tableau suivant représente les normes des éprouvettes :

Norme	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$h$ (mm)
<b>ASTM D790</b>	$> 80$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
<b>ISO 178</b>	$> 80$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
<b>DIN 53452</b>	$> 80$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
<b>NF T 51-001</b>	$> 80$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$

Tableau III.2 : Dimensions des éprouvettes pour essais de flexion.

Longueur : Dans le cas où vous ne pouvez utiliser une éprouvette normale utilisez la règle suivante :

- $l$  minimale =  $20 h$

Largeur : Dans le même rapport avec la hauteur que pour une éprouvette normale :

- $b = 2,5 h \pm 0,5\text{mm}$

Où bien utilisez le tableau suivante (Tableau III.3) qui représente les Dimensions des éprouvettes pour essais de flexion :

<b>h (mm)</b>	<b>b (mm)</b>
<b><math>1 &lt; h \leq 3</math></b>	25
<b><math>3 &lt; h \leq 5</math></b>	10
<b><math>5 &lt; h \leq 10</math></b>	15
<b><math>10 &lt; h \leq 20</math></b>	20
<b><math>20 &lt; h \leq 35</math></b>	35
<b><math>35 &lt; h \leq 50</math></b>	50

Tableau III.3 : Dimensions des éprouvettes pour essais de flexion selon h et b.

Enfin les dimensions que nous avons sélectionnées étaient basées sur l'épaisseur, Ils sont comme suit :

- **$1 < h \leq 3$     \*\*     $b = 25 \text{ mm}$     \*\*     $l = 80 \text{ mm}$**

La figure ci-dessous (Figure III.6 ) montre la machine « Guillotine » utilisée pour couper des éprouvettes :



Figure III.6 : Guillotine CIDAN.

La figure suivante (Figure III.7 ) représente les éprouvettes finaux :



Figure III.7 : Les éprouvettes finaux.

### III.1.2. Essais de Flexion 3 points

#### a. Principe

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'une éprouvette sur deux appuis avec une application de charge à mi-distance des appuis.

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

La figure suivante représente le montage de flexion trois points :

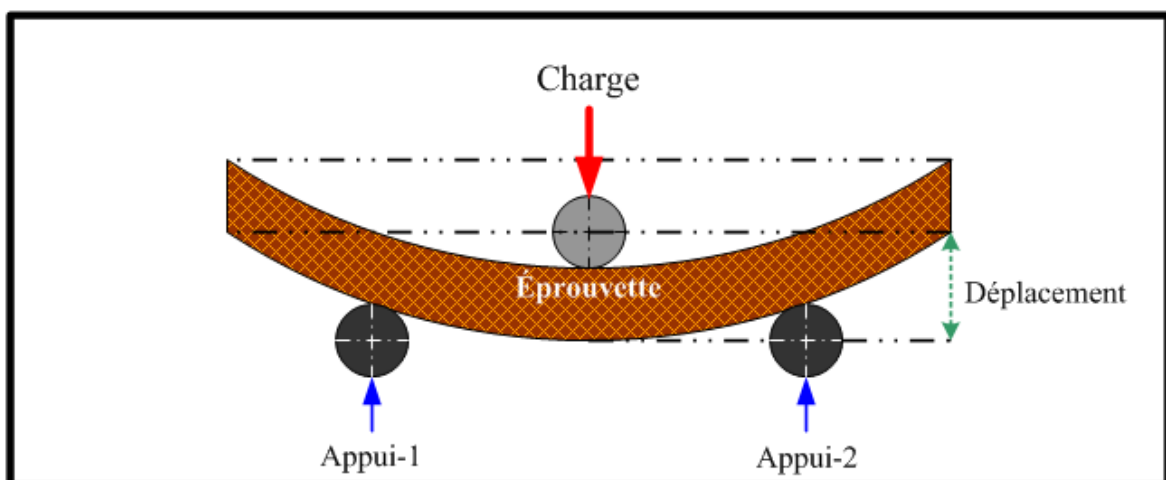


Figure III.8 : Flexion 3 points.

Cet essai permet de connaître :

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

### b. Machine de Flexion

La machine de flexion est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée la base de montage de flexion sur laquelle repose l'éprouvette. La partie du complément du montage qui va appuyer sur l'éprouvette est fixée à une traverse mobile.

La figure suivante représente la machine utilisée dans l'essai de flexion trois points :



Figure III.9 : Appareille INSTRON modèle 5969.

### III.2. Résultat et discussion

Les essais de flexion trois points effectués sur des éprouvettes de forme rectangulaire à donné :

- Rupture dans les éprouvettes de fraction massique 15% ;
- Fissure dans les éprouvettes des fractions massiques 10% et 07% ;
- Aucune observation dans les éprouvettes des fractions massiques 04% et 00% ;

La figure suivante (Figure III.10 ) représente les éprouvettes après l'essai de flexion trois points :

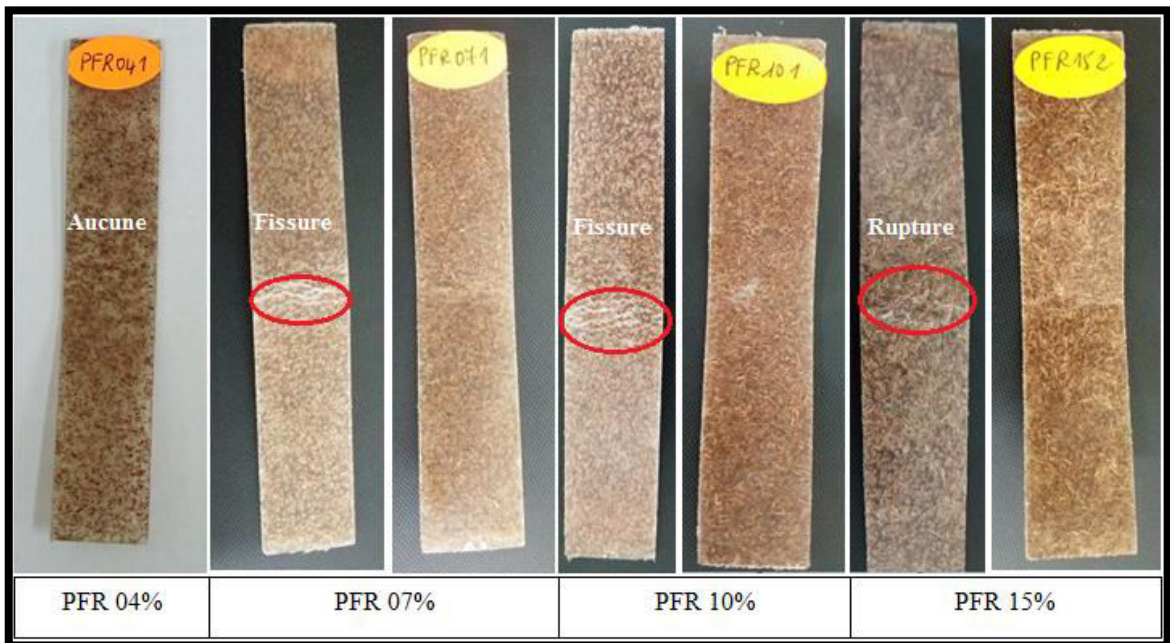


Figure III.10 : Les éprouvettes après l'essai de flexion.

Après avoir expérimenté la flexion sur des éprouvettes, nous avons eu un ensemble des courbes, Ils sont comme suit :

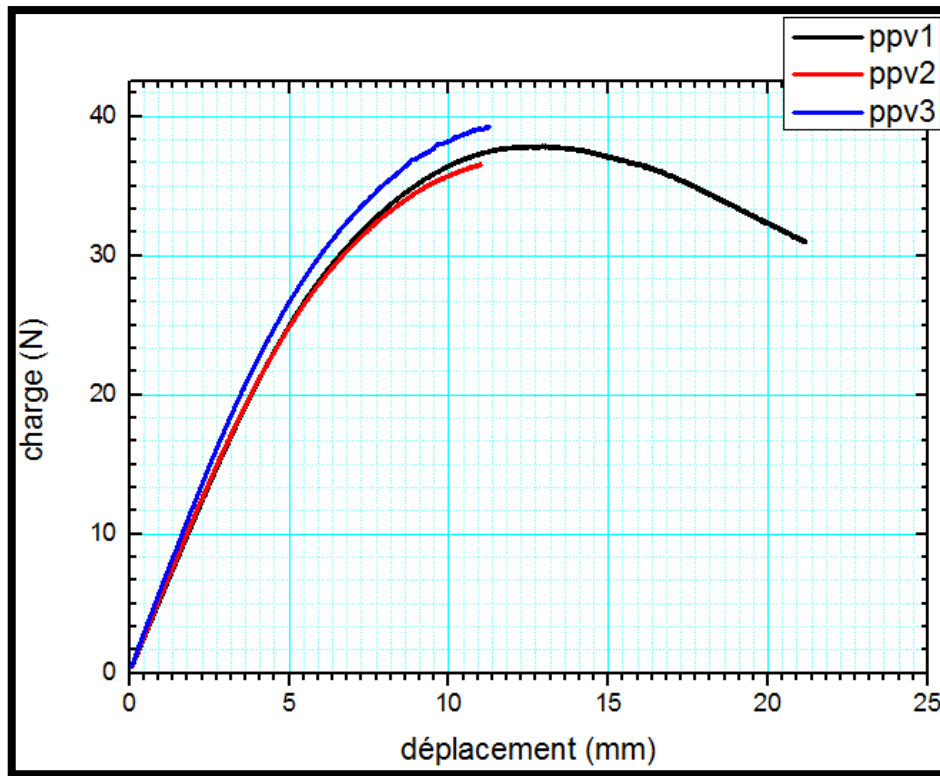


Figure III.11 : Charge - Déplacement PPV\*00%.

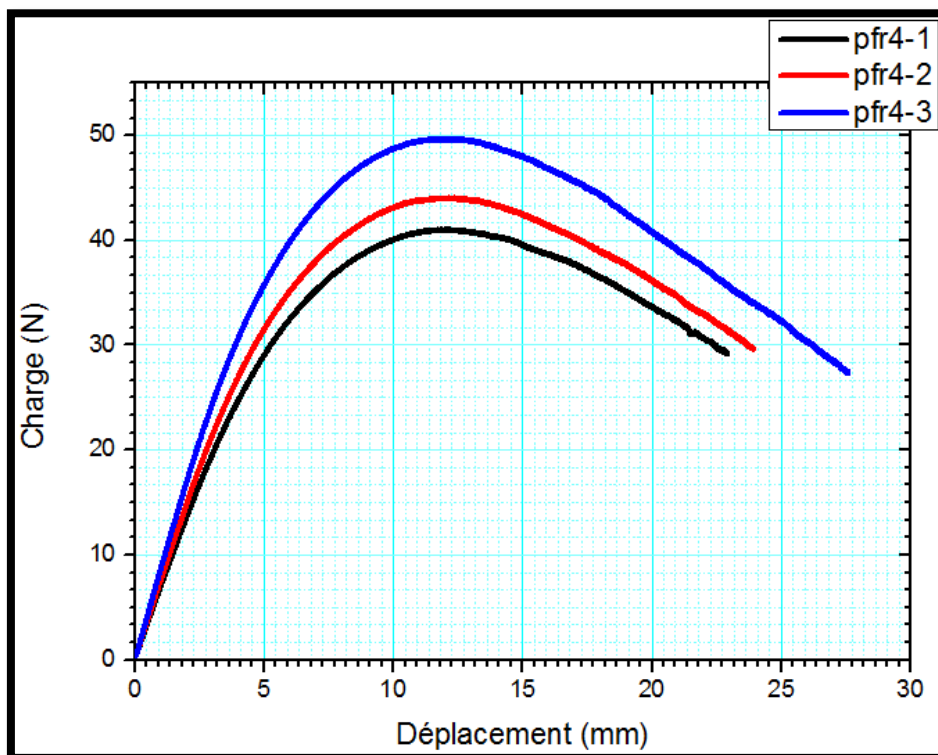


Figure III.12 : Charge - Déplacement PFR \*04%.

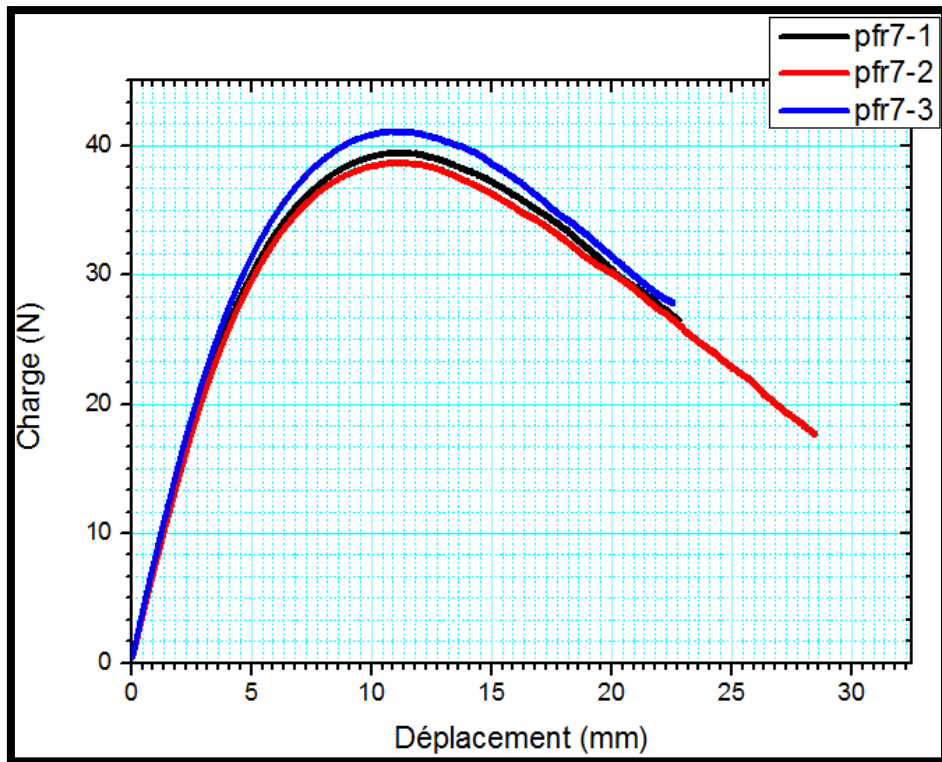


Figure III.13 : Charge - Déplacement PFR \*07%.

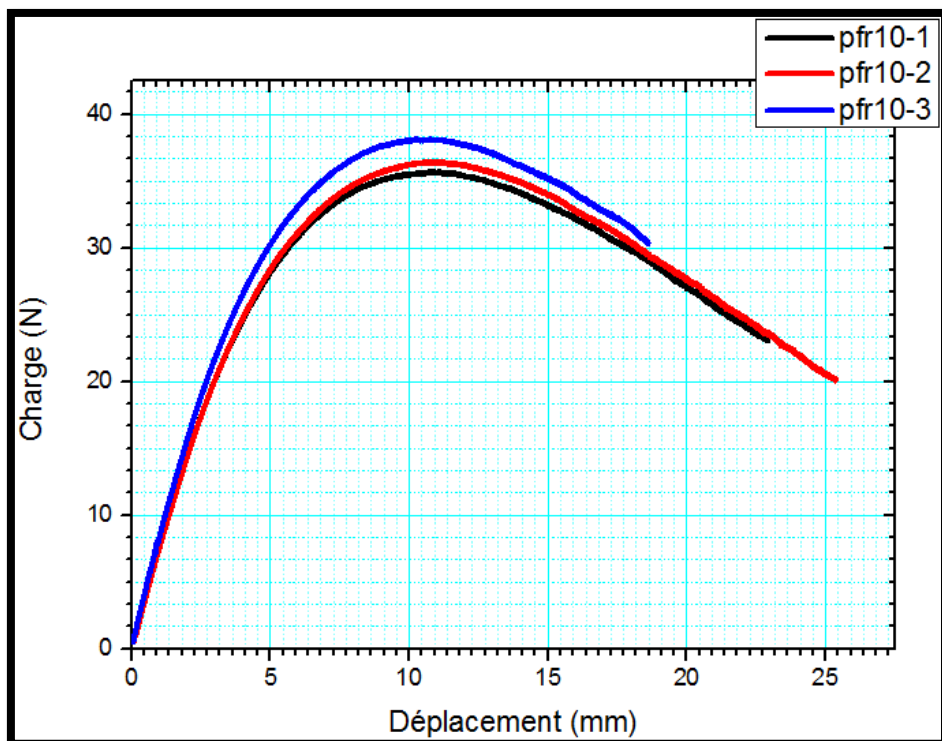


Figure III.14 : Charge - Déplacement PFR \*10%.

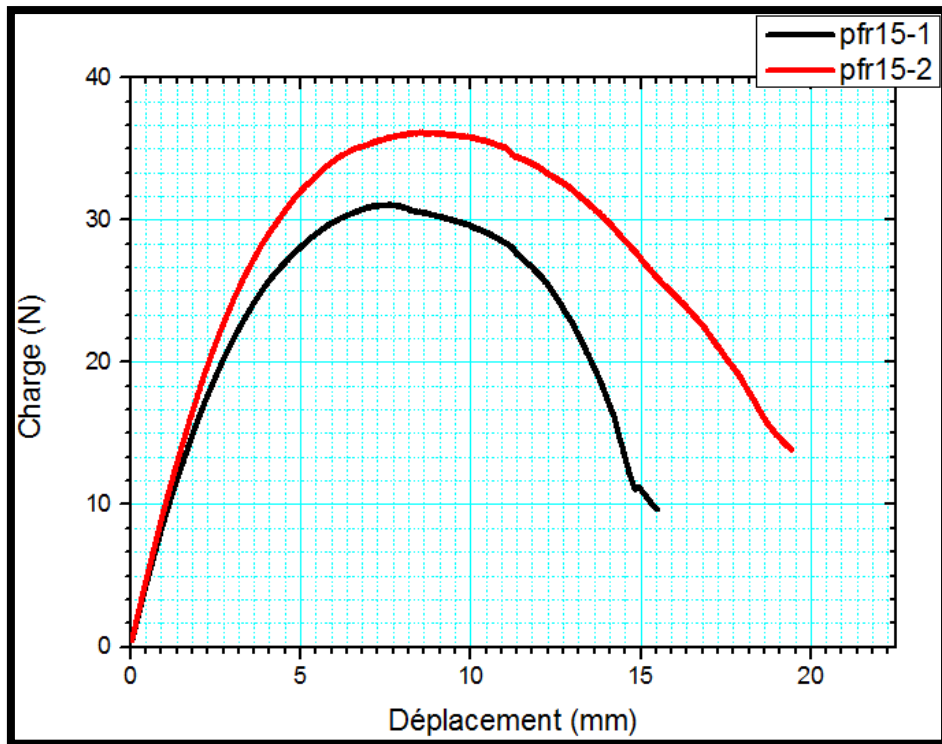


Figure III.15 : Charge - Déplacement PFR\*15%.

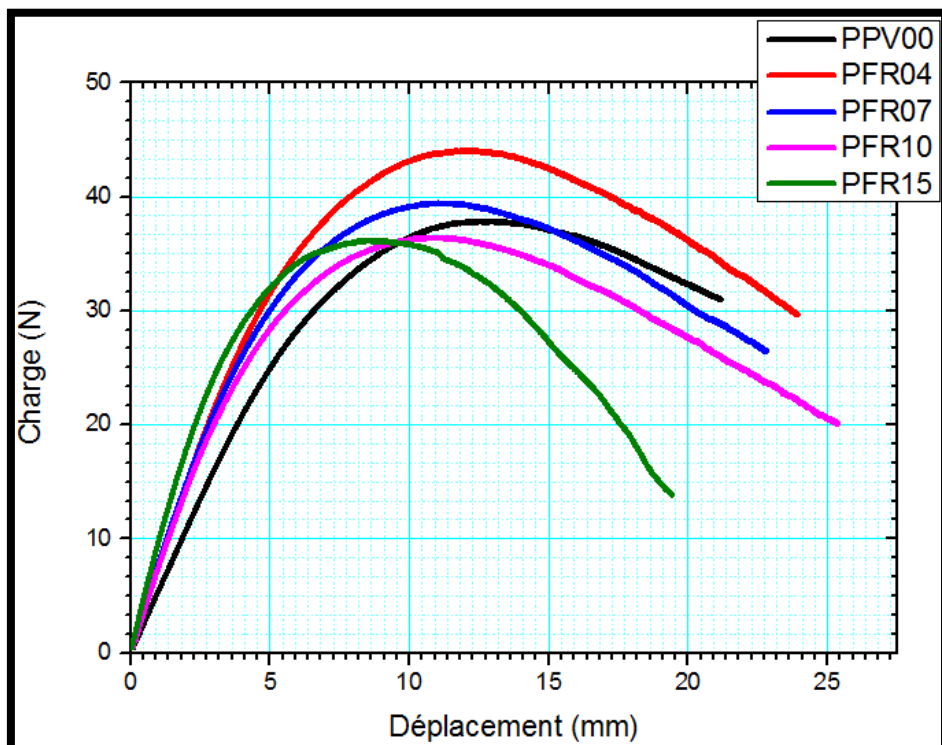


Figure III.16 : Charge - Déplacement Vf= 0~15%.



Cette courbe représente la valeur de déformation des éprouvettes avec différents fractions massiques des fibres  $V_f = 0\sim 15\%$ , il ya deux parties :

- Partie lineaire « élastique » : début de chargement jusqu'au fin line dans cette partie on détermine le module de Young de flexion.
- Partie non-lineaire « plastique » : début de la charge maximale jusqu'à la rupture.

Les propriétés mécaniques que nous souhaitons tirer de cette expérience sont « Module de Young de flexion  $E_f$  , Contrainte maximale  $\sigma_{max}$  , Déformation maximale  $\epsilon_{max}$  et la rigidité  $K$ ».

Les relations avec lesquelles nous allons travailler sont II.17 et II.21 :

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad ;; \quad \left\{ K = \frac{\Delta F}{\Delta S} \right\}$$

Le tableau suivante (Tableau III.4 ) représente les résultats de tous les éprouvettes :

Composite	h (mm)	b (mm)	K (MPa)	$E_f$ (MPa)	$E_{f-moy}$ (MPa)	$E_{e,t}$ (MPa)
PPV:00%:1	2	26,67	5,47	1384,67	1462,77	85,82
PPV:00%:2	2	26,32	5,65	1448,99		
PPV:00%:3	2	26,75	6,16	1554,64		
PFR:04%:1	2	26,6	7,05	1789	1985,62	222,19
PFR:04%:2	2	26,58	7,64	1941,2		
PFR:04%:3	2	26,61	8,78	2226,66		
PFR:07%:1	2	26,9	7,91	1984,35	2011,42	98,04
PFR:07%:2	2	26,58	7,6	1929,77		
PFR:07%:3	2	26,53	8,33	2120,16		
PFR:10%:1	2	26,93	7,77	1947,55	2017,19	133,3
PFR:10%:2	2	26,82	7,68	1933,14		
PFR:10%:3	2	26,79	8,62	2170,88		
PFR:15%:1	2	26,78	9,21	2320,41	2411,69	129,1
PFR:15%:2	2	26,86	9,96	2502,98		

Tableau III.4 : Caractiristiques des éprouvettes (Module de Young).

- Notez que la valeur du modèle Young augmente en raison de la fraction massique accrue.

Quant à « Contrainte maximale  $\sigma_{max}$  et Déformation maximale  $\epsilon_{max}$  », nous allons les extraire de la courbe.

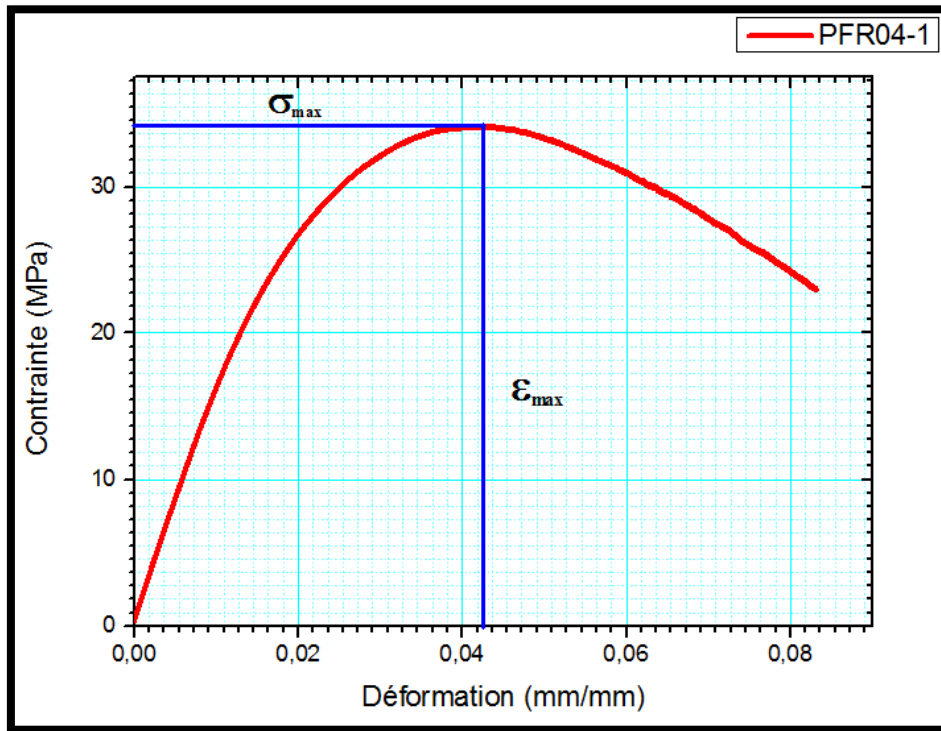


Figure III.17 : Contrainte maximale  $\sigma_{max}$  et Déformation maximale  $\epsilon_{max}$ .

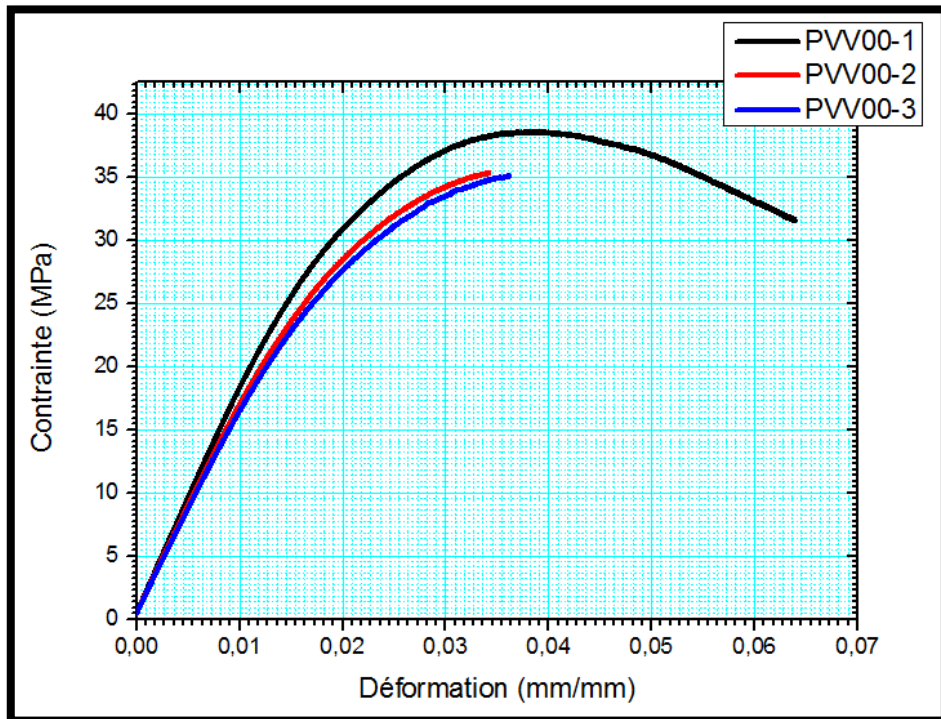


Figure III.18 : Contrainte – Déformation Vf= 00%.

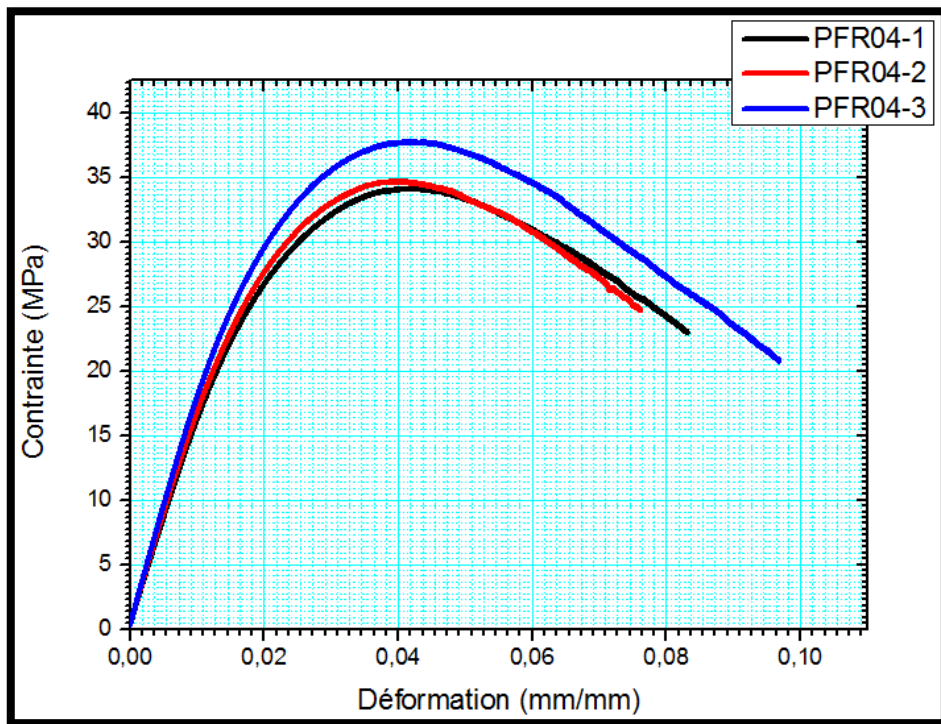


Figure III.19 : Contrainte – Déformation  $V_f = 04\%$ .

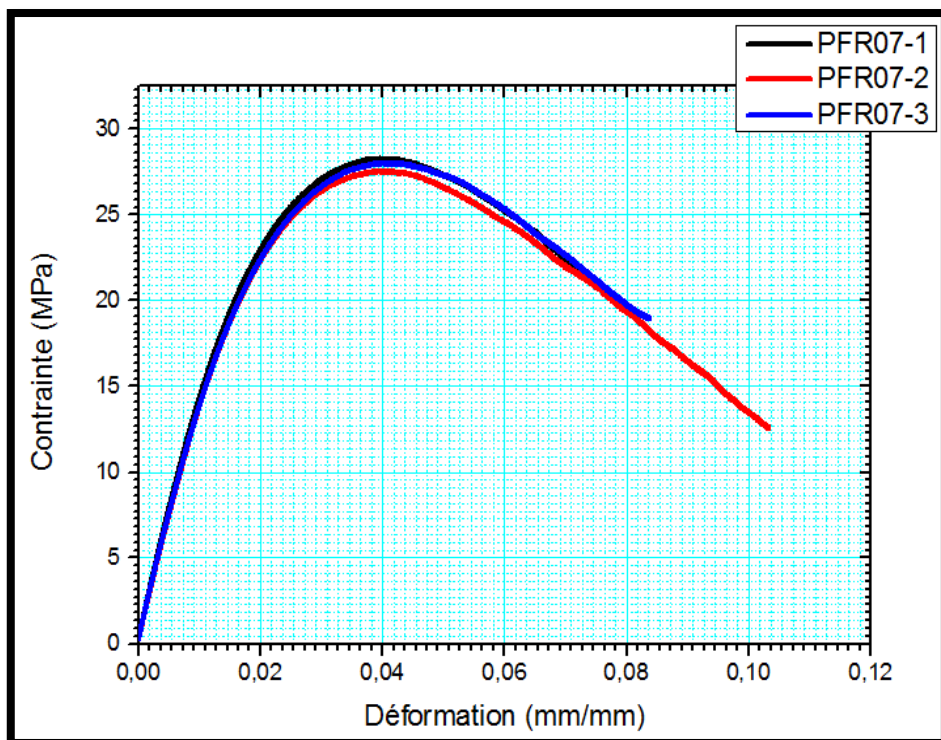


Figure III.20 : Contrainte – Déformation  $V_f = 07\%$ .

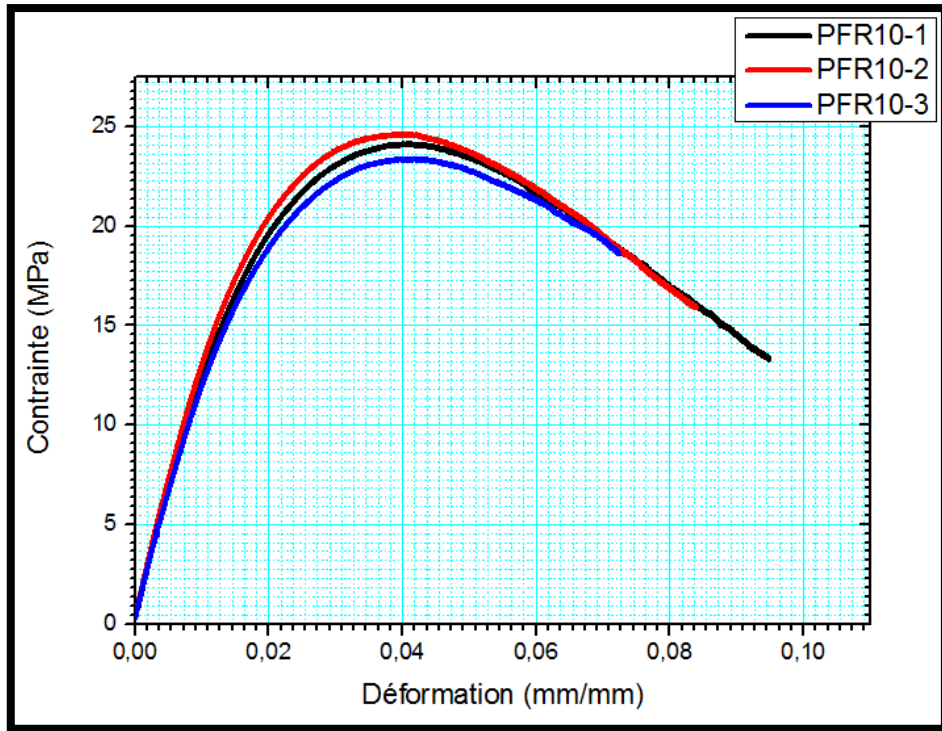


Figure III.21 : Contrainte – Déformation  $V_f = 10\%$ .

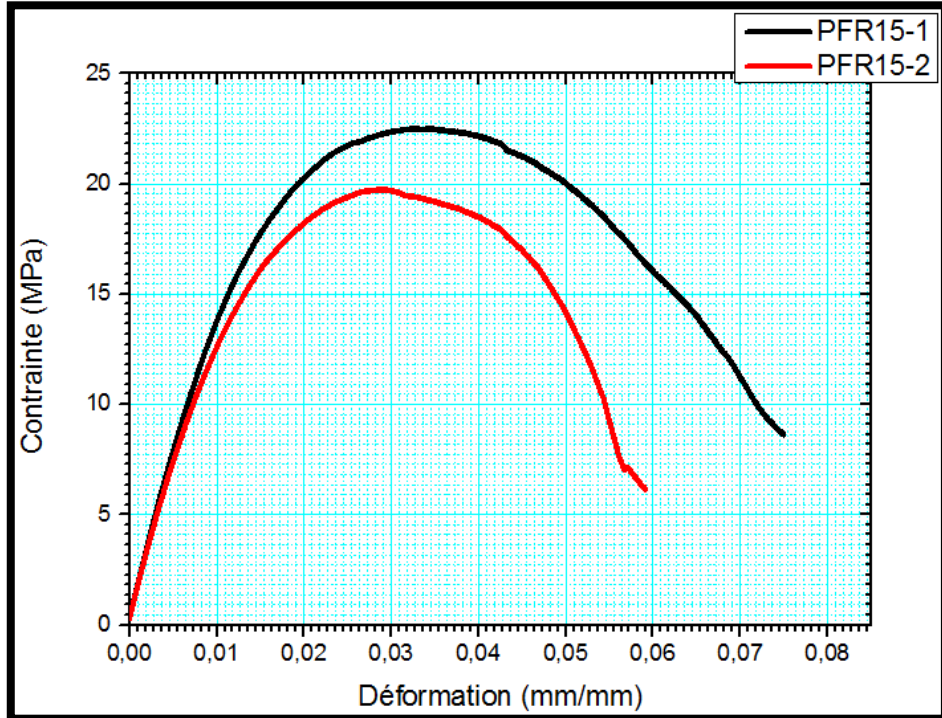


Figure III.22 : Contrainte – Déformation  $V_f = 15\%$ .

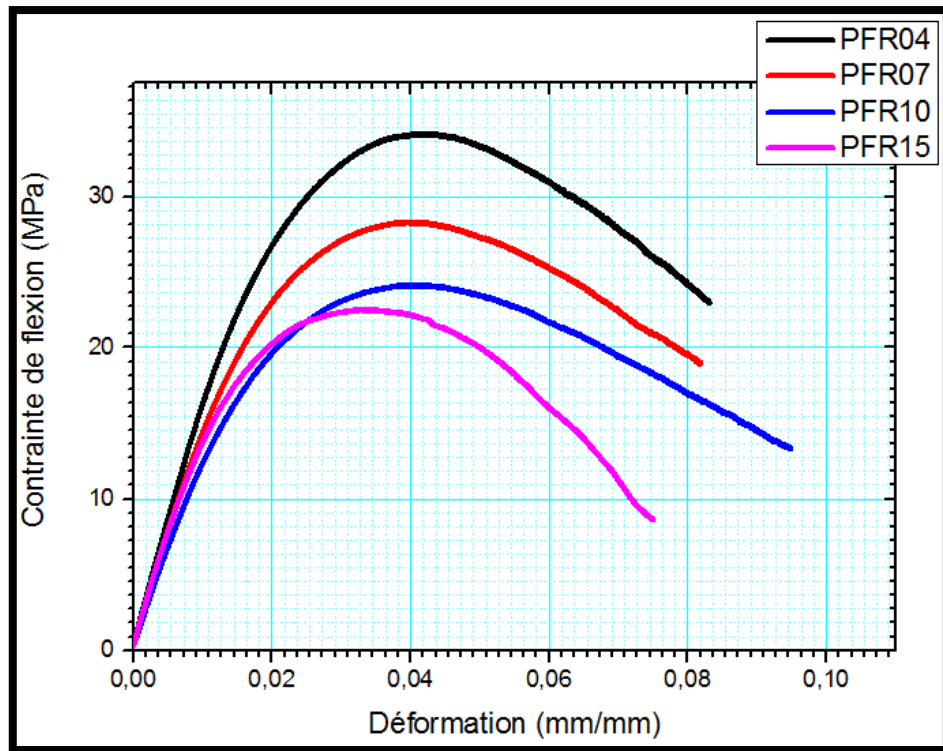


Figure III.23 : Contrainte – Déformation  $V_f = 00\sim 15\%$ .

Cette courbe représente la valeur de déformation des éprouvettes avec différents fractions massiques des fibres  $V_f = 0\sim 15\%$ , il ya deux parties :

- Partie lineaire « élastique » : début de la contrainte jusqu'au fin line.
- Partie non-lineaire « plastique » : début de la contrainte maximale jusqu'à la rupture.

De la même manière pour le reste des éprouvettes. Le tableau suivant représente les résultats de tous les éprouvettes :

Composites	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\text{moy}}$ (MPa)	$\sigma_{e,t}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$	$\epsilon_{\text{moy}}$	$\epsilon_{e,t}$
PFR:04%:1	35,770	35,058	0,825	0,0435	0,0427	0,0007
PFR:04%:2	34,154			0,0421		
PFR:04%:3	35,250			0,0425		
PFR:07%:1	28,298	26,299	1,731	0,0394	0,0412	0,0017
PFR:07%:2	25,250			0,0415		
PFR:07%:3	25,350			0,0428		
PFR:10%:1	25,915	24,975	0,884	0,0400	0,0410	0,0010
PFR:10%:2	24,160			0,0410		
PFR:10%:3	24,850			0,0420		
PFR:15%:1	19,750	21,141	1,967	0,0295	0,0311	0,0023
PFR:15%:2	22,532			0,0327		

Tableau III.5 : Caractéristiques des éprouvète (Contrainte et Déformation).

- Notez que la valeur de la contrainte maximale diminue en raison de la fraction massique accrue.

Les figures 24, 25, 26 et 27 représentent respectivement le module d'élasticité, la contrainte maximale et la déformation maximale en fonction de la fraction massique de la fibre. Pour une comparaison de nos résultats avec d'autre étude (Djebbloune youcef 2018) [YOU-18] sur le polypropylène renforcé par la fibre courte du lif de palmier dattier, nous avons superposé des résultat du matériau composite de la fraction massique de 40% dans des histogrammes.

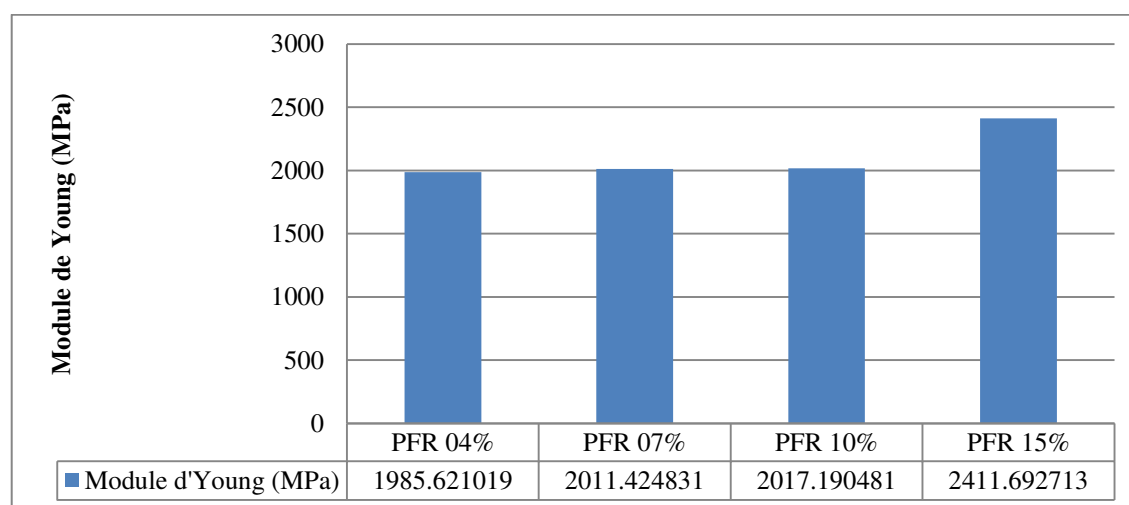


Figure III.24 : Module d'Young des différentes fractions massiques de composite.

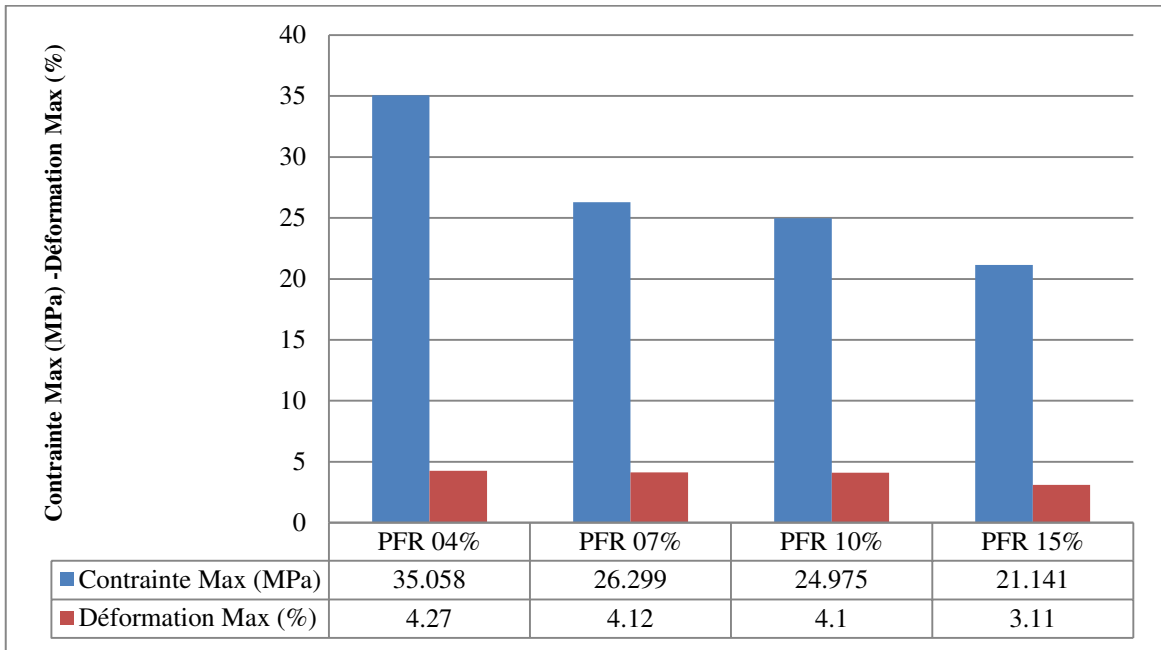


Figure III.25 : Contrainte Max (MPa) -Déformation Max (%) des différents fractions massiques de composite.

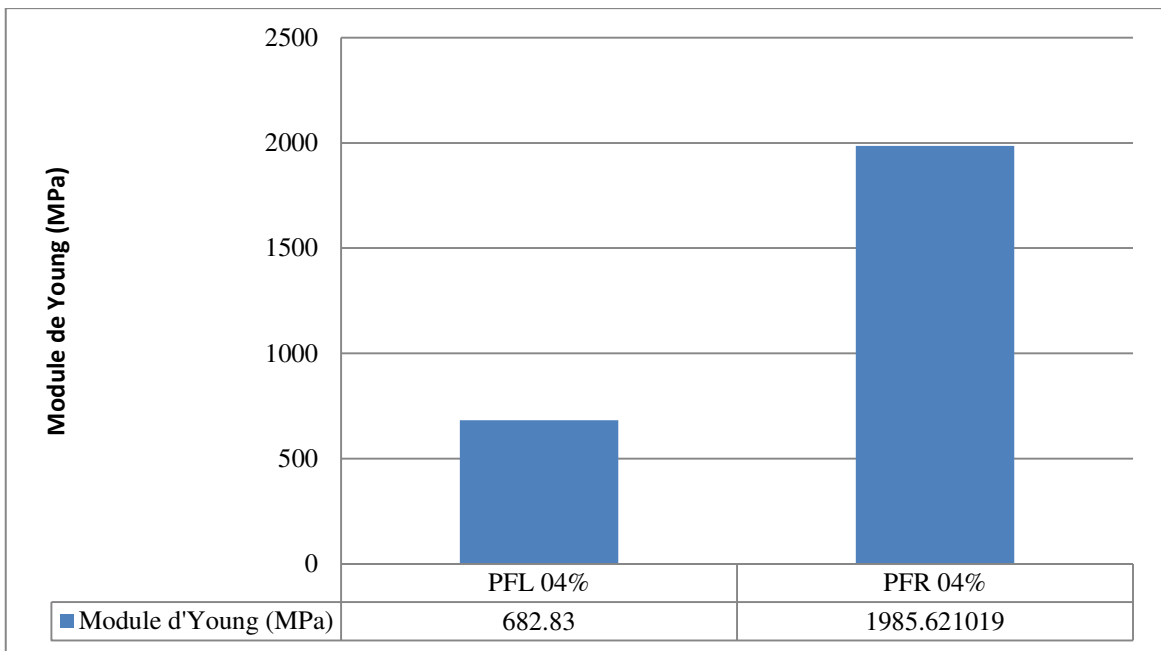


Figure III.26 : Module d'Young des différents types des composites de fraction massique 04%.

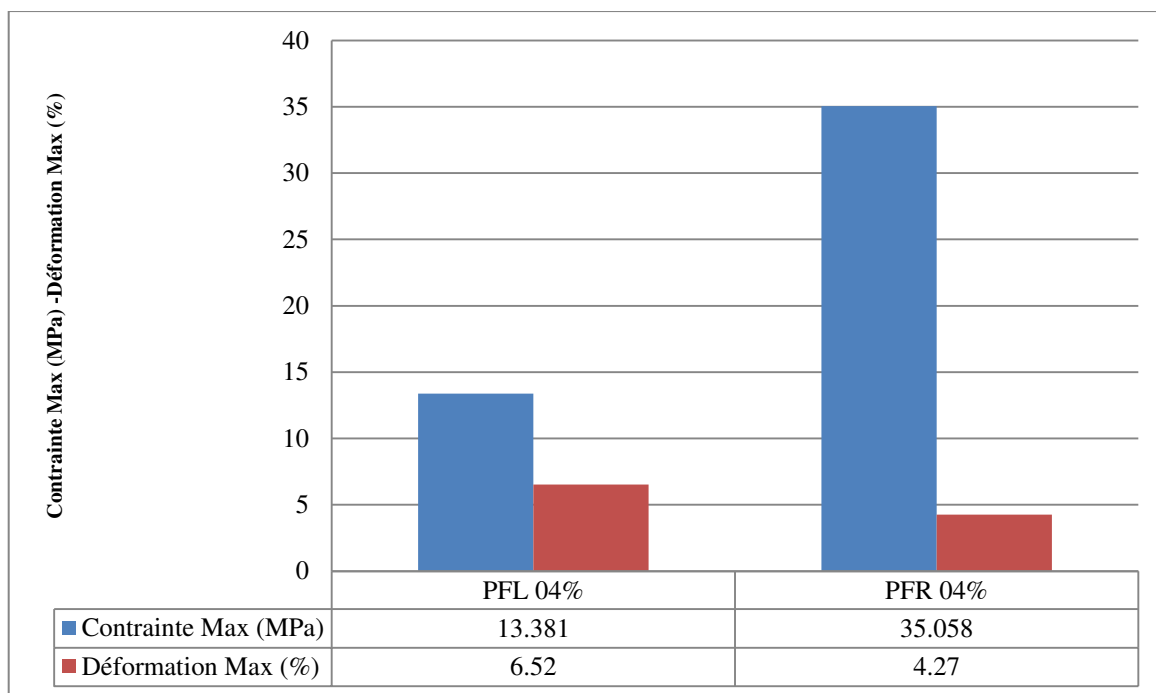


Figure III.27 : Propriété mécanique des différents types des composites de fraction massique 04%.



### Références

[MOH-18] Mohamed, B., mémoire de master, « Elaboration des matériaux composites bio-sourcés à base des fibres de palmier dattier ». 2018.

[YOU-18] DJEBLOUN Youcef, (2018), thèse de doctorat « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales ».

---

*Conclusion*  
*générale*

---

### Conclusion générale

L'objectif de cette étude présente des résultats d'une étude expérimentale du comportement mécanique d'un biomatériau composite renforcé par des fibres courtes de palmier dattier procédé par thermo-compression. Ce matériau principalement adaptés à la conception mécanique dans le domaine du transport (accessoire automobile) et emballage,...

Dans ce travail, nous avons présenté un matériau composite bio-sources à basse d'une matrice polypropylène et de fibres de Rachis de palme de palmier dattier avec différente fraction massique (4, 7, 10 et 15%).

A ce travail nous a permis de dégager les points suivants :

Des informations bibliographiques, théoriques et pratiques qui concernent les matériaux composites, leur fabrication et leur utilisation dans les conceptions des pièces mécaniques.

Après l'essai de flexion trois points, nous obtenons les résultats suivantes :

- Les valeurs de module de Young augmentent d'une façon remarquable avec l'augmentation de la fraction massique de fibres de palmier dattier dans le matériau composite.
- L'augmentation du taux de fibres de palmier dattier dans les plaques moulés, entraîne une diminution de la contrainte maximale et de la déformation maximale.
- D'après la comparaison, on dire que le renforcement du polypropylène par la fibre de Rachi donne une amélioration remarquable de module de Young par rapport la fibre de Lif de palmier dattier.

En globale, les résultats obtenus de l'étude indiquent que la fibre Rachi peut être utilisée comme les autres fibres végétales (chanvre, jute, lin et sisal...) et la possibilité de l'utiliser comme renfort dans les matériaux composites pour diverses utilisations industrielles.

Comme perspectives futures à ce travail, nous cherchons des nouveaux matériaux composites à base de matrice et renfort biodégradable avec des propriétés mécaniques motivé.

## Résumé :

L'objectif de ce travail expérimental est d'extraire des propriétés mécaniques à travers des expériences de flexion trois points d'un composite bio-sources à base des fibres de palmier dattier de la région de Biskra et d'une matrice polypropylène. Ce matériau composite a été développé en deux étapes :

- Première étape : Préparation du pré-mélange, ce forme des particules des fibres courtes et de matrice Polypropylène
- Deuxième étape : Nous avons moulé ces compounds à l'aide d'un presse thermique pour préparer des plaques de ce matériau avec différentes fractions massiques de fibres.

## Mots clé:

Matériau bio-composite, Fibre palmier dattier, Matrice polypropylène, Fraction massique, Flexion trois point.

## الملخص

الهدف من هذا العمل التجريبي استخراج الخصائص الميكانيكية عن طريق تجارب الانحناء ثلاثي النقاط لمادة مركبة حيوية المكونة من ألياف نخيل التمر(الجريد) لمنطقة بسكرة ومن مصفوفة البولي بروبيلين. حيث تمت صناعة هذه المادة المركبة عبر مرحلتين :

- المرحلة الأولى : تحضير الخليط الأولي. عبارة عن جزيئات من ألياف قصيرة و مصفوفة البولي بروبيلين.
- المرحلة الثانية : قمنا بقولبة هذه الجزيئات باستخدام ضاغطة حرارية لتحضير ألواح من هذه المادة ذات نسب كتلية مختلفة من الألياف.

## المفاتيح

مادة مركبة حيوية، ألياف النخيل، مصفوفة البولي بروبيلين، نسب كتلية، انحناء ثلاثي نقطة.