

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique



Thème

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de **Master L.M.D**
Option : Construction Mécanique

Présentée par :
BRAHAM Mahmoud

Étude numérique du comportement à la flexion de composites bio-sourcés

Devant le jury composé de :

Khelifa Houcine	M.A.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Président
Malim Madani	M.A.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Examineur
Deghboudj Samir	M.C.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Encadreur

Année universitaire: 2020/2021



Remerciements

*Je tiens à remercier Allah qui m'a donné la puissance et la volonté pour rédiger
ce modeste mémoire.*

*Je tiens à remercier mon encadreur Mr DAQBONDJ Samir qui m'aide,
oriente et conseille pendant l'élaboration de mon mémoire.*

Je remercie tous les enseignants du département construction mécanique.

*Mes remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de lire
et d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent aussi au : Mr AGGOUN Rabeh et Dr
LEMTA Nour ELhouda.*

Dédicaces

Avec une fierté, je dédie ce mémoire à mes parents.

En particulier, à ma femme qui a été toujours là pour moi.

A mes frères et leurs femmes.

A mes sœurs et leurs maris.

Un grand merci pour : BENADA Houcine, FETMI Zakaria,

MESSADIA Rabie.

Liste des abréviations

PP	polypropylène
PPS	polysulfure de phénylène
PA	Polyamide
PES	Polyéther-sulfone
PEI	Polyéther-imide
PEEK	Polyéther-éther-cétone

Liste des tableaux

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1 Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques thermoplastiques	07
Tableau I.2 Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques thermodurcissables	08

Chapitre II

Les fibres végétales

Tableau II.1 Propriétés physique et mécaniques des fibres naturelles les plus courantes	21
Tableau II.2 Teneur en cellulose de quelques matières végétales	23
Tableau II.3 Composition chimique de certaines fibres naturelles courantes	25
Tableau II.4 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales	26

Chapitre III

Caractérisation micromécaniques des biocomposites étudiés

Tableau III.1 Caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites	45
Tableau III.2 Propriétés mécaniques des composite bio sourcés, obtenues par l'approche analytique	47
Tableau III.3 Systèmes d'unités standard d'ABAQUS	50
Tableau III.4 Propriétés mécaniques des composite bio sourcés, obtenues par l'approche numérique	55

Chapitre IV

Simulation numérique de l'essai flexion 3 points des biocomposites étudiés

Tableau IV.1 Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon la norme EN ISO 14125	61
Tableau IV.2 Dimensions de l'éprouvette choisies selon la norme EN ISO 14125	61
Tableau IV.3 Module de flexion des composite bio sourcés	68

Liste des figures

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

Fig. I.1 Constituant de base d'un composite	05
Fig. I.2 Matériau composite	06
Fig. I.3 Organigramme des différents types des matrices	07
Fig. I.4 Diverses formes et origines de renforts	09
Fig. I.5 Composite monocouche	10
Fig. I.6 Composite stratifié	10
Fig. I.7 Composite sandwichs	11
Fig. I.8 Principe du moulage au contact	11
Fig. I.9 Principe du moulage par projection simultanée	12
Fig. I.10 Moulage sous vide	13
Fig. I.11 Moulage par compression	14
Fig. I.12 Moulage par injection	15
Fig. I.13 Moulage par centrifugation	15

Chapitre II

Les fibres végétales

Fig. II.1 Le Lin	18
Fig. II.2 Ramie	19
Fig. II.3 Sisal	19
Fig. II.4 Coir de la noix de coco	20
Fig. II.5 Chanvre	20
Fig. II.6 Structure de la fibre végétale	22
Fig. II.7 Modèle de la description de structure d'une fibre végétal	22
Fig. II.8 Structure chimique d'une molécule de cellulose	23
Fig. II.9 Les différentes structures de l'hémicellulose	24
Fig. II.10 Un exemple de structure de la lignine	24
Fig. II.11 Structure de la pectine	25
Fig. II.12 Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales	27
Fig. II.13 Plante de diss à l'état naturel	28
Fig. II.14 Préparation de solution NaOH : a) NaOH et b) Dissolution de NaOH dans l'eau distillée	29
Fig. II.15 Procédé mécanique pour extraction les fibres : a) Brossage .b). Immersion dans l'eau distillée. c)Séchage	29
Fig. II.16 Fibre de DISS : a) avant immersion dans la solution NaOH et b) après immersion dans la solution NaOH	30

Fig. II.17 Tige de DISS après traitement	30
Fig.II.18 Présentation schématique d'un palmier dattier	31
Fig.II.19 Sisal	33
Fig.II.20 Extraction des fibres de sisal : (a) plante de sisal, (b) décorticage, (c) séchage, (d) fibre brute.	35

Chapitre III

Caractérisation micromécaniques des biocomposites étudiés

Fig.III.1 Constituants d'un matériau composite	39
Fig.III.2 Propriétés d'un matériau composite dépendant de celles de ses constituants	40
Fig.III.3 pli unidirectionnel	40
Fig. III .4 Variation des modules d'Young longitudinal E_L et transversal E_T en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices	47
Fig. III .5 Variation des modules de cisaillement G_{LT} et G_{TT} en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices	48
Fig. III .6 Variation des modules de compression hydrostatique latérale K_L en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices	49
Fig. III.7 Variation du coefficient de Poisson ν_{LT} en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices	49
Fig. III .8 Quelques éléments de la bibliothèque intégrée dans ABAQUS	51
Fig. III .9 Volume élémentaire représentatif (VER)	53
Fig. III .10 Dessin du volume élémentaire représentatif (VER)	53
Fig. III .11 Assemblage du volume élémentaire représentatif (VER)	54
Fig. III .12 Easy PBC plugin installée dans ABAQUS	54
Fig. III .13 Maillage du volume élémentaire représentatif (VER)	54

Chapitre IV

Simulation numérique de l'essai flexion 3 points des biocomposites étudiés

Fig.IV.1 Dispositif de l'essai flexion 3 points	58
Fig.IV.2 Déformation de l'éprouvette pendant un essai flexion 3 points	59
Fig.IV.3 Principe d'essai de flexion 3 points	60
Fig.IV.4 Eprouvette normalisée utilisée dans la simulation de l'essai de flexion 3 points	62
Fig.IV.5 Modelisation de l'éprouvette dans la module Part	62
Fig.IV.6 Modelisation des appuis et du poinçon dans la module Part	63
Fig.IV.7 Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à 0°	63
Fig.IV.8 Assemblage des éléments du modèle (éprouvette, poinçon et appuis)	64
Fig.IV.9 Conditions aux limites appliquées	65
Fig.IV.10 Maillage du modèle élément fini de l'éprouvette avec des éléments de type SR4	65
Fig. V.11 Maillage d'appuis et du poinçon	66
Fig.IV.12 Etat déformée de l'éprouvette et mise en évidence du point de calcul	66

Fig.IV.13 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion points : biocomposites à matrice Polyester	67
Fig.IV.14 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion points : biocomposites à matrice Polyamide	67
Fig.IV.15 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion 3 points : biocomposites à matrice Epoxyde	67
Fig.IV.16 Variation des modules de flexion des composite bio sourcés	68

Résumé

Les matériaux composites renforcés par des fibres végétales ont suscité un grand intérêt ces dernières années. Cet intérêt est dû principalement à leurs avantages économiques et environnementaux qui proviennent de leur composition naturelle qui leur permet de contribuer à la promotion de la politique du développement durable. L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement en flexion de bio composites issues de la combinaison de trois types de fibres végétales (sisal, palmier dattier , diss) avec trois matrices polymériques (époxy, polyester , polyamide). Cette étude a permis de caractériser ces composites bio-sources en déterminant leurs propriétés micromécaniques par une approche analytique basée sur la loi de mélange et par une approche numérique utilisant le code de calcul ABAQUS. Par la suite des simulations de l'essai de flexion trois points ont été conduites dans le but de déterminer la rigidité à la flexion de ces bio composites.

Mot clef : Bio composites ; homogénéisation micromécanique ; simulation numérique ; essai de flexion trois points ; ABAQUS

ملخص

أثارت المواد المركبة المقواة بالألياف النباتية اهتمامًا كبيرًا في السنوات الأخيرة. ويرجع هذا الاهتمام بشكل رئيسي إلى مزاياها الاقتصادية والبيئية التي تأتي من تكوينها الطبيعي الذي يسمح لها بالمساهمة في تعزيز سياسة التنمية المستدامة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة سلوك الانحناء للمركبات الحيوية الناتجة عن الجمع بين ثلاثة أنواع من الألياف النباتية (السيزال ، نخيل التمر ، الديس) مع ثلاث مصفوفات بوليمرية (إيبوكسي ، بوليستر ، بولي أميد). أتاحت هذه الدراسة توصيف هذه المركبات ذات المصدر الحيوي من خلال تحديد خصائصها الميكرو ميكانيكية من خلال نهج تحليلي قائم على قانون الخلط ومن خلال نهج رقمي باستخدام كود حساب ABAQUS. بعد ذلك، تم إجراء عمليات محاكاة لاختبار الانحناء ثلاثي النقاط من أجل تحديد صلابة الانحناء لهذه المركبات الحيوية.

Abstract

Compound materials reinforced with vegetable fibers have aroused great interest in recent years. This interest is mainly due to their economic and environmental advantages which come from their natural composition which allows them to contribute to the promotion of the policy of sustainable development. The main objective of this work is to study the bending behavior of bio composites resulting from the combination of three types of plant fibers (sisal, date palm, diss) with three polymeric matrices (epoxy, polyester, polyamide). This study made it possible to characterize these bio-source composites by determining their micromechanical properties by an analytical approach based on the mixing law and by a numerical approach using the ABAQUS calculation code. Subsequently, simulations of the three-point bending test were carried out in order to determine the bending stiffness of these biocomposites.

Keywords: Bio composites; micromechanical homogenization; Numerical simulation; three-point bending test; ABAQUS

SOMMAIRE

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
ملخص	
Abstract	
Table des matières	
Introduction générale	01
Chapitre I	
Généralités sur les matériaux composites	
I.1 Introduction	04
I.2 Définition des matériaux composite	04
I.3 Classification des matériaux composites	05
I.3.1 Les composites à grandes diffusions (GD)	05
I.3.2 Les composites à hautes performances (HP)	05
I.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites	05
I.5 Les constituants de base des matériaux composites	06
I.5.1 Matrice	06
I.5.2 Les renforts	08
I.5.3 Les charges	09
I.5.4 Les additifs	09
I.6 Matériaux composites structuraux	09
I.6.1 Les monocouches	09
I.6.2 Les stratifiées	10
I.6.3 Les sandwichs	10
I.7 Mise en œuvre des matériaux composites	11
I.7.1 Moulage au contact	11
I.7.2 Moulage par projection simultanée	12
I.7.3 Moulage sous vide	13
I.7.4 Moulage par compression	13
I.7.5 Moulage par injection	14
I.7.6 Moulage par centrifugation	15
Références bibliographiques du chapitre I	16
Chapitre II	
Les fibres végétales	
II.1 Définition	18
II.2 Présentation et propriétés de fibres végétales	18
II.2.1 Le lin	18
II.2.2 Ramie	19
II.2.3 Sisal	19
II.2.4 Coir de la noix de coco	20
II.2.5 Chanvre	20
II.3 Structure de la fibre végétale	21
II.4 Composition chimique d'une fibre végétale	22
II.4.1 Cellulose	23
II.4.2 Hémicellulose	23
II.4.3 Lignine	24
II.4.4 Pectines	25
II.4.5 Les cires	25
II.5 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales	26

II.6	Extraction des fibres	26
II.6.1	Rouissage biologique	26
II.6.2	Rouissage chimique	27
II.6.3	Rouissage mécanique	27
II.7	Description des plantes étudiées	28
II.7.1	Le diss	28
II.7.1.1	Extraction des fibres de diss	28
II.7.1.2	Traitement des fibres de diss	29
II.7.2	Le palmier dattier	30
II.7.2.1	Le palmier dattier du point de vu botanique	31
II.7.2.2	Description morphologique du palmier dattier	32
II.7.2.3	Sous-produits de palmier dattier et leurs applications	32
II.7.2.4	Variétés de palmier dattier en Algérie	32
II.7.3	Le sisal	33
II.7.3.1	Définition	33
II.7.3.2	La culture du sisal	34
II.7.3.3	Extraction des fibres de sisal	34
	Références bibliographiques du chapitre II	36
	Références bibliographiques du chapitre II	37

Chapitre III

Caractérisation micromécaniques des biocomposites étudiés

III.1	Homogénéisation et analyse micromécanique	39
III.2	Composite unidirectionnel	39
III.3	Loi des mélanges	40
III.4	Homogénéisation d'un composite unidirectionnel	41
III.4.1	Loi de mélange	41
III.4.2	Modèle d'Halpin-Tsai	42
III.4.3	Modèle de Chamis	42
III.4.4	Approche analytique pour la détermination des modules d'élasticité d'un Composite unidirectionnel	43
III.4.5	Analyse du comportement micromécanique des composites biosourcés	44
III.4.5.1	Exemple de calcul des propriétés mécaniques du composite bio sourcé Epoxyde/ Sisal	45
III.4.5.2	Résultats et discussion	46
III.5	Présentation du code de calcul ABAQUS	49
III.5.1	Fichiers d'ABAQUS	50
III.5.2	Modules D'ABAQUS et étapes de modélisation	50
III.5.3	Les éléments dans ABAQUS	51
III.6	Approche numérique pour la détermination des modules d'élasticité des composite unidirectionnels bio-sourcés	51
III.6.1	Programme Easy PBC	51
III.6.2	Modélisation	52
	Références bibliographiques du chapitre III	56

Chapitre IV

Simulation numérique de l'essai flexion 3 points des biocomposites étudiés

IV.1	Introduction	58
IV.2	Essai de flexion 3 points	58
IV.3	Principe d'essai de flexion 3 points	60
IV.4	Eprouvette normalisée de l'essai de flexion 3 points	60
IV.5	Position du problème	61
IV.6	Simulation de l'essai flexion 3 points	62
IV.6.1	Module PART	62
IV.6.2	Module PROPERTY	63

IV.6.3 Module ASSEMBLY	63
IV.6.4 Module STEP	64
IV.6.5 Module INTERACTION	64
IV.6.6 Module LOAD	64
V.6.7 Module MESH	65
V.7 Résultats et discussion	66
Références bibliographiques du chapitre IV	69
Conclusion générale	71

*Introduction
générale*

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, l'utilisation des fibres végétales comme renfort des matériaux composites plastiques a connu un grand essor, dans tous les domaines de l'industrie comme par exemples le transport aéronautique et l'industrie automobile. Les fibres végétales constituent en effet une ressource renouvelable naturellement biodégradable qui dispose de nombreuses qualités mécaniques (résistance et rigidité) et atouts économiques (abondance et prix de revient faible).

Les fibres les plus utilisées sont les fibres de Kenaf, de Jute, de Chanvre et de Lin qui peuvent dans certains cas remplacer la fibre de verre. Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées à cause de leurs propriétés spécifiques intéressantes, telles que la faible densité et la biodégradabilité. Elles ouvrent des perspectives prometteuses qui aident les industriels des matériaux à minimiser leur dépendance vis-à-vis des ressources fossiles.

L'objectif principal de ce travail est de calculer les caractéristiques micromécaniques et d'examiner leur rigidité à la flexion par une approche numérique basée sur méthode des éléments finis en utilisant code de calcul ABAQUS.

Nous avons structuré ce mémoire en quatre chapitres:

Chapitre I : Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les matériaux composites d'une manière générale.

Chapitre II : Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les propriétés essentielles des fibres végétales, utilisés comme renforts dans cette étude.

Chapitre III : Ce chapitre a été consacré aux calculs analytique et numérique des propriétés micromécaniques de quelques matériaux bio-composites élaborés par combinaison de fibres végétales et matrices polymériques.

Chapitre IV : Ce chapitre a été dédié à une simulation par le code de calcul ABAQUS de l'essai flexion 3 points.

En fin, nous avons clôturé notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

*Généralités sur les
matériaux composites*

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité [1].

Le développement des matériaux composites connaît aujourd'hui un grand essor dans pratiquement tous les domaines de l'industrie et de la conception des structures. C'est matériaux sont à l'origine de formidables exploits dans diverses réalisations de haute technologie.

I.2 Définition des matériaux composite

Les matériaux composites sont définis comme l'assemblage d'au moins deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [2]. D'une manière générale on distingue deux phases : une phase continue appelée matrice et une phase discontinue appelée renfort ou matériau renforçant (Fig. I.1).

Le renfort apporte au matériau sa tenue mécanique et la matrice permet d'assurer le transfert des sollicitations extérieures au renfort par l'intermédiaire de l'interface. La matrice permet également de protéger le renfort des agressions extérieures et définit la température maximale d'utilisation [2].

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [3] :

- les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent de loin les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle
- les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme : le spatial, le nucléaire, le militaire ainsi que le freinage (freins carbone)
- les composites à matrices métalliques (CMM)

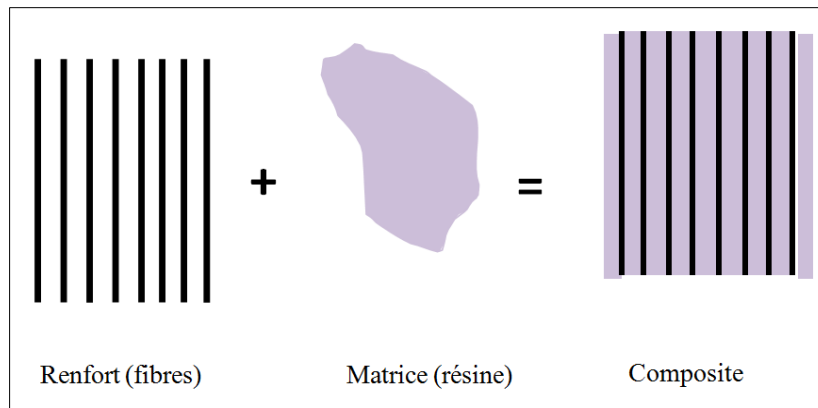


Fig. I.1 Constituant de base d'un composite [3]

I.3 Classification des matériaux composites

I.3.1 Les composites à grandes diffusions (GD)

Ils représentent 95% des composites utilisés ; ce sont en général des plastiques armés ou renforcés, avec un taux de renfort avoisinant 30% pratiquement pour 90% des cas. Les principaux constituants de base sont les résines polyesters dont 95% sont des therm durcissables avec des fibres de verre dans 99% des renforts utilisés. Malgré que les GD soient caractérisés par des propriétés mécaniques intéressantes, ils restent toutes fois inférieurs à celles des métaux.

I.3.2 Les composites à hautes performances (HP)

Sont principalement utilisés dans le domaine de l'industrie aéronautique. Caractérisés par leur coût élevé, ces renforts sont plutôt des fibres de carbone ou d'aramide (kevlar) longues. Ils sont généralement utilisés avec des résines époxydes avec un taux de renfort supérieur à 50%. Leurs propriétés mécaniques (résistance et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux et cela contrairement aux GD

I.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à [5] :

- Leur légèreté
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit

Les principaux inconvénients des matériaux composites sont [5] :

- Mauvaise isolation acoustique (n'amortissent pas)

- La tenue au feu n'est pas bonne pour certaines catégories d'âmes
- Les risques de flambement sont plus élevés que pour les structures classiques

I.5 Les constituants de base des matériaux composites

Comme montré sur la (Fig. I.2), les constituants principaux d'un matériau composite sont :

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

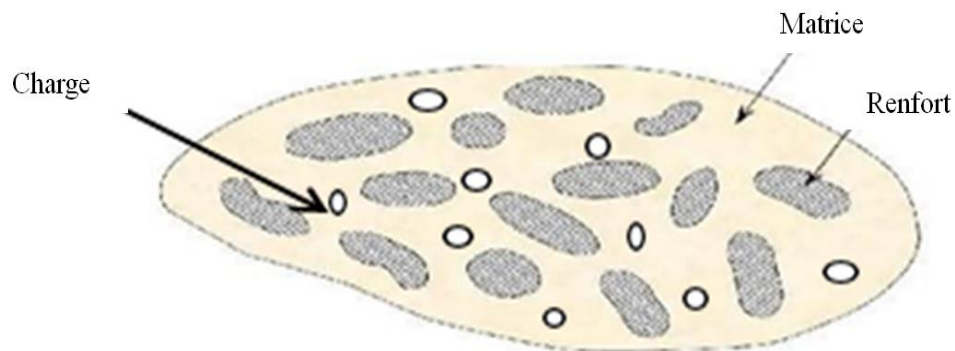


Fig. I.2 Matériau composite [2]

I.5.1 Matrice

D'un point de vue mécanique, la matrice d'un composite se comporte comme un matériau homogène. Elle remplit deux rôles fondamentaux :

- D'un côté elle assure le transfert des sollicitations mécaniques aux fibres qui apportent au composite leurs performances mécaniques élevées. Pour cela, elle doit être ductile et présenter une bonne cohésion avec les fibres afin d'assurer un transfert optimal et limiter les déplacements de l'ensemble.
- D'autre part, elle doit avoir une faible masse volumique, ce qui donne au composite des propriétés spécifiques élevées [6].

Les matrices peuvent être classées selon leurs natures en plusieurs classes, comme présenté sur la (Fig. I.3).

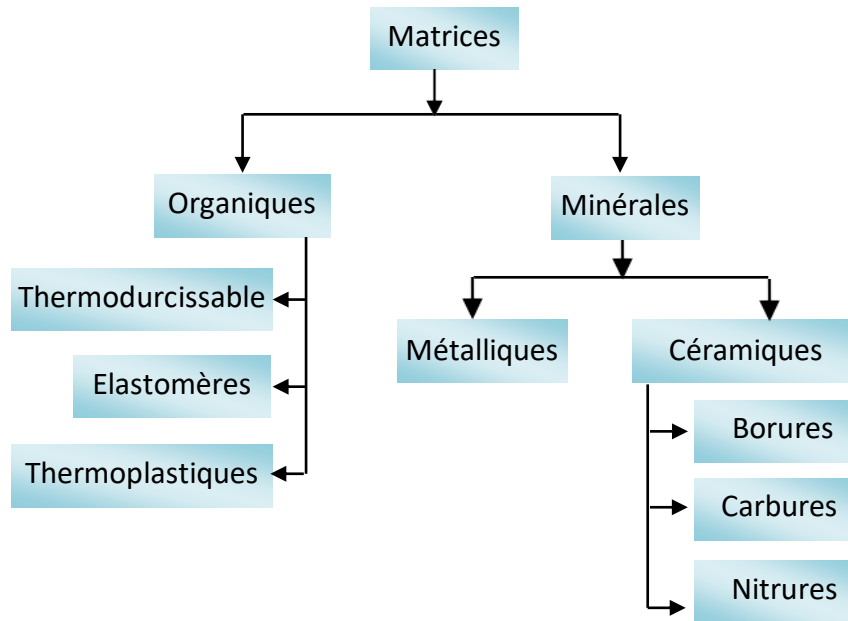


Fig. I.3 Organigramme des différents types des matrices [6]

Pour les composites plastiques, on peut distinguer deux grandes classes :

➤ **Les matrices thermoplastiques**

Les matrices thermoplastiques (macromolécules linéaires ou légèrement ramifiées) sont les plus utilisées compte tenu de leur facilité de mise en œuvre et de leur faible coût. Leur recyclabilité et leur thermo réversibilité constituent des avantages très importants. Elles se présentent sous forme semi-cristallines et sont caractérisées par des propriétés mécaniques faibles [7]. Les principales familles de thermoplastiques sont les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes. Quelques propriétés physico-chimiques des matrices les plus utilisées sont regroupé dans le (Tableau I.1).

Tableau I.1. Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques thermoplastiques [8]

Matrices TP	Masse volumique (Kg.m ⁻³)	Module d elasticite longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de poisson	Coefficient de rupture	Allongement a rupture	Coefficient dilatation Thermique °C ⁻¹
	Mv	E	G	K	G	A	a
PP	900	1200		0,4	30	20 a 400	9 x 10 ⁻⁵
PPS	1300	4000			65	100	5 x 10 ⁻⁵
PA	1100	2000		0,35	70	200	8 x 10 ⁻⁵
PES	1350	3000			85	60	6 x 10 ⁻⁵
PEI	1150	3300			105	60	6 x 10 ⁻⁵
PEEK	1300	4000			90	50	5 x 10 ⁻⁵

➤ Les matrices thermodurcissables

Les thermodurcissables se solidifient ou « durcissent » de manière irréversible lorsqu'ils sont chauffés. Ils ne peuvent pas être remodelés plus tard par un nouveau chauffage. Les thermodurcissables sont habituellement des polymères tridimensionnels dans lesquels le taux de réticulation entre les chaînes est très important une fois qu'ils sont durcis par la chaleur. Les réticulations restreignent les mouvements des chaînes et mènent à un matériau rigide, solide et résistant. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie automobile et les constructions. Ils servent également à créer des jouets, des vernis, des coques de bateau et des colles [9]. Le (Tableau I.2), regroupe les propriétés physiques et mécaniques de quelques thermodurcissables.

Tableau I.2 Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques thermodurcissables [8].

MatricesTD	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %
Polyester	1 200	4 000	1 400	0.4	80	2.5
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0.4	130	2
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0.4	70	2.5
Vinylester	1 150	3 300			75	4
Silicone	1 100	2 200		0.5	35	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1
Uréthanne	1 100	700 à 7 000				100

I.5.2 Les renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de fibres sont disponibles 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 [10].

- Linéique (fils, mèches)
- Tissus surfaciques (tissus, mats)
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la (Fig. I.4).

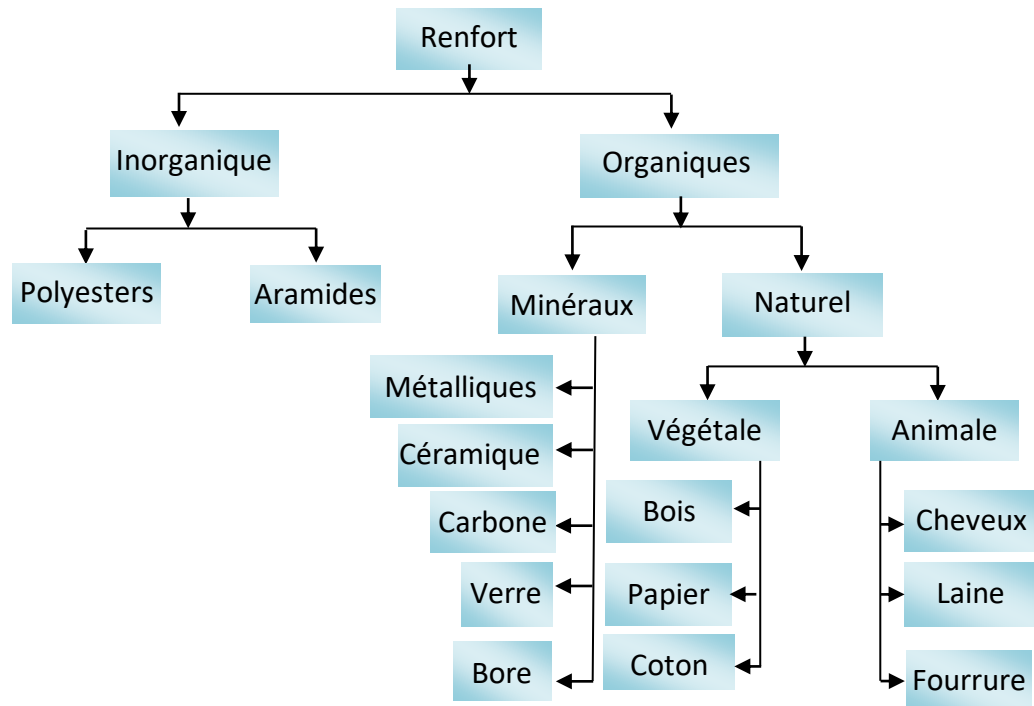


Fig. I.4 Diverses formes et origines de renforts [10]

I.5.3 Les charges

L'objet de l'incorporation des charges est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en [11] :

- Charges sphériques pleines ou creuses
- Charges non sphériques

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

I.5.4 Les additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme [11]:

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

I.6 Matériaux composites structuraux

I.6.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort: à fibres longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes (Fig. I.5).

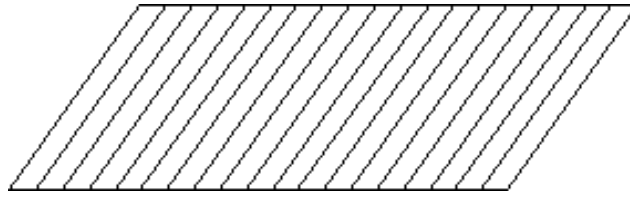


Fig.I.5 Composite monocouche [12]

I.6.2 Les stratifiées

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques (Fig. I.6) [12].

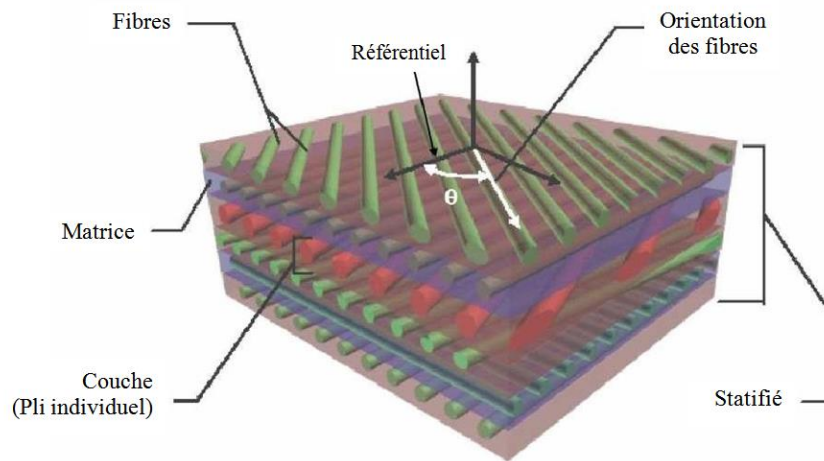


Fig. I.6 Composite stratifié [13].

I.6.3 Les sandwichs

Les matériaux composites de type sandwichs ont principalement constitués de deux composants appelés peaux et noyau (FigI.7). Les propriétés de ces matériaux dépendent de celles du noyau et des peaux (essentiellement de leurs épaisseurs et des caractéristiques de liaison entre elles) [14].

➤ Le noyau

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisé comme noyau.

Ces matériaux sont divisés en trois classes [14] :

- Matériaux solide à faible densité (balsa et autres types de bois)
- Matériaux à haute densité en forme cellulaire (nid d'abeilles)
- Matériaux à haute densité en forme ondulée (feuilles ondulées)

➤ La peau

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple :les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane,...etc. Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [14].

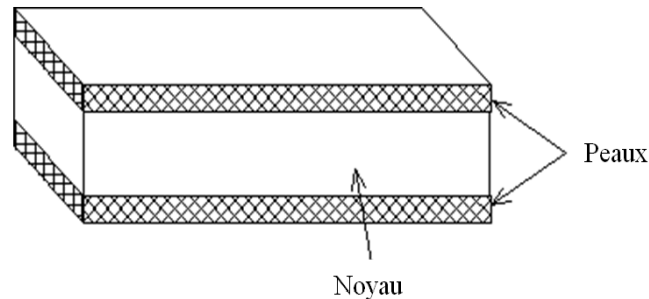


Fig.I.7 Composite sandwichs [14]

I.7 Mise en œuvre des matériaux composites

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre [2]. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat. Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

I.7.1 Moulage au contact

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée « gelcoat ». (Fig. I.8)

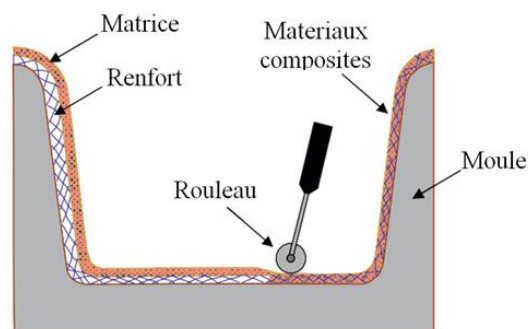


Fig.I.8 Principe du moulage au contact [2]

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes [2]:

- Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
- Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un bullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
- Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
- La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
- Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

I.7.2 Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée des fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé [2]. (Fig.I.9)

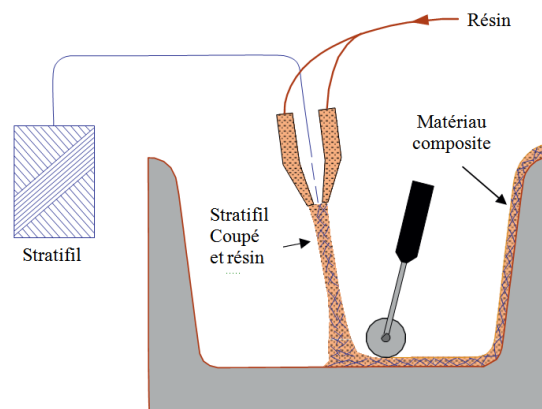


Fig. I.9 Principe du moulage par projection simultanée [2]

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes. Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.

I.7.3 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane Assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étalée débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité. Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes [2]. (Fig. I.10)

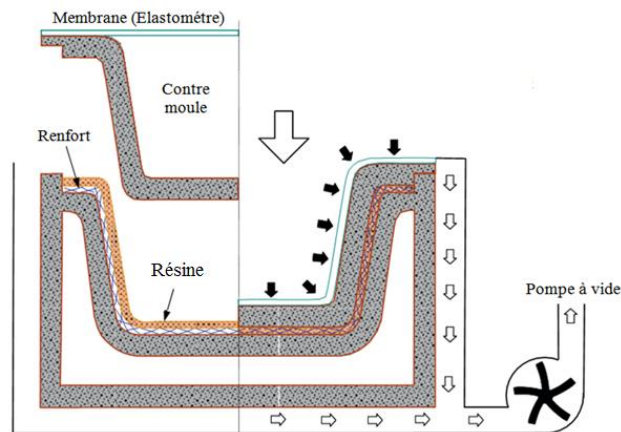


Fig. I.10 Moulage sous vide [2]

I.7.4 Moulage par compression

Le moulage de matériaux composites avec la technique de compression basse pression est mis en place à l'aide d'une presse à compression, d'un moule et d'un contre-moule rigide (Fig. 1.11). Dans un premier temps, le mat (renfort) est disposé sur le moule inférieur. La résine est ensuite versée sur le mat. La presse est alors fermée et mise sous pression. Le moule

et le contre-moule pressent la résine et le mat, l'obligeant à former un matériau composite et à se répartir uniformément, en évacuant le surplus de matière via les orifices prévus à cet usage. Lorsque le matériau est dur, les moules peuvent être séparés pour procéder au démoulage. Dans certains cas, une étape d'ébavurage sera nécessaire [2].

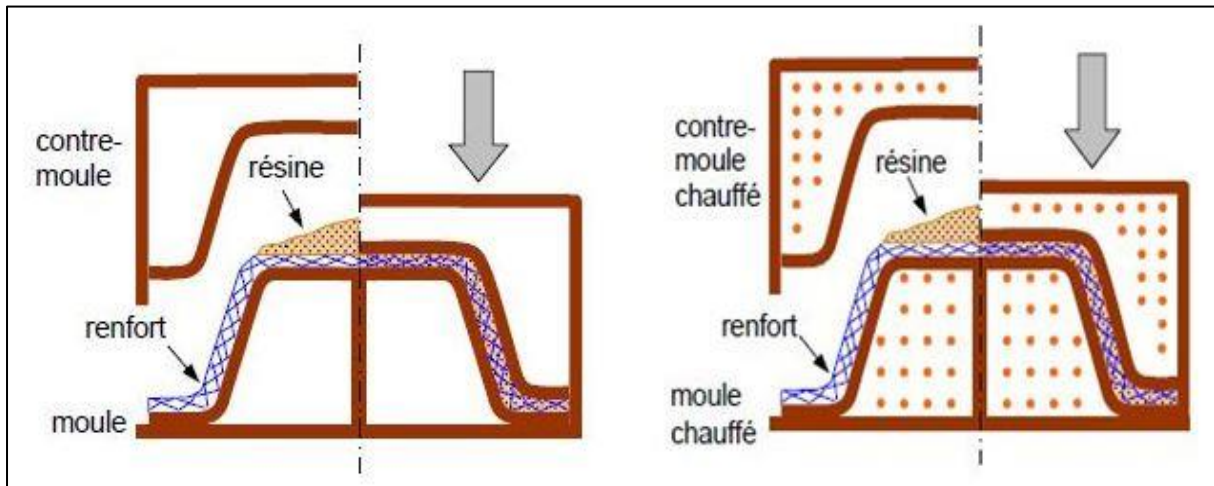


Fig.I.11 Moulage par compression [2]

I.7.5 Moulage par injection

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques. Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats pré imprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation. Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette Technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries [2]. (Fig. I.12)

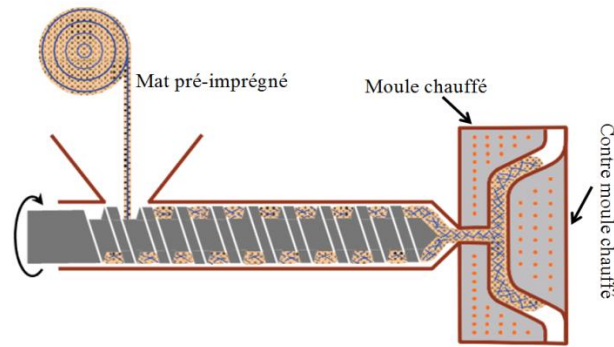


Fig.I.12 Moulage par injection [2]

I.7.6 Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation, de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min).

Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifié coupé ;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite en suite lors de la centrifugation. Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule [2]. (Fig. I.13)

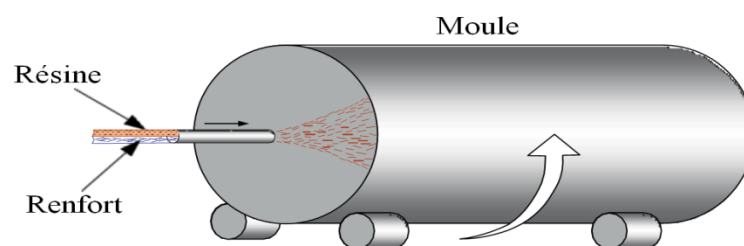


Fig.I.3 Moulage par centrifugation [2]

Références bibliographiques du chapitre I

[1]	Metrane Noureddine, Menail Younes, Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques (ONAAPH Annaba), Mémoire de Master 2, Université Badji Mokhtare Annaba,(2018-2019)
[2]	Jean.M.Berthelot,Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures ,5eme Ed, Technique Et Documentation, Lavoisier, (2012)
[3]	http://www.cluster-meca.fr/qu.est.ce.qu.un.materiau.composite-364500-5-41-45.php
[4]	DAGHBOUDJ Samir.Etude Comparative des Approches Hyper et Hypo Elastiques Utilisées dans l'Etude du Comportement Mécanique des Renforts Tissés, Thèse de doctorat, Université 8 mai 1945 Guelma,(2015).
[5]	El Hadji Babacar LY,Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres de cellulose, thèse de doctorat,Institut National Polytechnique de grenoble, (2008).
[6]	Khedidja Hacini, Abdelhamid Souahi, Etude Du Comportement Mécanique En Flexion 3 Points D'un Matériau Composite Par Les Eléments Finis, Diplôme de magister, Université Badji Mokhtare Annaba,(2009).
[7]	Mohamed Ragoubi, Contribution à l'amélioration de la compatibilité inter faciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne, thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré Nancy 1,(2010).
[8]	http://www.mecastyle.com/calcul-de-structure-materiau-composite
[9]	Hubert Latappy, Étude des COV issus de la dégradation thermique et oxydative de matériaux polymères,thèse de doctorat, Université Paris-sud , (2014).
[10]	Laurent Gornet,Généralités sur les matériaux composites, Ecole d'ingénieur, (2008)
[11]	Rouam Kamilia, Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, Diplôme de magister, Université M'hamed Bougara- Boumerdes,(2013,2014)
[12]	http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm
[13]	Samir Bensaid,Contribution a la caracterisation et a la modelisation electromagnetique et thermique des materiaux composites anisotropes, Université de Nantes, Thèse de doctorat ,(2006).
[14]	Nikhil.Gupta,Characterization of syntatic foams and their sandwich composites: modeling and exprimental approches, thèse de doctorat, The Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, (2003).

Chapitre II
Les fibres végétales

Chapitre II

Les fibres végétales

II.1 Définition

On désigne par les fibres ligno-cellulosiques des constructions biologiques fibrillaires issues du végétal habituellement constituées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, et d'un taux plus faibles d'extraits non azotés, de matière protéique brute, de lipide et de matière minérale. La variation de chacun de ces constituants est souvent en fonction de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [1].

II.2 Présentation et propriétés de fibres végétales

Les fibres végétales trouvent beaucoup d'applications dans le domaine de l'industrie textile (habillement, ameublement). Vu leurs propriétés mécaniques spécifiques et leur caractère renouvelable, elles commencent à trouver des débouchés dans d'autres secteurs d'activité industrielle (emballage, automobile). Il existe une grande variété de fibres végétales qui ont prouvé et justifié leur emploi de plus en plus croissant, les plus célèbres sont [2]:

II.2.1 Le lin

Le lin appartient à la famille des linacées. C'est une plante annuelle dont la tige atteinte de 0.6 à 1.2 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Le lin textile est une culture septentrionale. En Europe, on le trouve en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin est soit coupé, soit arraché. On récupère la matière textile qui se trouve être la tige de la plante, sous forme de faisceaux qui constituent la fibre technique. Cela requiert trois opérations: le rouissage, le teillage et le peignage. La cellule élémentaire (ou fibre ultime de lin apparaît comme un cylindre imparfait polygonal, généralement à six côtés, comportant éventuellement un lumen (cavité centrale d'une fibre végétale) [3].



Fig. II.1 Le lin [4]

II.2.2 Ramie

La ramie (bochonnerai Nivea) est un arbuscule de la famille des urticacées (en anglais China gras). Elle se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles. L'extraction de la fibre nécessite un décortiquage et un dégomunage très poussé. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17cm de longueur ; elle présente une concentration en cellulose importante, une haute et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement [3].



Fig. II.2 Ramie [5]

II.2.3 Sisal

Ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (agave sisalana). Originnaire de Yucatan, elle est produite en Amérique du sud, en Afrique, aux Antilles et en Extrême Orient les fibres mécaniques sont surtout extraites de la périphérie de la feuille. Un plant de sisal produit environs 200 à 250 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont rouissage et le teillage. Les fibres sont ensuite lavées à grand eau pour enlever les déchets en surplus [3].



Fig. II.3 Sisal [6]

II.2.4 Coir de la noix de coco

Le cocotier (*Cocos nucifera*) est un palmier poussant dans les pays tropicaux. Les fibres sont prélevées dans le coir (mésocarpe fibre) de la noix de coco et sont utilisées en corderie et en sparterie (objet tisse, vanné ou tressé) [3].



Fig.II.4 Coir de la noix de coco [7]

II.2.5 Chanvre

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle herbacée à feuilles palmées contenant des vaisseaux dans le cœur ligneux (xylème) comme le bois dur. Il est cultivé pour sa tige qui contient les fibres longues (la filasse) sur les parties externes et qui est constituée d'une forte proportion de fibres intérieures plus courtes fortement lignifiées (son bois). La filasse qui représente environ 30% de la masse sèche de la tige et utilisée dans le textile, les textiles techniques, le papier et l'isolation. Le bois de chanvre quant à lui, représente environ 70% de la masse de la tige. Il est également utilisé dans les matériaux de construction (bétons de chanvre), ainsi que pour le paillage des sols [8].



Fig. II.5 Chanvre [9]

Les fibres végétales proviennent de différentes sources et présentent différentes propriétés fonctionnelles (tableau II.1). Comparées aux fibres de verre communément utilisées dans le renforcement des matériaux polymères, les fibres naturelles possèdent des performances mécaniques moindres ; cependant, comme leur densité est plus faible, ces fibres présentent des propriétés spécifiques équivalentes aux fibres de verre. De telles caractéristiques peuvent répondre aux exigences de certaines applications pour lesquelles les niveaux de sollicitations sont limités et où le souci de légèreté combiné à une réduction des coûts est recherché. De plus, l'utilisation de ces fibres dans les matériaux composites, notamment à matrice thermoplastique, présente des retombées bénéfiques sur l'environnement, contrairement aux fibres de verre qui ont des impacts négatifs pour l'environnement et pour l'homme (allergie de la peau, cancer pulmonaire...etc.) [10].

Tableau II.1 Propriétés physique et mécaniques des fibres naturelles les plus courantes [10].

Type des fibres	Masse volumique (g/cm ³)	Allongement (%)	Contrainte à la rupture (MPa)	Module de Young (GPa)
Coton	1.5-1.6	3.0–10.0	287–597	5.5–12.6
Jute	1.3–1.4	6 1.5–1.8	393–800	10–30
Lin	1.4–1.5	1.2–3.2	345–1500	27.6–80
Chanvre	1.48	1.6	550–900	70
Ramie	1.5	2.0–3.8	220–938	44–128
Sisal	1.33–1.5	2.0–14	400–700	9.0–38.0
Coir	1.2	15.0–30.0	175–220	4.0–6.0
Bois (Kraft)	1.5	9.21	1000	40
Fibre de verre E	2.5	2.5–3.0	2000–3500	70.0
Fibre de verre S	2.5	2.8	4570	86.0

II.3 Structure de la fibre végétale

La structure des fibres végétales est très variable. Elle se compose presque seulement de fibrille cellulosique dans le cas du poil unicellulaire chez la graine de coton, habituellement elle est un montage de fibrilles formées des couches de cellules longues attachées entre elles par des hémicelluloses et de la lignine. Alors la fibre végétale elle-même représente un composite à la soutien qui est composé par les strates de micro fibrilles cellulosiques de part cristalline, recouvert par un complexe polysaccharidique tendre (hémicelluloses et pectine) réunie par liens hydrogène et covalentes à la lignine.

La fibre végétale comporte plusieurs parois parallèles à son axe et rangées en couches

orientées vers le sens radial. Ces couches forment la lamelle moyenne, la paroi primaire, la paroi secondaire, et entourent le lumen à différents diamètres en fonction de l'espèce. La (Fig. II.6) montre trois couches de micro fibrilles qui forment les parois secondaires S1, S2 et S3 [1].

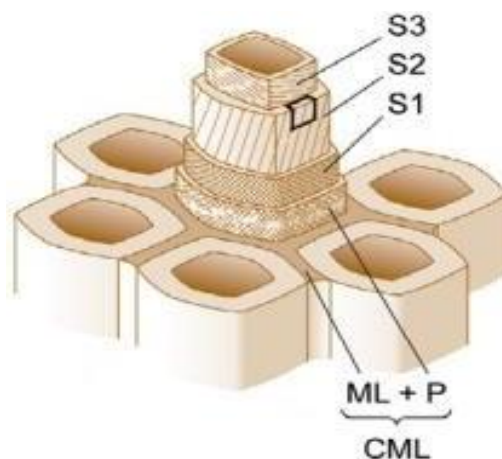


Fig. II.6 Structure de la fibre végétale [1]

Les micros fibrilles sont disposées dans les fibres natives de façon où elles forment un angle micro fibrillaire si l'on réfère à l'axe de la fibre (Fig. II.7), cet angle varie d'une espèce végétale à l'autre. Les propriétés mécaniques d'allongement et de rigidité de la fibre sont expliquées dans une part par l'angle micro fibrillaire.

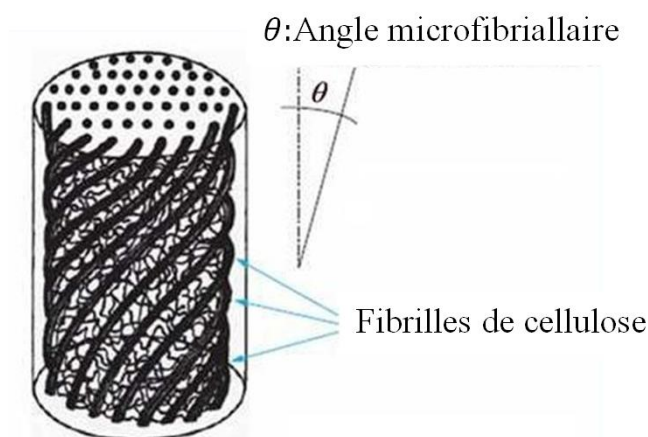


Fig. II.7 Modèle de la description de structure d'une fibre végétal [1]

II.4 Composition chimique d'une fibre végétale

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique qui influe énormément sur leur durabilité et spécialement dans les milieux alcalins [11]. La composition chimique des fibres végétales est formée de plusieurs constituants ligno-cellulosiques et

organiques [11], on peut citer principalement : la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les pectines.

II.4.1 Cellulose

La cellulose est la molécule organique la plus abondante qui soit produite sur terre à chaque cycle photo synthétique. La cellulose est le principal constituant des parois cellulaires des végétaux où elle joue le rôle de maintien. Sa chimie et sa structure permettent d'expliquer ses propriétés. Elle est constituée d'une chaîne de plusieurs centaines à plus de dix mille de glucose liée par des liaisons glycosuriques (Fig. II.8) [11].

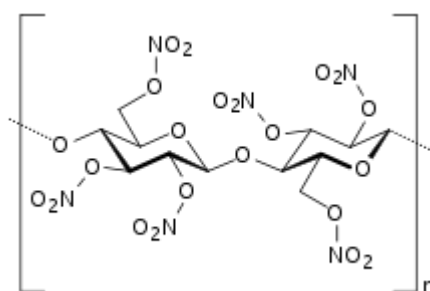


Fig. II.8 Structure chimique d'une molécule de cellulose [11]

La cellulose possède une structure en grande partie cristalline et elle est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé environ 136 GPa. En effet, ce polymère constitue la structure principale de nombreux végétaux avec une teneur variant de 15 à 99%. (Tableau II.2) [11].

Tableau II.2 Teneur en cellulose de quelques matières végétales [11]

Espèces végétales	Teneur en cellulose (%)
Coton	95.99
Lin	70.75
Bambou, bois, paille	40.50
Maïs	17.20

II.4.2 Hémicellulose

L'hémicellulose est présente avec la cellulose dans les parois des cellules des plantes. Sa structure correspond fortement à celle de la cellulose. Néanmoins quelques différences importantes existent, la cellulose a une structure cristalline mais l'hémicellulose est amorphe et donc moins forte. De plus la cellulose est faite de β -glucose comme seul monomère, mais pour la polymérisation d'hémicellulose plusieurs monomères glucidiques, comme la xylose, le mannose, le galactose, le rhamnose et l'arabinose sont possibles. Donc tout comme la lignine, l'hémicellulose existe également sous différentes formes, parmi lesquelles le xylène est la molécule la plus abondante [12].

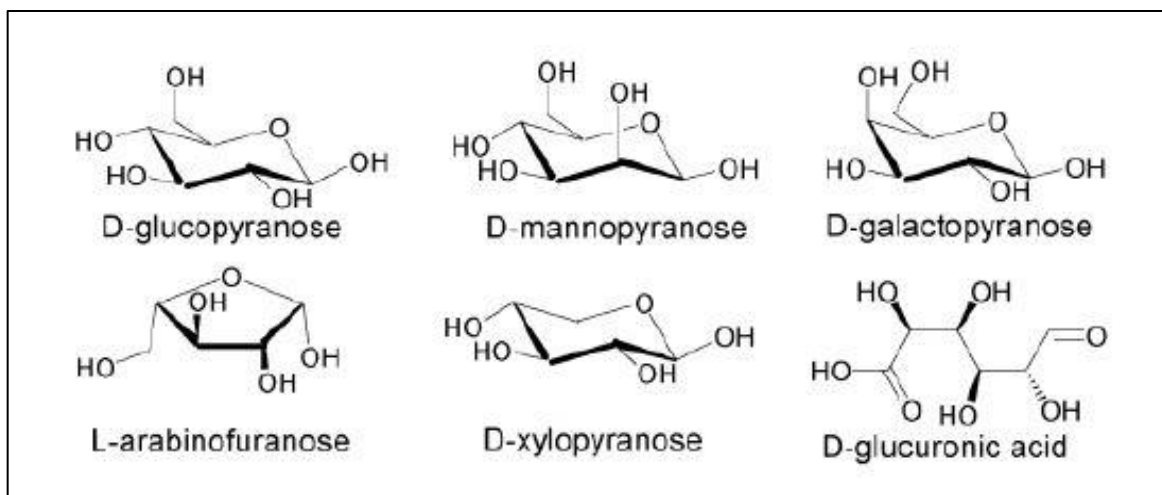


Fig. II.9 Les différentes structures de l'hémicellulose [12]

II.4.3 Lignine

La lignine est un polymère aromatique hétérogène de haut poids moléculaire qui apparaît dans les tissus secondaires des plantes supérieures. Elle est formée de monomères du type phénylpropane. Les trois cycles aromatiques les plus souvent rencontrés sont les alcools coniférylique, coumarylique et sinapylique. Elle forme un réseau tridimensionnel qui incruste la trame polysidique et rend la paroi imperméable et résistante aux attaques microbiennes (Fig. II.10) [11].

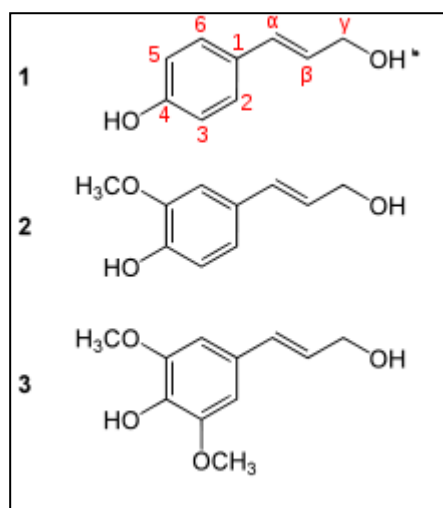


Fig. II.10 Un exemple de structure de la lignine [2]

II.4.4 Pectines

Les pectines sont des polysaccharides acides dont la chaîne principale est composée de monomères d'acide uronique (Fig.II.11) [13].

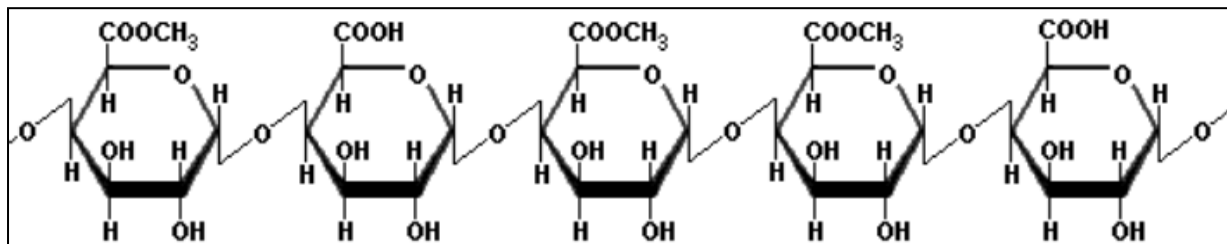


Fig.II.11 Structure de la pectine [13]

II.4.5 Les Cires

Les cires sont des constituants des fibres naturelles qui peuvent être extraits avec de solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [14].

Le (Tableau II.3) présente la composition chimique de différentes fibres végétales utilisées comme renfort dans les matériaux composite.

Tableau II.3 Composition chimique de certaines fibres naturelles courantes [15]

Fiber	Cellulose %	Hémicellulose %	Lignine %	Cires %
Bagasse	55.2	16.8	25.3	–
Bamboo	26–43	30	21–31	–
Lin	71	18.6–20.6	2.2	1.5
Kénaf	72	20.3	9	–
Jute	61–71	14–20	12–13	0.5
Chanvre	68	15	10	0.8
Ramie	68.6–76.2	13–16	0.6–0.7	0.3
Abaca	56–63	20–25	7–9	3
Sisal	65	12	9.9	2
Coco	32–43	0.15–0.25	40–45	–
Huile de palme	65	–	29	–
L'ananas	81	–	12.7	–
Curaua	73.6	9.9	7.5	–
La paille de blé	38–45	15–31	12–20	–
Cosses de riz	35–45	19–25	20	14–17
La paille de riz	41–57	33	8–19	8–38

II.5 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel de ses fibres. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le (Tableau II.4) [11].

Tableau II.4 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [11]

Avantages	Inconvénient
Faible densité et faible coût	Absorption d'eau
Facile à recycler et biodégradables	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO ₂	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible résistance au feu (200 à 230 °C max)
Absence de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable, Non abrasives pour les outillages	Variation de qualité en fonction de lieu de croissance de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique	Renfort discontinu
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	

II.6 Extraction des fibres

L'extraction de fibres végétales est un procédé classique. Le filage des fibres nécessite des transformations : extraction et purification de la matière première ou brute en une forme filable. Vu la diversité des matières brutes, le procédé d'extraction diffère d'un type à l'autre. Pour le coton, les fibres sont sous une forme plus ou moins filable. Certains traitements sont indispensables (élimination des graines etc...). Par contre, d'autres types se récoltent sous forme de tiges. Au cours de l'extraction, on élimine les liants comme les pectines et la lignine. Les fibres obtenues sont appelées les fibres ultimes. Selon la nature et le domaine d'utilisation des fibres, de différents types de traitements sont employés : mécanique, chimique et biologique (bactéries et enzymes) [16]. Les différentes techniques d'extraction sont :

II.6.1 Rouissage biologique

C'est une méthode d'extraction traditionnelle. Le principe repose sur l'utilisation des bactéries de l'environnement pour dissoudre les extractibles. Certaines bactéries, telles que *Bacillus* et *Clostridium* sont utilisées lors du rouissage à l'eau et certains champignons comme le *Pusillus* et *Fusariusslaterium*, sont utilisées lors du rouissage à la rosée. Ces derniers se sont révélés très efficaces pour l'élimination des substances non cellulose des plantes et libérer

la fibre. Malgré le temps d'extraction relativement long, le rouissage atmosphérique fournit des fibres de qualité [16].

II.6.2 Rouissage chimique

Des solutions alcalines ou acides doux sont souvent utilisées pour le rouissage. L'introduction des enzymes accélère le processus de libération de la fibre. L'alcali le plus utilisé est la soude caustique. Les acides doux comme l'acide sulfurique et l'acide oxalique en combinaison avec un détergent sont aussi utilisés pour l'extraction des fibres. On note que la proportion des constituants de la solution de traitement détermine la qualité des fibres extraites [16]. . A titre d'exemple, le procédé Kraft (angl. Kraft Pauling ou sulfate procès) est utilisé pour délignifier de la matière cellulosique comme le bois. C'est une cuisson chimique de 2 heures dans une solution aqueuse (NaOH) et de sulfure de sodium (Na₂S) à la température de 170°C à 175°C [17]. Les anions d'hydroxyde (OH.) et sulfuryl (SH.) dégradent la lignine, l'hémicellulose et les pectines par dissolution.

II.6.3 Rouissage mécanique

La séparation mécanique quant à elle utilise des machines à décortiquer : le vapocraquage, l'ammoniaque et le process Tilby. Cette dernière se révèle efficace, notamment dans l'extraction des fibres de canne à sucre, de maïs et d'autres plantes cellulosiques. L'avantage de ce procès est de réaliser une extraction sans désintégration des constituants [18]. La (Fig.II.12) résume la plupart des procédés de séparation des fibres utilisés de nos jours.

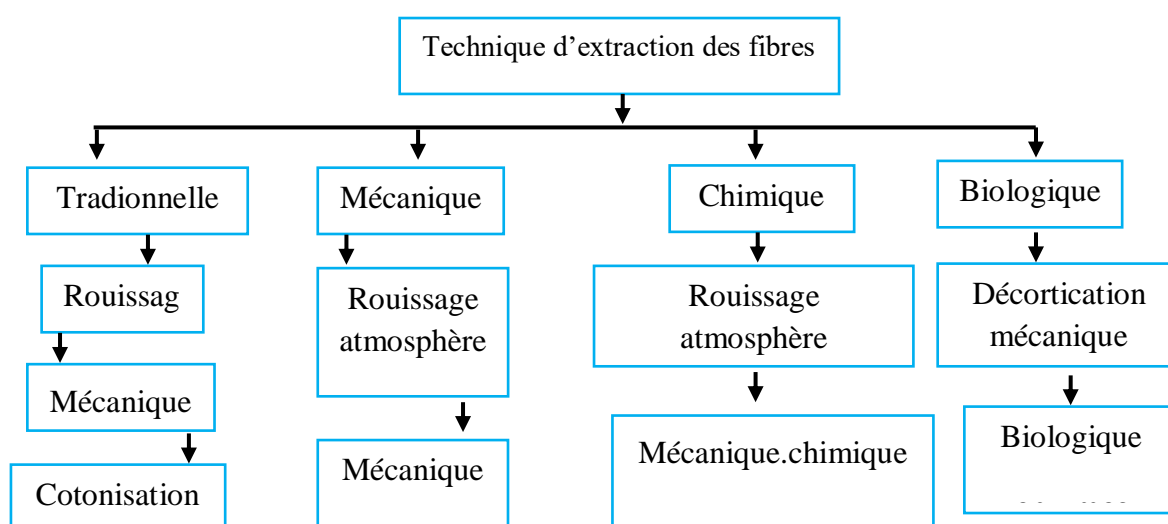


Fig. II.12 Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales [19]

II.7 Description des plantes étudiées

Dans ce travail nous allons étudier le comportement en flexion 3 points de trois variantes de composites plastiques renforcées par trois types de fibres végétales : fibres de diss, les fibres de sisal et fibres extraites de palmier dattier. Ce choix est justifié par l'abondance des plantes dont ces fibres sont extraites dans la flore algérienne.

II.7.1 Le Diss

Le diss connu sous le nom scientifique (*ampélodesmos mauritanicus*), appelé en Italie (*Disa*) et en Espagne (*Carritx*), il appartient à la famille des graminées. C'est une plante répandue dans l'Afrique du nord méditerranéenne et les régions sèches de la Grèce à l'Espagne. En France, on la trouve dans les départements des Alpes-Maritimes, du Var, de la Corse du sud et de l'Hérault [20]. Cette plante était utilisée auparavant dans la réalisation des habitations anciennes de ces régions en raison de ses qualités mécaniques et hydriques et dans d'autres pays, l'utilisation de ces fibres est limitée à la confection des couffins, à lier les branches de vignes ou à la confection des balais cantonniers. Le diss est plante qui se trouve à l'état sauvage, c'est une plante annuelle, et très répandue sur toute la côte algérienne, et jusqu'à plus de 100 km à l'intérieur du pays (Fig. II.13).



Fig.II.13 Plante de diss à l'état naturel [20]

II.7.1.1 Extraction des fibres de Diss

Pour extraire les fibres de diss, les extrémités de la plante sont coupées, puis les tiges obtenues sont immergées dans un bac d'eau durant 15 jours. Les fibres de diss sont extraites à partir des tiges en utilisant une solution chimique (NaOH à 2%). Nous dissolvons de l'hydroxyde de sodium dans de l'eau distillée à l'aide d'un agitateur, les tiges de diss sont traitées avec une solution de NaOH à concentration de 2% durant une 48h (Fig.II.14). [20]



(Fig. II.14) Préparation de solution NaOH : a) NaOH et b) Dissolution de NaOH dans l'eau distillée [20]

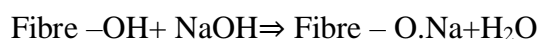
Pour extraire les fibres de diss, on recourt généralement à une extraction mécanique par broissage. Les fibres obtenues sont nommées fibres traitées (Fig.II.15).



Fig.II.15 Procédé mécanique pour extraction des fibres : a) Broissage .b). Immersion dans l'eau distillée. c)Séchage [20]

II.7.1.2 Traitement des fibres de diss

Le but de ce traitement est l'élimination de certaine quantité de lignine de cire et d'impuretés qui recouvrent la surface externe des fibres (Fig.II.17). Le traitement par l'hydroxyde de sodium (2% NaOH) de la fibre favorise l'ionisation du groupe hydroxyde de l'alcoolat [20]:



Ainsi, le traitement alcalin influe directement sur les fibrilles et le degré de polymérisation de la cellulose. Il favorise aussi l'extraction de la lignine et l'hémicellulose la

(Fig.II.16) suivant représente les fibres de DISS avant et après l'immersion par solution de NaOH.



Fig. II.16 Fibre de DISS : a) avant immersion dans la solution NaOH et b) après immersion dans la solution NaOH [20]

Après cette période (48h), les tiges sont lavées à plusieurs reprises par de l'eau, puis lavées une seconde fois avec de l'eau distillée à 2% H_2SO_4 durant 10 min pour neutraliser les traces de NaOH restantes sur la surface des tiges de *diss*. Pour s'assurer, on refait le rinçage et on mesure chaque fois le PH de la solution jusqu'à avoir un PH = 7 (Fig. II.17).



Fig. II.17 Tige de DISS après traitement [20]

II.7.2 Le palmier dattier

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes, originaire de l'Afrique, le palmier dattier est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golfe Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la méditerranée et dans la partie méridionale des Etats Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien

drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage. Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe. De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Le palmier a un tronc très élancé, haut jusqu'à 30 m, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximums, forment une couronne apicale clairsemée (Fig.II.18). Elles sont pennées, longues jusqu'à 6 m ; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte [21]

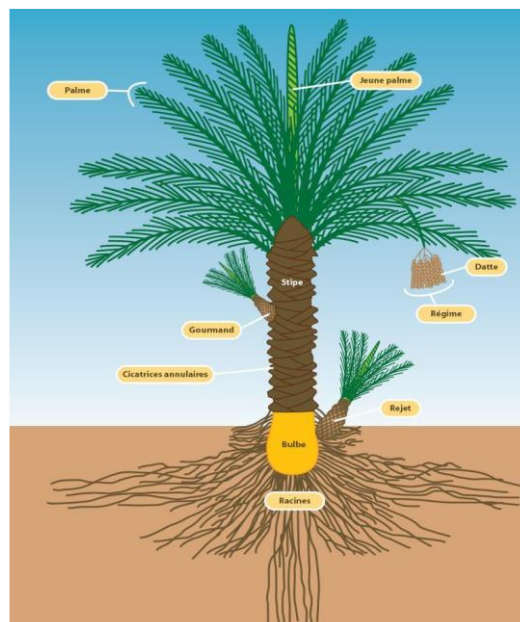


Fig.II.18 Présentation schématique d'un palmier dattier [21]

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant cinq types de fibres [22]:

- fibres de bois de tronc
- fibres de feuilles au niveau des pédoncules
- fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe)
- fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole)
- fibres de liffe (entre les Kornafs, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

II.7.2.1 Le palmier dattier du point de vu botanique

Le palmier dattier est une monocotylédone, dioïque, il existe des palmiers males qui sont «*Dokkars*» et des palmiers femelles qui sont «*Nakhil* ». Le palmier n'est pas un arbre, mais une "herbe géante"(il ne possède pas de vrai bois au sens botanique) L'épaississement de son tronc résulte de l'addition répétée de faisceaux appelé "croissance secondaire ". Ce végétal mesure généralement entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois les 30 mètres de haut, sa durée de vie peut dépasser 100 ans. Le palmier dattier ne commence à produire ses fruits qu'à partir d'un âge moyen de cinq ans et continue sa production évaluée en moyenne de 400 à 600 Kg annuellement pendant 60 ans. Il prospère dans les zones où la température est élevée plus de 20°C, l'humidité basse souvent inférieure à 40%.et la pluviosité presque nulle. [23]

II.7.2.2 Description morphologique du palmier dattier

Le palmier dattier est aussi "*date palm*" en anglais, "*Nakhla*" en arabe et "*Phoenix dactylifera*" en latin. Ce végétal est composé en générale d'un tronc unique non ramifié possédant au sommet une couronne de feuilles [23].On distingue dans le *palmier dattier* les principaux composants suivants : le tronc, la couronne et le palme.

II.7.2.3 Sous-produits de palmier dattier et leurs applications

En plus de sa production de dattes pour l'alimentation humaine, le palmier dattier offre une large gamme de sous-produits exploités par la production saharienne [22]:

- Le vinaigre, l'alcool et les levures, par fermentation microbiologiques des dattes communes
- Farine de dattes utilisées dans la panification
- Jus de dattes, par extraction, utilisé comme sucrerie
- Tronc d'arbre, utilisé dans l'ébénisterie traditionnelle, bois de chauffage et charpentes de bâtiments
- Palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeaux etc., ils peuvent même servir en industrie du papier
- Les régimes de dattes, comme balais traditionnels, et comme combustibles
- Le Liffe pour la confection des semelles de sandales
- le Lacmi, boisson très recherchée par la population locale, représentant la sève qui s'écoule du stipe.

II.7.2.4 Variétés de palmier dattier en Algérie

On distingue dans la littérature plusieurs variétés de palmier dattier, les variétés les plus connues en Algérie sont [22]:

- Deglet Nour, qui est probablement la datte la plus réputée au monde
- Ghars
- Deglet Degla ou Garbaï
- Tafezouine

En dehors de Deglet Nour qui est classée comme une datte fine, les dattes sont classées en dattes molles (Ghars et analogues) et dattes sèches (Degla Beïda et analogues). La répartition des palmiers par variété se présente comme suit :

- Deglet Nour : 7 000 000
- Ghars et analogues : 2 700 000
- Degla Beida et analogues : 8 300 000

La production par variété de dattes est variable selon les années. Elles se situent à peu près de

- 300 000 tonnes pour Deglet Nour
- 110 000 tonnes pour Ghars et analogues
- 220 000 tonnes pour Degla Beida et analogues

En termes d'exportation, le volume de dattes exportées est variable selon les années et se situe aux environs de 12 000 tonnes par an. La datte Deglet Nour est exportée vers plus de 35 pays.

II.7.3 Lesisal

II.7.3.1 Définition

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm [24].



Fig.II.19 Sisal [25]

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante de la famille des *Agavaceae* originaire de l'est du Mexique où on la trouve également sous l'appellation de henequen. Le sisal est également le nom de la fibre extraite des feuilles de cette plante. Très résistante, cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis. L'origine de son nom provient de la ville de Sisal située dans la province du Yucatan au Mexique. C'est à partir du port de cette ville qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier. La production mondiale de sisal est estimée à 300000 tonnes. Les principaux producteurs sont le Brésil (120000 tonnes), la Tanzanie (30000 tonnes) et le Kenya (25000 tonnes). Le Brésil exporte près de 100000 tonnes de fibre brute et de produits manufacturés, le Kenya 20000 tonnes et la Tanzanie 15000 tonnes.

II.7.3.2 La culture du sisal

Le sisal qui est une plante résistante qui pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures. Elle s'accommode de la plupart des types de sols sauf ceux les sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies et nécessite comparativement peu d'intrants [24]. Le sisal peut être récolté deux ans après avoir été planté et sa vie productive peut atteindre 12 ans. Chaque plante peut produire de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude, la pluviométrie et la variété considérée.

II.7.3.3 Extraction des fibres de sisal

La fibre de sisal est extraite des feuilles par rouissage, grattage ou décortication mécanique [26]. La plante de sisal produit des feuilles en forme d'épée avec des dents et perd ces dents à maturité.

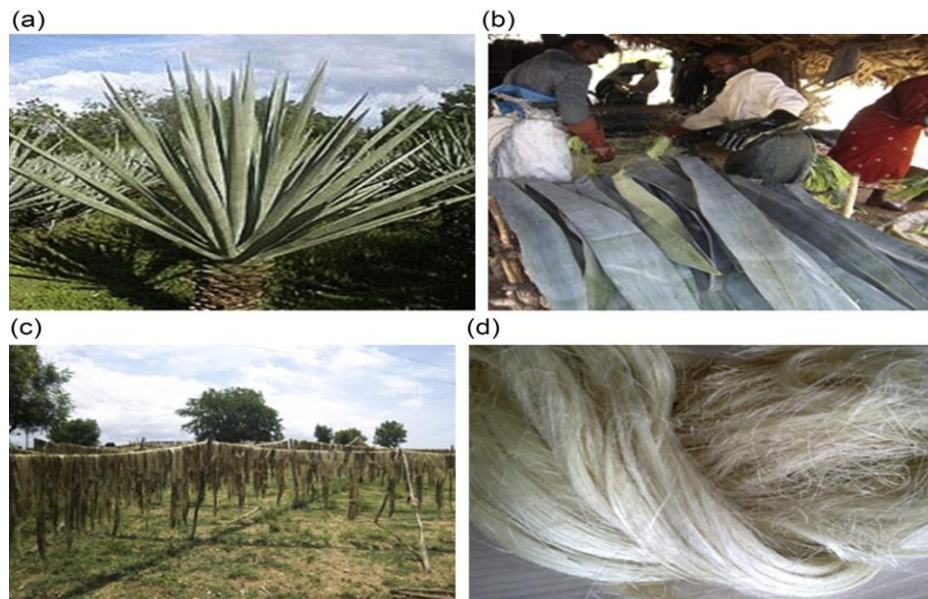


Fig. II.20 Extraction des fibres de sisal : (a) plante de sisal, (b) décortilage, (c) séchage, (d) fibre brute [26]

La décortication est la méthode la plus courante d'extraction de la fibre de sisal. Dans ce processus, les feuilles sont écrasées entre les couteaux émoussés et l'humidité et la pulpe charnue est retirée de la fibre. L'eau est utilisée pour nettoyer les débris présents dans les feuilles. La fibre de sisal obtenue est séchée au soleil chaud. 21.1 montre le processus étape par étape d'extraction de fibre sisal.

Références bibliographiques du chapitre II

[1]	Guettaf Temam Taher, Modélisation du comportement mécanique des constituants du palmier dattier, Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider –Biskra,(2017)
[2]	Bakhouche Hibat Erahmane, Daghboudj Samir, Elaboration et Caractérisation Numérique de Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres de Sisal, Université Larbi Tébessi-Tébessa,(2020)
[3]	Rouam Kamilia, Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, Diplôme de magister, Université M'hamed Bougara- Boumerdes,(2013,2014)
[4]	http://www.fr.depositphotos.com/stock.photos/plante.de.lin.html
[5]	http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Ramie
[6]	http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Agave_sisalana
[7]	https://www.noixdecocofleurs.fr/noix.de.coco/les.plantes/
[8]	Bag Rahim, Solvants pariétaux et aptitude à la transformation des fibres de chanvre, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne ardenne,(2010).
[9]	http://www.fr.depositphotos.com/stock.photos/chanvre.plante.htm
[10]	Elfehri Borchani Karama, Développement d'un composite à base d'un polymère biodégradable et de fibres extraites de la plante d'Alfa, Thèse de doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax,(2016)
[11]	Sellami Asma, Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss): Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba,(2015)
[12]	FREUND Ludovic. «Etude du vieillissement hygrothermique des composites renforcés de fibres naturelles: Approche expérimentale et modélisation.» thèse de doctorat, Université de Lorraine,(2018).
[13]	D. Sedan, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre /ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat, Université de Limoges, Novembre, (2007).
[14]	Thi, Vi Vi Do, Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition, thèse de doctorat, Université de Grenoble, (2011).
[15]	Omar Faruk , Andrzej K, Bledzk, Hans.Peter Fink Mohini Sain, Bio composites reinforced with Natural fibers,(2000-20110)

[16]	Mohamed el hadi bourahli,Caractérisation d'un composite verre/époxy,Université Ferhat abasse-setif1,these doctorat,(2014)
[17]	F.S.Chakar F.S., A.J. Ragauskas, Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry, <i>Industrial Crops and Products</i> , 20, 131.141.(2004)
[18]	J.R. Collier and, JB. Collier, Process for obtaining cellulosic fibre bundles at least 2, 5 cm long from plant stalk rind. U.S. Patent N 5718802,(1998).
[19]	C.Baley, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites,Techniques de l'ingénieur,Ref.AM. 5 130, 15 pages, (2004)
[20]	Yahy Fatima Zahra,Caractérisation physique d'une fibre végétale (le DISS), <i>Memoire de master</i> , Université Mohamed Boudiaf -M'sila, (2016).
[21]	Sbiai Adil, Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier Dattier: effet de l'oxydation au tempo sur les fibres, Thèse de doctorat, Université de Lyon, (2011).
[22]	Amroune Salah, Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier, Thèse de doctorat, Université 8Mai 1945 Guelma,(2016).
[23]	Almi Kenza, Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie, Thèse <i>dedoctorat</i> , Université Mohamed Khider – Biskra,(2018).
[24]	Ramanambahoaka, Haingonirina ,Alexandra, Essai de fabrication d'un matériau composites: matrice polyester renforcée des fibres de sisal, Université D'Antananarivo École supérieur polytechnique,(2014/2015).
[25]	https://www.britannica.com/plant/sisal
[26]	J.Naveen,M.Jawaid,P.Amuthakkannan,M.Chandrasekar,mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber.reinforced polymer composites.

Chapitre III
Caractérisation
micromécaniques des
biocomposites étudiés

Chapitre III

Caractérisation micromécaniques des biocomposites étudiés

III.1 Homogénéisation et analyse micromécanique

Les matériaux composites sont composés de l'ensemble «matrice+renfort». Puisque le renfort est responsable de la tenue mécanique du composite, son ajout augmente et influence les propriétés et les caractéristiques mécaniques de la matrice renforcée.. Ces matériaux sont généralement hétérogènes et leurs propriétés dépendent de celles des fibres et de la matrice qui les constituent. Cependant, pour les étudier on fait recours à des hypothèses simplificatrices qui considèrent que ses matériaux sont supposés homogènes en considérant des propriétés moyennes vis-à-vis aux charges externes appliquées. Des expressions simplifiés et pratiques de ces composites peuvent être obtenus en adoptant une approche très simple du comportement mécanique d'un élément de volume de ce matériau.

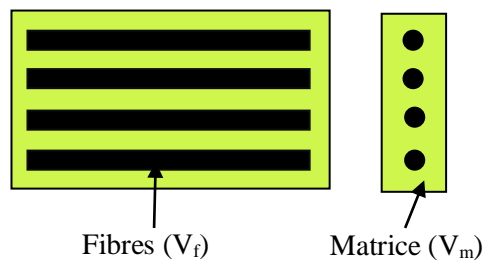


Fig.III.1 Constituants d'un matériau composite

III.2 Composite unidirectionnel

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposées dans une matrice. Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres. D'où l'importance de son étude. La cellule élémentaire représentative (CER), peut être considérée comme constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice. Un pli unidirectionnel est par sa nature hétérogène, ces propriétés dépendent de celles de ces composants (fibres et matrice) (Fig. III.2) [1]. Pour étudier les propriétés de ce composite, on suppose qu'il est homogène et on considère ses propriétés moyennes vis-à-vis aux chargements externes appliqués.

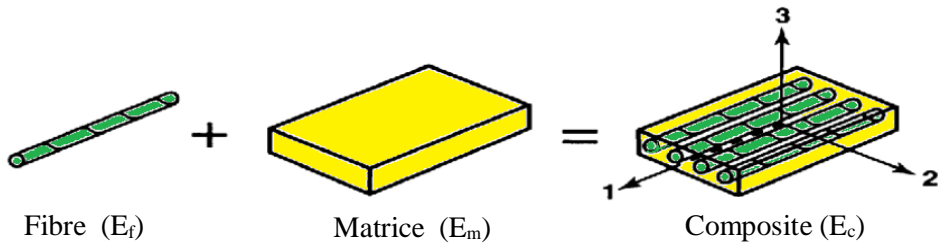


Fig.III.2 Propriétés d'un matériau composite dépendantes de celles de ses constituants [1]

La cellule élémentaire représentative (CER) possède un axe de révolution noté (1, L) appelé : direction longitudinale. La direction perpendiculaire aux fibres noté (2, T), est appelée direction transversale. Un composite unidirectionnel est aussi appelé isotrope transverse ou bien orthotrope de révolution car il est isotrope dans la plan normal à la direction (1, L). Le plan transverse est repéré par les directions (2, T) et (3, T') qui sont équivalentes (Fig.III.3).

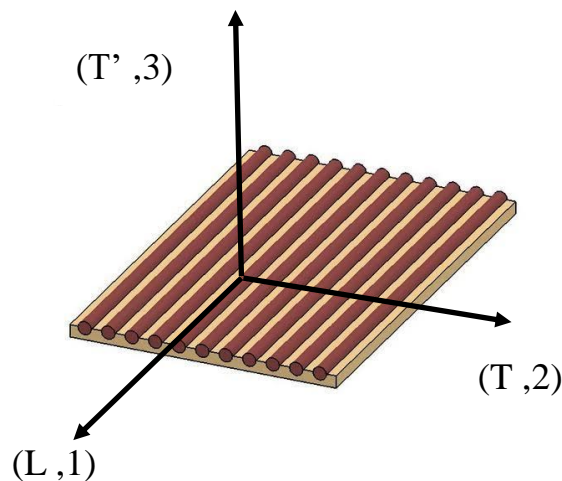


Fig.III.3 pli unidirectionnel [1]

III.3 Loi des mélanges

Considérons un volume (v_c) d'un matériau composite, composé d'un volume du fibre (v_f) et d'un volume (v_m) de la matrice. On définit la fraction volumique des fibres comme suit :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (\text{III.1})$$

La fraction volumique de matrice est définie par:

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

v_f : Volume des fibres

v_m : Volume de la matrice

v_c : Volume du composite

Sachant que :

$$v_c = v_m + v_f \quad (\text{III.3})$$

Alors :

$$V_f + V_m = 1 \quad (\text{III.4})$$

De la même manière on peut exprimer la fraction massique en fonction des masses (w_c , w_f et w_m) respectivement du composite, des fibres et de la matrice. La fraction massique de fibres est définie comme suit :

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (\text{III.5})$$

La fraction volumique de matrice est définie par:

$$W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

w_f : Masse des fibres

w_m : Masse de la matrice

w_c : Masse du composite

Sachant que :

$$w_c = w_m + w_f \quad (\text{III.7})$$

Alors :

$$W_f + W_m = 1 \quad (\text{III.8})$$

III.4 Homogénéisation d'un composite unidirectionnel

Pour calculer des propriétés d'un composite unidirectionnel, il existe plusieurs approches et modèles tels que : l'approche simplifiée (loi des mélanges), le modèle d'Halpin-Tsai, le modèle de Chamis et les modèles basées sur des approches d'élasticité, etc...

III.4.1 Loi de mélange

Les caractéristiques mécanique d'un composite unidirectionnel sont données par les relations suivantes [2] :

- **Module de Young longitudinal**

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{III.9})$$

- **Module de Young transversal**

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} (1 - V_f) \quad (\text{III.10})$$

- **Coefficient de Poisson**

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (\text{III.11})$$

▪ **Module de cisaillement**

$$\frac{1}{G_{LT}} = G_m \left(\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} V_f} \right) \quad (\text{III.12})$$

Avec :

E_L : Module de Young de la matrice	E_T : Module de Young des fibres
V_m : fraction volumique de la matrice	V_f : fraction volumique des fibres
E_L : Module de Young longitudinal	E_T : Module de Young transversal
ν_m : Coefficient de Poisson de la matrice	ν_f : Coefficient de Poisson des fibres
ν_{LT} : Coefficient de Poisson dans le plan (L,T)	G_m : Module de cisaillement de la matrice
G_f : Module de cisaillement des fibres	G_{LT} : Module de cisaillement dans le plan (L,T)

III.4.2 Modèle d'Halpin-Tsai

Le modèle halpin-Tsai est également apparu comme un modèle semi-empirique qui tend à corriger le module de cisaillement longitudinal G_{LT} dans le plan (L, T) et le module de young transversal E_T [3]. Pour le module d'élasticité longitudinal E_L et le Coefficient de Poisson ν_{LT} dans le plan (L, T), la règle des lois de mélange est utilisée.

$$E_T = E_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$G_{LT} = G_m \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right) \quad (\text{III.14})$$

Où :

$$\eta = \left(\frac{\frac{M_f}{M_m} - 1}{\frac{M_f}{M_m} + \xi} \right) \quad (\text{III.15})$$

Et :

$$\xi = 1 \text{ ou } 2 \quad (\text{III.16})$$

$M=E$ ou G pour E_T et G_{LT} respectivement

III.4.3 Modèle de Chamis :

Le modèle micromécanique de chamis est le modèle le plus utilisé et le plus fiable qui donne

une formulation pour les cinq propriétés élastiques indépendantes [3]. Avec ce modèle, les propriétés d'un composite unidirectionnel sont données grâce aux les relations suivantes :

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{III.17})$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (\text{III.18})$$

$$E_T = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} + (1 - \frac{E_m}{E_{2f}})} \quad (\text{III.19})$$

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} + (1 - \frac{G_m}{E_{LTf}})} \quad (\text{III.20})$$

$$G_{TT} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} + (1 - \frac{G_m}{E_{TTf}})} \quad (\text{III.21})$$

III.4.4 Approche analytique pour la détermination des modules d'élasticité d'un Composite unidirectionnel

La comparaison entre les valeurs des modules déterminées expérimentalement sur des unidirectionnels et évaluées par la loi des mélanges a montré que seules les formules (III.9) et (III.11) donnent des valeurs proches de celles obtenues expérimentalement. De plus, cette méthode ne permet pas d'évaluer le module de cisaillement G_{TT} . Une approche plus précise consiste à développer des modèles qui prennent en considération la géométrie des fibres et leur arrangement à l'intérieur de la matrice. En considérant un arrangement cylindrique (cellule élémentaire constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de résine, la résolution du problème d'élasticité correspondant permet d'aboutir à des solutions analytiques exactes représentant le comportement du composite constitué d'une répartition uniforme de cette cellule. Les modules indépendants obtenus par cette approche sont :

a) Module de cisaillement G_{LT}

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)} \quad (\text{III.22})$$

b) Module de compressibilité (matrice)

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (\text{III.23})$$

c) Module de compressibilité (fibre)

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (\text{III.24})$$

d) Module de compression latéral (matrice)

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3} \quad (\text{III.25})$$

e) Module de compression latéral (fibre)

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3} \quad (\text{III.26})$$

f) Module de compression latéral K_L

$$K_L = k_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3}} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}} \quad (\text{III.27})$$

g) Module de cisaillement transversal $G_{TT'}$

$$G_{TT'} = G_m \left[1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right] \quad (\text{III.28})$$

h) Module d'élasticité transversal

Le module de Young transversal est calculé à partir des modules précédents grâce à la relation d'élasticité :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2 \frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} \quad (\text{III.29})$$

III.4.5 Analyse du comportement micromécanique des composites bio-sourcés

Cette étude s'intéresse à la caractérisation et à la détermination des propriétés mécaniques de biocomposites unidirectionnels élaborés avec des combinaisons de trois types de résines polymères : associées à trois types de fibres végétales. Les mélanges ont été considérés avec une fraction volumique $V_f=0.6$. Les caractéristiques mécaniques des constituants de base de ces matériaux sont présentées dans le (Tableau III.1).

Tableau III.1 Caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites

	E (MPa)	ν	G (MPa)
Sisal	$E_f = 15000$ [4]	$\nu_f = 0,32$ [4]	$G_f = 5680$
Palmier dattier	$E_f = 7700$ [7]	$\nu_f = 0,152$ [7]	$G_f = 3342$
Diss	$E_f = 17180$ [6]	$\nu_f = 0,34$ [6]	$G_f = 6410$
Epoxyde	$E_m = 5200$ [5]	$\nu_m = 0,38$ [5]	$G_m = 1880$
Polyester	$E_m = 3800$ [5]	$\nu_m = 0,37$ [5]	$G_m = 1386$
Polyamide	$E_m = 1900$ [5]	$\nu_m = 0,33$ [5]	$G_m = 714$

Le module de cisaillement G est calculé d'après la relation suivante :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

III.4.5.1 Exemple de calcul des propriétés mécaniques du composite bio-sourcé

Epoxyde/ Sisal

Pour ce composite on se propose de déterminer et de calculer les propriétés mécaniques du composite bio-sourcé Epoxyde/ Sisal avec un fraction volumique des fibres ($V_f = 0,6$).

- **Module de cisaillement de la matrice**

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} = \frac{5200}{2(1 + 0,38)} = 1880,05 \text{ MPa}$$

- **Module de cisaillement de fibre**

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} = \frac{15000}{2(1 + 0,32)} = 5680 \text{ MPa}$$

- **Module de compressibilité de la matrice**

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} = \frac{5200}{3(1 - 2(0,38))} = 7222,2 \text{ MPa}$$

- **Module de compressibilité de la fibre**

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} = \frac{15000}{3(1 - 2(0,32))} = 13889 \text{ MPa}$$

- **Module de compression latérale de la matrice**

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3} = 7222,22 + \frac{1880}{3} = 7848,9 \text{ MPa}$$

- **Module de compression hydrostatique latérale**

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{G_f - G_m}{3}} + \frac{V_m}{k_m + \frac{4G_m}{3}}} = 7848,9 + \frac{0,6}{\frac{1}{13889 - 7222,2 + \frac{5680 - 1880}{3}} + \frac{(1-0,6)}{7222,2 + \frac{4(1880)}{3}}} =$$

$$11438 \text{ MPa}$$

- **Module de Young longitudinal**

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m = 1500(0,6) + 5200(0,4) = 11080 \text{ MPa}$$

- **Coefficient de Poisson longitudinal**

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m V_m = 0,32(0,6) + 0,38(0,4) = 0,344$$

- **Module de cisaillement longitudinal**

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)}$$

$$= 1880 \frac{5680(1 + 0,6) + 1880(1 - 0,6)}{5680(1 - 0,6) + 1880(1 + 0,6)} = 3503,6 \text{ MPa}$$

- **Module de cisaillement transversal**

$$G_{TT} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7G_m}{3}}{2k_m + \frac{8G_m}{3}}(1 - V_f)} \right) = 1880 \left(1 + \frac{0,6}{\frac{1880}{5680 - 1880} + \frac{7222,22 + \frac{7(1880)}{3}}{2k_m + \frac{8(1880)}{3}}(1 - 0,6)} \right)$$

$$= 3418 \text{ MPa}$$

- **Module de young transversal**

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{23}} + \frac{2\nu_{12}^2}{E_1}} = E_2 = \frac{2}{\frac{1}{2(11438)} + \frac{1}{2(3418,1)} + \frac{2(0,344)^2}{11080}} = 9462,8 \text{ (MPa)}$$

III.4.5.2 Resultat et duscusion

Pour les autres combinaisons de matériaux bio-composites nous avons réalisé un programme de calcul avec le code de calcul Matlab. Les propriétés mécaniques des composite bio-sourcés sont résumées sur le (Tableau III.2)

Tableau III.2 Propriétés mécaniques des composite bio-sourcés, obtenues par l'approche analytique

	$V_f = 0,6$					
	$E_1(E_L)$ (MPa)	$E_2(E_T)$ (MPa)	$G_{12}(G_{LT})$ (MPa)	$G_{23}(G_{TT})$ (MPa)	$\nu_{12}(\nu_{LT})$	K_L (MPa)
Epoxyde/sisal	11080	9462.8	3503.6	3418.1	0.3444	11438
Polyester/sisal	10520	7963.9	2976.7	2860.4	0.34	9198.9
Polyamide/sisal	9760	4980.4	1960.2	1799.9	0.324	4888.8
Epoxyde/Palmier dattier	6700	6772.1	2639.1	2619.9	0.2432	5758.7
Polyester/Palmier dattier	6140	5888.5	2301.3	2261.5	0.2392	5004.1
Polyamide/Palmier dattier	5380	4021.9	1622.2	1534	0.2232	3271.8
Epoxyde/Diss	12388	10079	3714	3605.7	0.356	12719
Polyester/Diss	11828	8411.9	3133.5	2994.1	0.3520	10038
Polyamide/Diss	11068	5159.6	2030.7	1853.1	0.3360	5133.01

La variation des différents modules d'élasticité, longitudinal E_L , transversal E_T , de cisaillement G_{LT} et G_{TT} , de Poisson ν_{LT} et compressibilité K_L , des biocomposites issues de la combinaison des différentes fibres avec une fraction volumique ($V_f = 0,6$) et des différentes matrices polymériques est présentée sur les (Fig.III.4, III .5, III .6 et III .7).

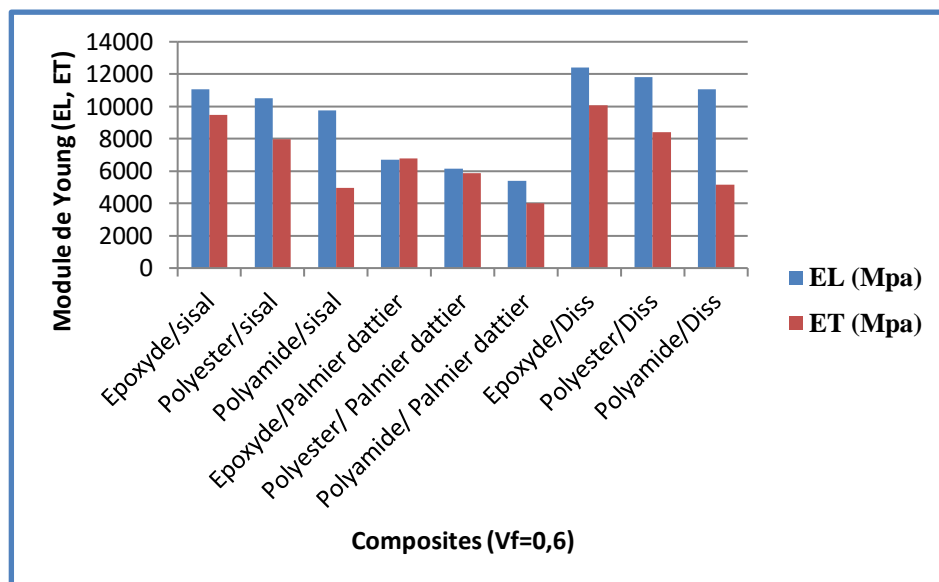


Fig. III .4 Variation des modules d'Young longitudinal E_L et transversal E_T en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices

L'histogramme de la (Fig.III.4) présenté la variation des modules de Young longitudinal E_L et transversal E_T , en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices. L'examen de ce graphe permet de déduire les remarques suivantes :

- Les deux modules de Young E_L et E_T du composite (Epoxy/Diss) ont les valeurs les plus élevées ($E_L = 12388$ Mpa , $E_T = 1079$ Mpa).
- Le composite (Polyamide/ Palmier dattier) possède deux modules de Young E_L et E_T les moins élevés ($E_L = 5380$ Mpa, $E_T = 4021.9$ Mpa).

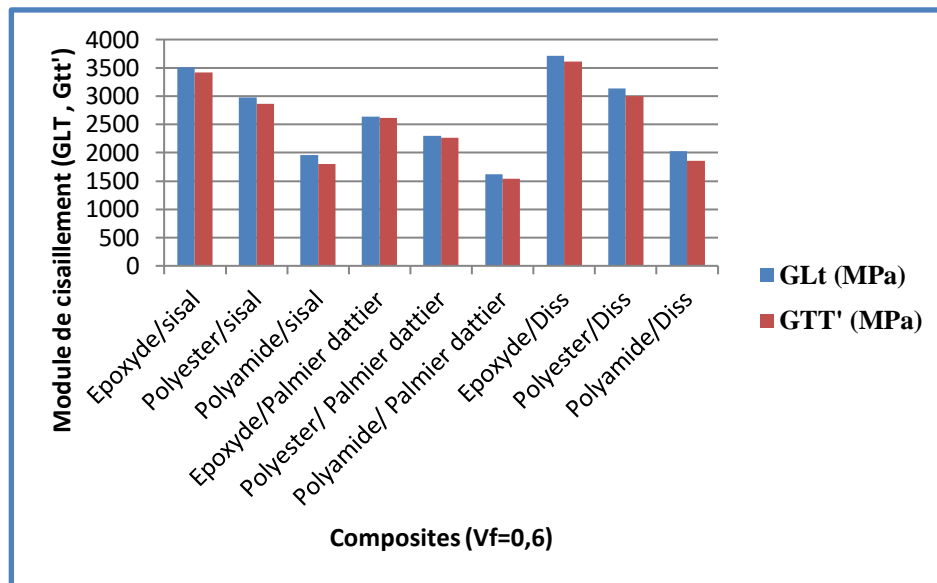


Fig. III .5 Variation des modules de cisaillement G_{LT} et $G_{TT'}$ en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices

Sur la (Fig.III.5) nous avons présenté la variation des modules de cisaillement longitudinal G_{LT} et transversal $G_{TT'}$, en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices. Nous avons déduit les remarques suivantes :

- Les deux modules de cisaillement G_{LT} et $G_{TT'}$ du composite (Epoxy/Diss) ont les valeurs les plus élevées $G_{LT} = 3714.1$ Mpa et $G_{TT'} = 3605.7$ Mpa.
- Le composite (Polyamide/ Palmier dattier) possède les deux modules G_{LT} et $G_{TT'}$ les moins élevés $G_{LT} = 1622.2$ Mpa , $G_{TT'} = 1534$ Mpa.

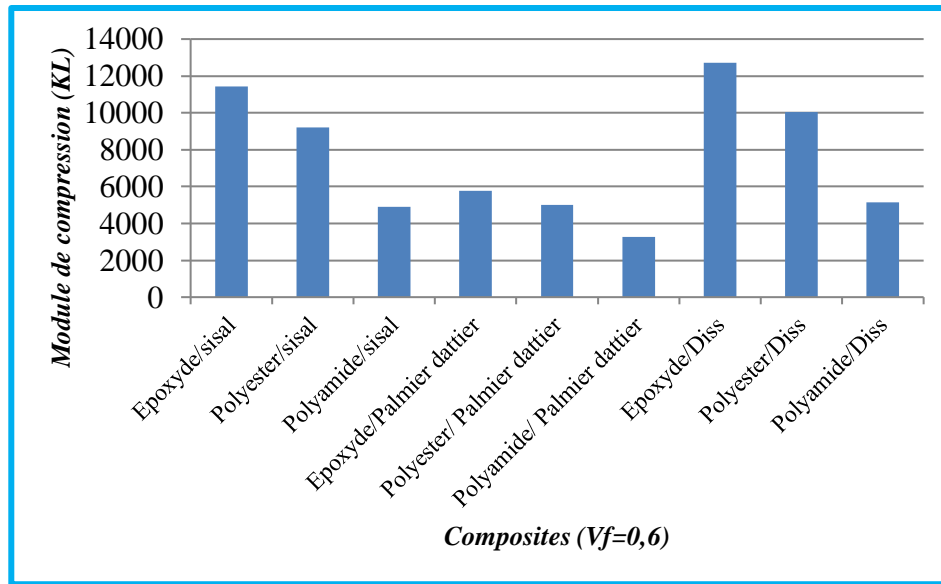


Fig. III.6 Variation des modules de compression hydrostatique latérale K_L en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices

L'histogramme de la (Fig.III.6) montre la variation des modules de compression hydrostatique latéraux K_L , d'après ce graphe on peut remarquer que le composite (Epoxy/Diss) présente toujours le module K_L le plus élevé ($K_L = 12719\text{Mpa}$)

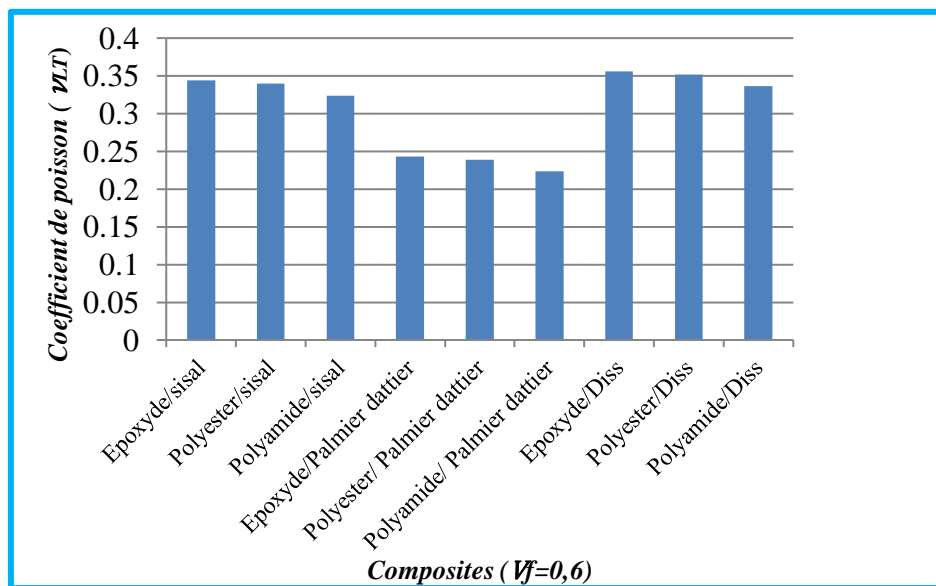


Fig. III.7 Variation du coefficient de Poisson ν_{LT} en fonction de la combinaison des différentes fibres et matrices

III.5 Présentation du code de calcul ABAQUS

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée

comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels [8]. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques [8]. ABAQUS n'a aucun système d'unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées par l'utilisateur dans un système d'unités conforme comme montré sur le Tableau III.3 .

Tableau III.3 Systèmes d'unités standard d'ABAQUS

Quantité	SI (mm)	SI	SI
longueur	mm	m	m
Force	N	N	KN
Masse	tonne (10^3 Kg)	Kg	Tonne
Temps	s	s	s
Densité	Tonne/mm ³	Kg/m ³	Tonne/m ³
Pression/contrainte	MPa	Pascal	Pascal
Température	Kelvin	Kelvin	Kelvin

ABAQUS couvre presque tous les domaines de la physique et tous les types de problèmes :

Domaines physiques

- Mécanique
- Thermique
- Electrique (piézo et thermique)
- Problèmes couplés

Problèmes

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

III.5.1 Fichiers d'ABAQUS

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicit) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données) et dont il écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats).

- **Fichier de données (extension .inp)** : Contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée.
- **Fichier de résultats (extension .odb)** : Contient les contours et courbes de résultats

III.5.2 Modules D'ABAQUS et étapes de modélisation

ABAQUS comporte en tous huit modules pour la modélisation et introduction des données et un neuvième module qui sert à visualiser les résultats [9], qui sont :

- Module **Part**
- Module **Property**
- Module **Assembly**
- Module **Step**
- Module **Interaction**
- Module **Load**
- Module **Mesh**
- Module **Job**
- Module de **visualisation**

III.5.3 Les éléments dans ABAQUS

ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard).

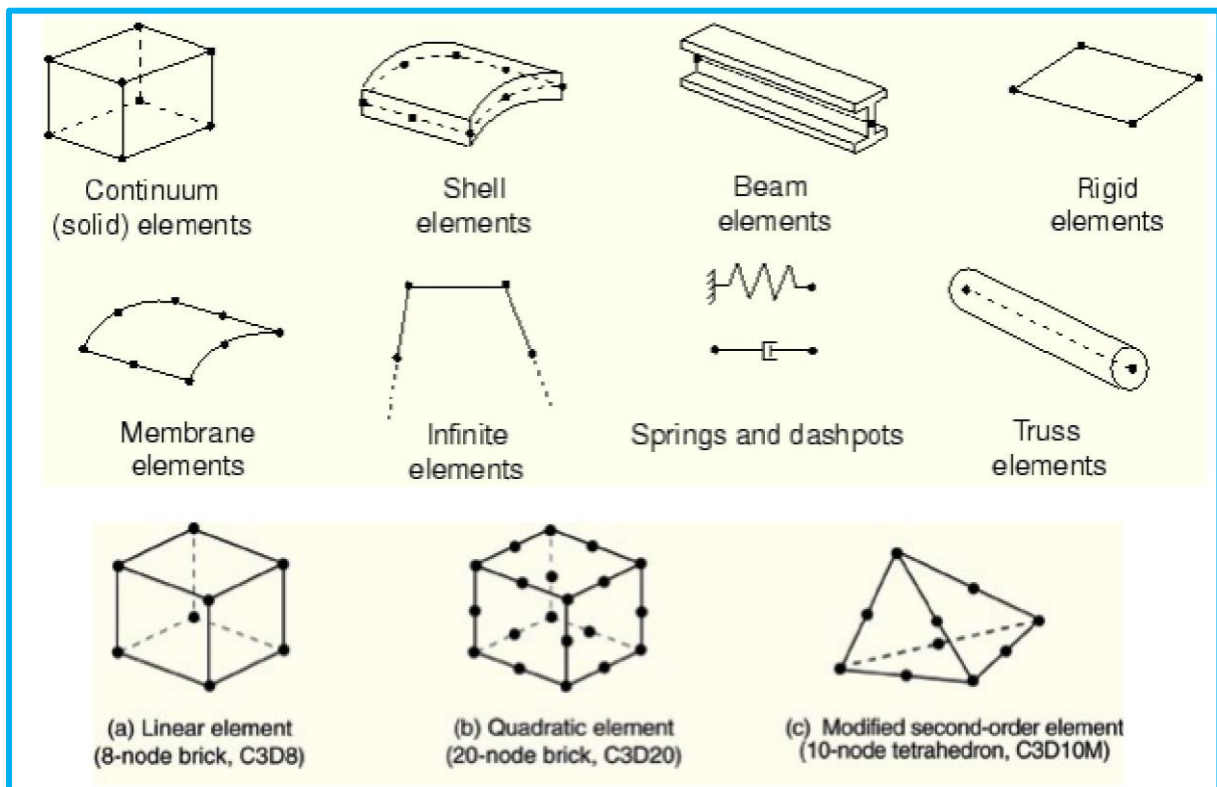


Fig. III .8 Quelques éléments de la bibliothèque intégrée dans ABAQUS [9]

III.6 Approche numérique pour la détermination des modules d'élasticité des composite unidirectionnels bio-sourcés

III.6.1 Programme Easy PBC

Easy PBC est un plugin ABAQUS CAE développé par les auteurs [11], pour estimer les propriétés élastiques efficaces homogénéisées de l'élément d'un volume représentatif

périodique (RVE), créé par l'utilisateur. Le nom signifie Easy Periodic Boundary conditions, le plugin applique automatiquement les concepts de la méthode d'homogénéisation périodique RVE dans l'interface utilisateur du logiciel en catégorisant, créant et liant les ensembles nécessaires pour obtenir des surfaces limites périodiques déformables, qui peuvent se déformer. Il permet à l'utilisateur de bénéficier des données d'analyse par éléments finis dans l'interface ABAQUS CAE après le calcul des propriétés homogénéisées.

III.6.2 Modélisation

Pour modéliser le comportement micromécaniques des bio-composites unidirectionnels, on choisit un volume élémentaire représentatif (VER) de dimensions $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$. D'après les lois de mélange nous avons :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$

Le volume du volume élémentaire représentatif (VER) est $v_c = 1 \text{ mm}^3$. Sachant que $V_f = 0.6$ (fraction volumique choisie pour cette étude), alors :

$$v_f = 0.6$$

La fibre est assimilée à un cylindre de diamètre (D) et de longueur ($L = 1 \text{ mm}$) et de volume :

$$v_f = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

Donc :

$$D = \sqrt{\frac{4v_f}{\pi L}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.6}{\pi \times 1}} = 0.8744 \text{ mm}$$

Le rayon de la fibre est :

$$R = 0.4372$$

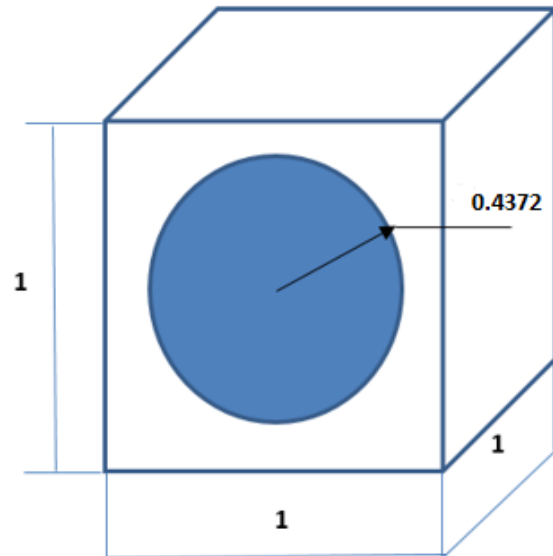


Fig. III .9 Volume élémentaire représentatif (VER)

Nous avons choisis pour cette étude une modélisation de type 3D/Deformable /Solid/Extrusion. La géométrie et les dessins du VER ont été faits directement dans le module Part (Fig.III.10).

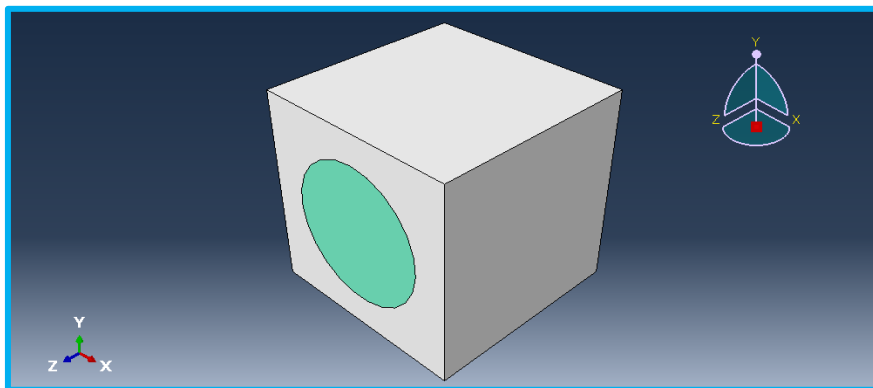


Fig. III .10 Dessin du volume élémentaire représentatif (VER)

Dans le module Proprety nous avons affecté les propriétés mécaniques de la fibre et de la matrice en se référant aux données des caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites comme reportées sur le (Tableau III.1). Les matériaux de la fibre et de la matrice sont supposés isotropes. Sur la (Fig.III.11), nous présentons l'assemblage du volume élémentaire représentatif (VER) composé de l'assemblage (fibre+ matrice) modélisé et associée au repère d'axes choisi. Les conditions aux limites sont générées automatiquement grâce à l'application Easy PBC installée dans ABAQUS (Fig.III.12). Nous avons choisis un maillage composé de 2260 éléments de type C3D6 à 6 nœuds avec une technique de maillage Wedge/Sweep, comme montré sur la (Fig.III.13).

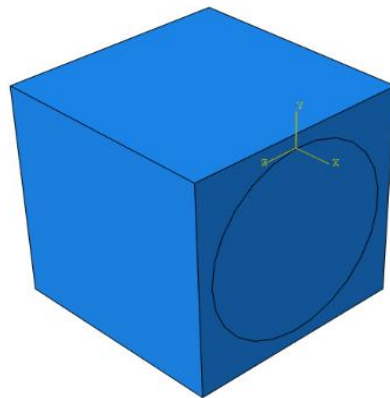


Fig. III .11 Assemblage du volume élémentaire représentatif (VER)

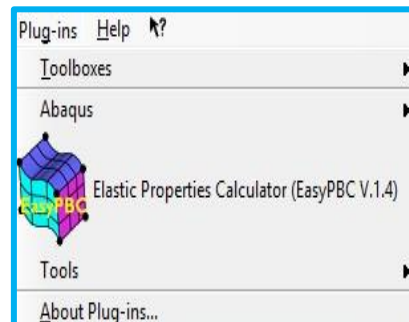


Fig. III .12 Easy PBC plugin installée dans ABAQUS

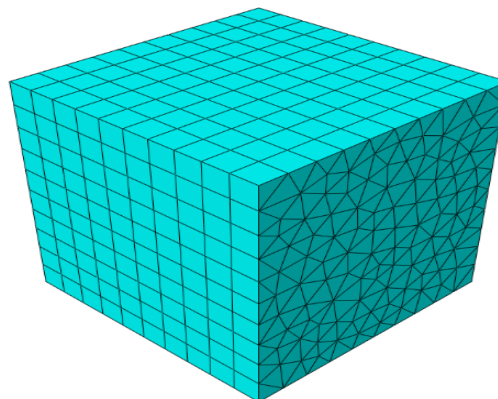


Fig. III .13 Maillage du volume élémentaire représentatif (VER)

Pour des combinaisons des matériaux composites étudiés, nous avons réalisé plusieurs simulations. Les propriétés mécaniques trouvées sont résumées et reportées sur le (Tableau III.4).

Tableau III.4 Propriétés mécaniques des composite bio-sourcés, obtenues par l'approche numérique

$V_f = 0,6$					
	$E_1(E_L)$ (Mpa)	$E_2(E_T)$ (Mpa)	$G_{12}(G_{LT})$ (Mpa)	$G_{23}(G_{TT})$ (Mpa)	$\nu_{12}(\nu_{LT})$
Epoxyde/sisal	11035.60	10059.47	3523.12	3261.06	0.342
Polyester/sisal	10465.31	8766.55	3009.57	2679.03	0.338
Polyamide/sisal	9692.19	5903.11	2018.75	1640.92	0.32
Epoxyde/Palmier dattier	6766.38	6855.58	2639.03	2574.85	0.25
Polyester/ Palmier dattier	6175.91	6088.95	2304.71	2182.81	0.24
Polyamide/ Palmier dattier	5370.22	4427.16	1645.09	1428.08	0.22
Epoxyde/Diss	12328.82	10871.63	3742.63	3415.61	0.354
Polyester/Diss	11759.89	9418.89	3177.19	2786.04	0.3507
Polyamide/Diss	10988.89	6218.02	2099.03	1682.49	0.3366

Références bibliographiques du chapitre III

[1]	Bakhouche Hibat Erahmane, Daghboudj Samir, Elaboration et Caractérisation Numérique de Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres de Sisal, Mémoire Master II, Université Larbi Tébessi-Tébessa,(2020).
[2]	Jean.M.Berthelot,Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures ,5eme Ed, Technique Et Documentation, Lavoisier, (2012).
[3]	Rafic Younes,Ali Hallal, Farouk Fardoun and Fadi Hajj Chehade,Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials,Composites and Their Properties, pp. 391-408, (2012).
[4]	D. Chandramohana, K. Marimuthub, Characterization of natural fibers and their Application in bone grafting substitutes, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 13, No. 1, (2011).
[5]	Makhloufi Nouredine, Simulation numérique de la fissuration des composites par fatigue, Magistère en physique, Université el-hadj lakhdar-batna, (2011/2012).
[6]	Mustapha Nouri , <i>Développement d'éléments en bio composite à base de fibre végétale pour la réhabilitation énergétique des bâtiments</i> , thèse de doctorat ,l'école centrale de nantes, (2020).
[7]	Yamina BOUHADJILA, Zine Eddine RAHEM, traitement des fibres de palmier dattier: influence sur les propriétés des composites fibrés, Mémoire Master II, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2019).
[8]	perso.univ-lemans.fr/~fcalvay/projetsmnr/v/model_crash_abaqus.htm
[9]	Salhi Lysa,Boukais Said, Simulation avec ABAQUS nouvelle disposition de ferrailage dans un voile court, Mémoire Master II, Université mouloud maameri de tizi ouzou,(2013)
[10]	Bouleftour Abderrahmane, Meftah Kamel, Evaluation d'éléments finis volumiques dans ABAQUS sur des cas tests non linéaires géométriques, Mémoire Master II, Université de Biskra,(2014)
[11]	Sadik L.omairey,Dr Peter D,Dunning,Dr Srinivas Sriramula,EasyPBC ABAQUS Plagin tool for periodic RVE homogenisation user cuide V.1.1,University of Aberdeen.

Chapitre IV

*Simulation numérique de
l'essai flexion 3 points des
biocomposites étudiés*

Chapitre IV

Simulation numérique de l'essai flexion 3 points des biocomposites étudiés

IV.1 Introduction

Les essais mécaniques représentent une étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, tel que le module d'Young, la limite d'élasticité, la ténacité et la résistance à la fatigue [1]. L'objectif principal de ce chapitre est la détermination de quelques caractéristiques mécaniques des biocomposites étudiées par des simulations numériques de l'essai de flexion 3 points par une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le code industriel ABAQUS.

IV.2 Essai de flexion 3 points

L'essai de la flexion 'trois points' est un test mécanique statique qui permet de mesurer le module d'Young, la résistance en flexion et la flèche maximale d'une structure. Il détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec application de l'effort à mi-distance des appuis (Fig.IV.1). Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre (Fig.IV.2). D'un côté, elles sont en compression (coté concave de l'éprouvette) et de l'autre, en tension [2].

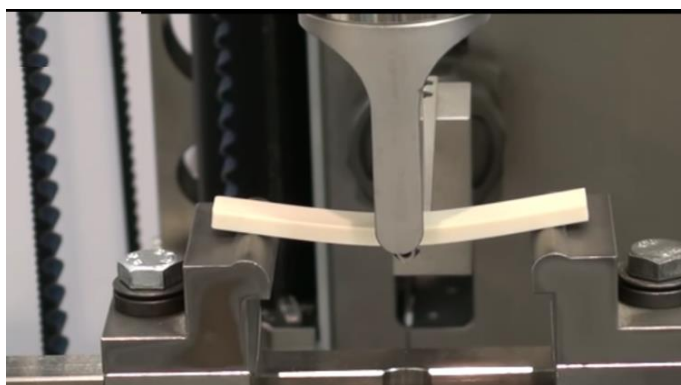


Fig.IV.1 Dispositif de l'essai flexion 3 points [2]

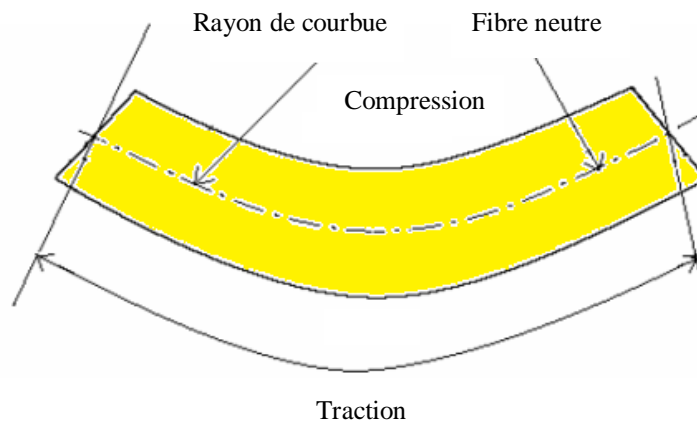


Fig.IV.2 Déformation de l'éprouvette pendant un essai flexion 3 points [2]

Cet essai est très facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple de l'échantillon), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles [3]. Durant cet essai, on impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation. Cet essai permet de connaître le comportement mécanique du matériau, ces propriétés ainsi ses caractéristiques. La contrainte à la flexion σ_f , la déformation en surface ε et le module de flexion E_f sont calculés respectivement à partir des formules suivantes :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{V.1})$$

$$E_f = \frac{FL^3}{4bh^3W} \quad (\text{V.2})$$

$$\varepsilon = \frac{6Wh}{L^2} \quad (\text{V.3})$$

Avec :

F : Charge appliquée en Newton

L : Distance entre appuis en mm

h : Epaisseur en mm

b : Largeur de l'éprouvette en mm

W : Fleche de l'axe neutre en mm

Le module de flexion peut être déterminé et déduit de la courbe contrainte déformation, il représente la pente de cette courbe et peut se calculer de la manière suivante :

A partir de la courbe Fig. (IV.13, IV.14, IV.15) le module d'élasticité en flexion E_f est égal au rapport de la différence de contrainte, $\sigma_2 - \sigma_1$, à la différence de déformation correspondante, $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$. Il est exprimé en mégapascals (MPa).

IV.3 Principe d'essai de flexion 3 points

Une éprouvette, supportée comme une poutre, est soumise à une flexion au milieu de la portée, 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. La figure suivante représente le montage de flexion trois points.

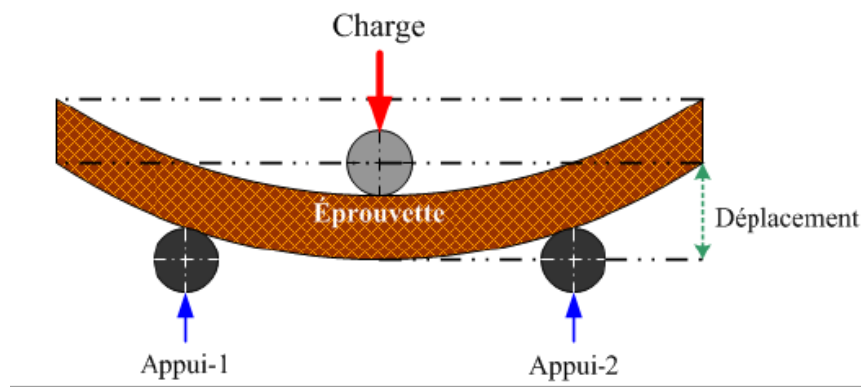


Fig.IV.3 Principe d'essai de flexion 3 points

IV.4 Eprouvette normalisée de l'essai de flexion 3 points

Les essais de flexion sur composites font l'objet des normes T 57-105, T 57-302, ASTM D 790, JIS K 7074 ou future norme EN ISO 14125 [4]. Ces essais sont largement utilisés dans les différents secteurs de l'industrie à cause de sa simplicité. Le (Tableau IV.1) résume les dimensions des éprouvettes destinées aux essais de flexion 3 points pour différents types de matériaux composites [4], selon la norme selon EN ISO 14125.

Tableau IV.1 Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon la norme EN ISO 14125 [4]

Matériau	Longueur (l)	Distance entre appuis (L)	Largeur (b)	Epaisseur (h)
I. Thermoplastiques renforcés de fibres coupés	80 ± 1	64 ± 1	10 ± 0.5	4 ± 0.2
II. Composites à base de DMC, BMC, SMC, et TRE renforcé de mats, tissus et mixtes.	80 ± 1	64 ± 1	15 ± 0.5	4 ± 0.2
III. Composites UD (90°), Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $5 < E_f/G_{13} \leq 15$	60 ± 1	40 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2
IV. Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $15 < E_f/G_{13} \leq 50$	100 ± 1	80 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2
E_f : module de flexion dans le sens des fibres. G_{13} : module de cisaillement interlaminaire.				

IV.5 Position du problème

Généralement on fait recours à des simulations numériques des essais mécaniques lorsque les essais expérimentaux ne sont pas accessibles ou bien pour éviter une campagne d'essais par erreur. Dans cette étude, nous conduisons une analyse par simulation numérique du comportement mécanique en flexion des biocomposites constitués à partir de matrices polymériques et de renfort fibres de sisal, de diss et de palmier dattier ajoutées avec une fraction volumique $V_f=0.6$. Pour prédire le comportement de ces composites, un calcul par simulation numérique a été effectué avec le logiciel ABAQUS standard. La simulation consiste à réaliser une étude virtuelle de la flexion trois points sur des éprouvettes normalisées et dimensionner selon la norme EN ISO 14125 ; utilisant le code de calcul ABAQUS en reproduisant la même procédure adaptée à l'étude expérimentale et avec les mêmes dimensions des éprouvettes. Les dimensions de l'éprouvette sont présentées dans le (Tableau IV.2). Chaque éprouvette est constituée de 4 couches unidirectionnelles d'épaisseur $e=0.5$ mm.

Tableau IV.2 Dimensions de l'éprouvette choisies selon la norme EN ISO 14125

Longueur (L) [mm]	Largeur(b) [mm]	Epaisseur(h) [mm]	longueur entre les appuis [mm]
60	15	2	40

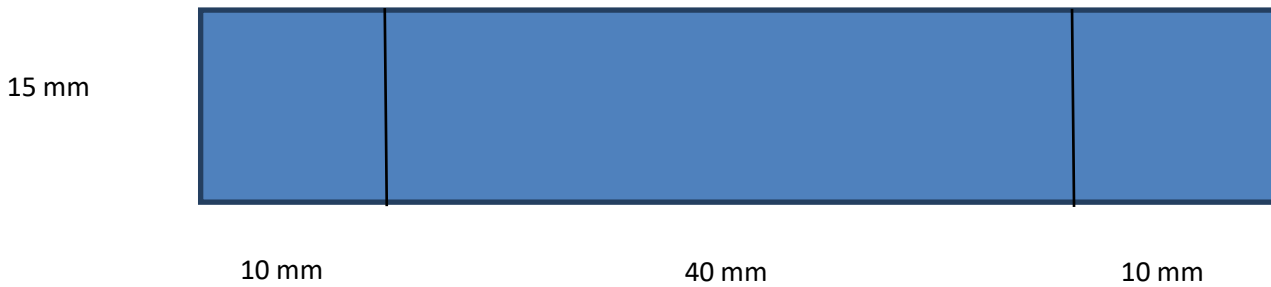


Fig.IV.4 Epreuve normalisée utilisée dans la simulation de l'essai de flexion 3 points

IV.6 Simulation de l'essai flexion 3 points

La simulation de l'essai de flexion 3 points nécessite un passage successif par différents modules d'ABAQUS/CAE. Chaque module contient des outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

IV.6.1 Module PART

Dans le module PART nous avons créé les objets géométriques nécessaires à la définition géométrique de notre problème, en les dessinant dans ABAQUS CAE. Ces objets nommés aussi Parts sont respectivement : l'éprouvette dont les dimensions sont présentées sur le Tableau, est modélisée en Solid 3D/déformable/Shell/Extrusion (Fig.IV.5), les appuis et le poinçon de dimensions identiques (Fig.IV.6) sont modélisées par Solid 3D/discrete rigid/Shell /Extrusion.



Fig.IV.5 Modelisation de l'éprouvette dans la module Part

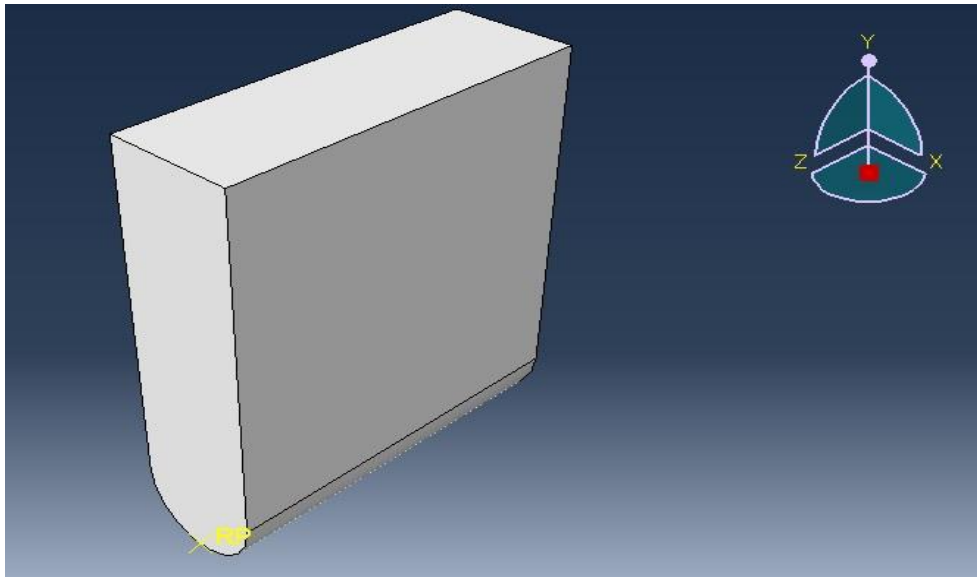


Fig.IV.6 Modelisation des appuis et du poinçon dans la module Part

IV.6.2 Module PROPERTY

Dans ce module nous avons défini les propriétés mécaniques des éprouvettes présentées dans le Tableau III.3 (Chapitre III). Chaque éprouvette est constituée de quatre plis de 0.5 mm chacun. Sur la (Fig.IV.7) sont présentées les différentes couches qui constituent le matériau de l'éprouvette pour les cas des fibres unidirectionnels, orientées à 0° .

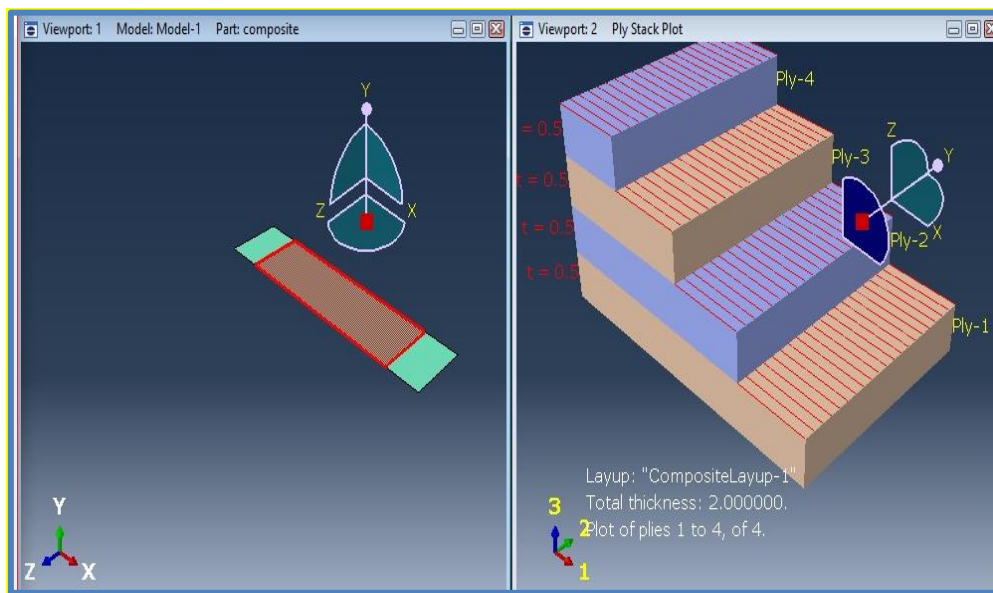


Fig.IV.7 Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à 0°

IV.6.3 Module ASSEMBLY

Dans ce module, nous avons assemblé les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

Sur la figure (Fig.IV.8), nous avons présenté l'assemblage constitué de l'éprouvette, du poinçon et des appuis modélisée et associée au repère d'axes choisi ainsi que les différents points de références et zones réservées à l'application des conditions aux limites.

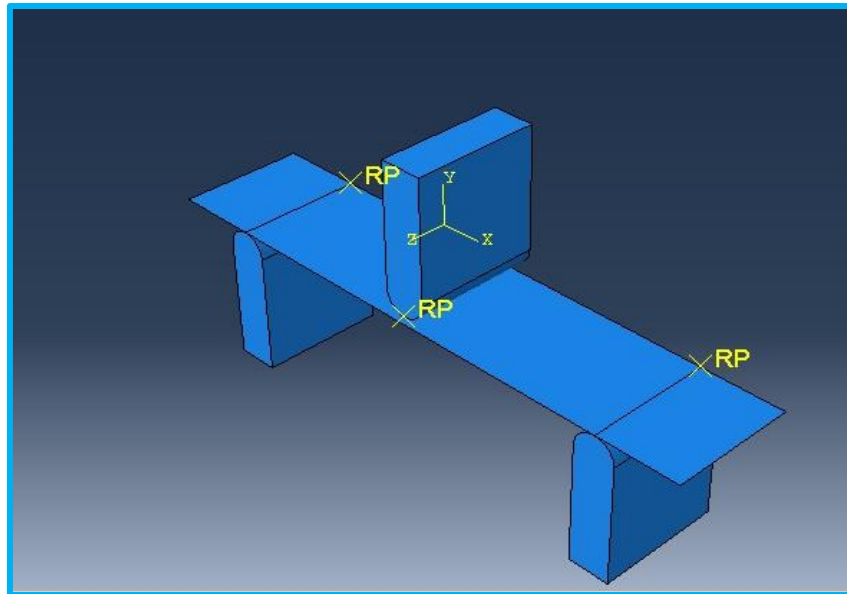


Fig.IV.8 Assemblage des éléments du modèle (éprouvette, poinçon et appuis)

IV.6.4 Module STEP

Ce module sert à définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir du quel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés. Pour se rapprocher au mieux des conditions réelles de l'essai, nous avons créé un STEP de type Static General.

IV.6.5 Module INTERACTION

Dans ce module, nous avons spécifié toutes les interactions mécaniques entre les différentes parties et régions du modèle (éprouvette/appuis et éprouvette/poinçon). Dans le cas d'un contact entre des objets géométriques, ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

IV.6.6 Module LOAD

Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire de la meilleure façon les conditions réelles de l'essai. En somme il y'a trois conditions aux limites appliquées au modèle, les surfaces en contact avec les mors lors de l'essai sont bloquées en translation suivant x, y et z d'un côté. De l'autre côté, les déplacements sont bloqués suivant y et z avec application d'un déplacement de 10 mm dans la direction x, afin de simuler le chargement

comme montré sur la (Fig.IV.9). Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire de la meilleure façon les conditions réelles de l'essai. En somme il y a trois conditions aux limites appliquées au modèle, les lignes de contact de l'éprouvette avec les appuis lors de l'essai sont bloquées en translation suivant x, y et z. Le déplacement du poinçon est bloqué suivant les deux directions x et z. En fin un déplacement du poinçon selon la direction y est imposé pour reproduire le chargement comme montré sur la (Fig.IV.9).

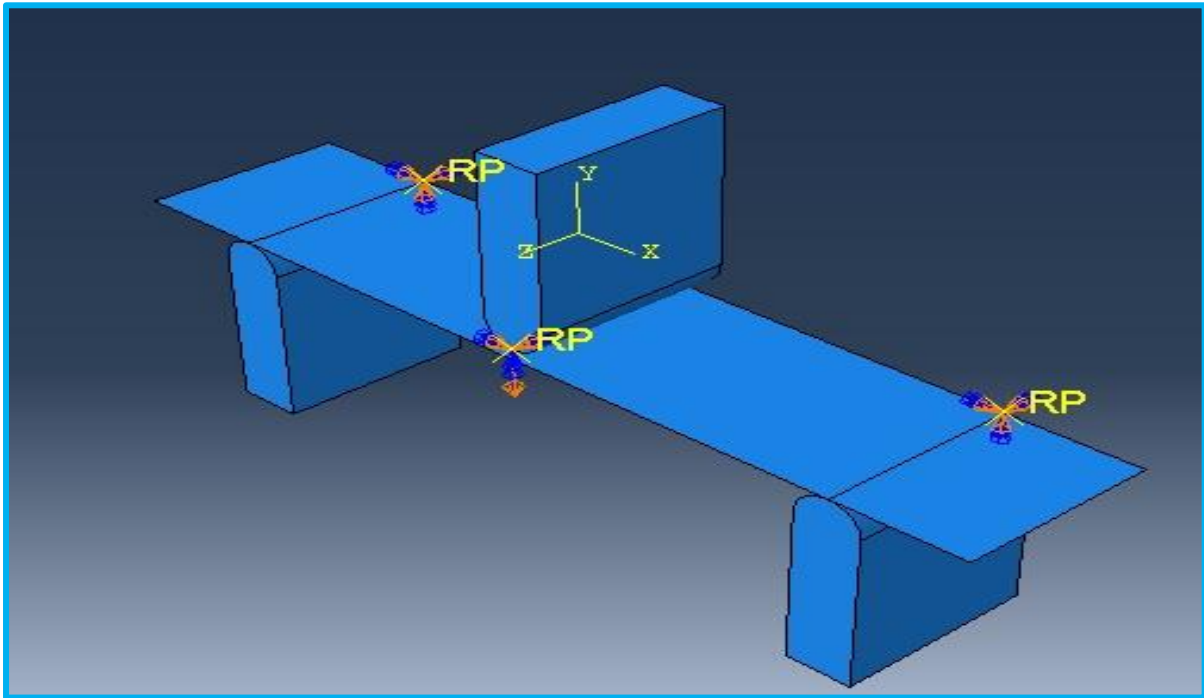


Fig.IV.9 Conditions aux limites appliquées

IV.6.7 Module MESH

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur l'assemblage. Dans ce modèle nous avons utilisé pour l'éprouvette, un maillage constitué de 1350 éléments de type : coque à 4 nœuds avec intégration réduite, dénommés S4R (Fig.IV.10). Pour les appuis et le poinçon un maillage composé de 379 éléments de type : Discrete Rigid element 4 nœuds avec, dénommés R3D4 (Fig.IV.11).

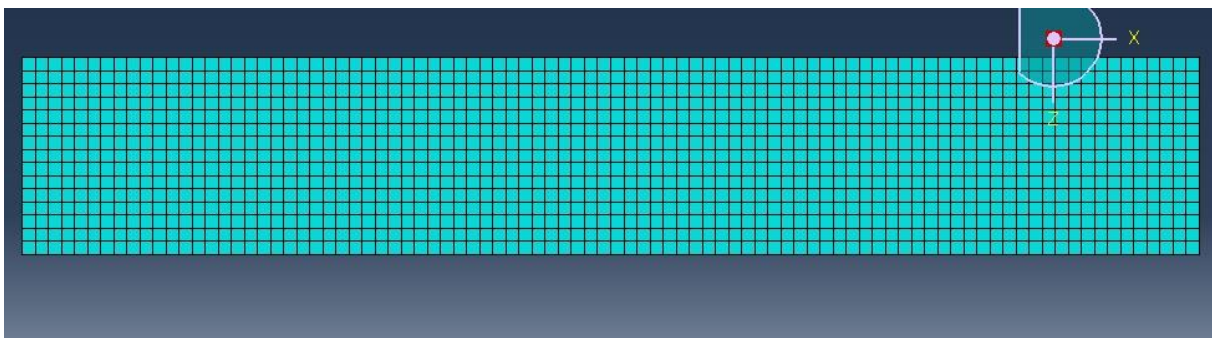


Fig.IV.10 Maillage du modèle élément fini de l'éprouvette avec des éléments de type SR4

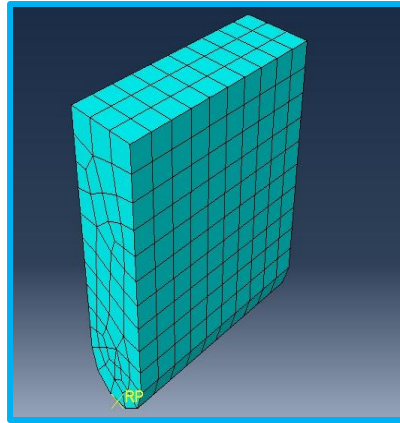


Fig.IV.11 Maillage d'appuis et du poinçon

IV.7 Résultats et discussion

Le but principal de la simulation de cet essai de flexion 3 points est d'étudier le comportement en flexion des biocomposites étudiés en comparant les modules de rigidité à la flexion. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel ABAQUS ont été examinés. Pour chaque composite, nous avons déterminé les contraintes et les déformations dans la région la plus sollicitée située au centre de l'éprouvette comme montré sur la (Fig.IV.12). Ensuite nous avons tracé la courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$. A partir de la pente de cette courbe linéaire, nous avons déduit les différentes valeurs des modules de flexion E_f des 09 composites bio-sourcés comme montré sur les figures (Fig.IV.13, Fig.IV.14) et (Fig.IV.15). Nous avons fait recours au logiciel MS-Excel pour tracer les courbes et définir les interceptes qui définissent le module de flexion E_f cherché. Les modules de flexions trouvées sont ensuite résumés et reportés sur le (Tableau IV.3).

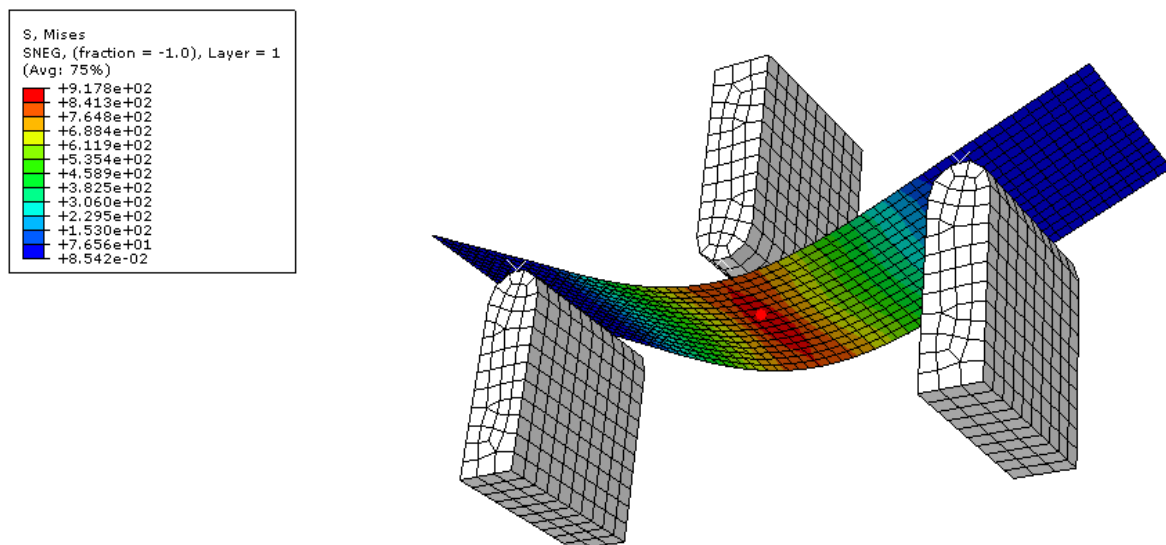


Fig.IV.12 Etat déformée de l'éprouvette et mise en évidence du point de calcul

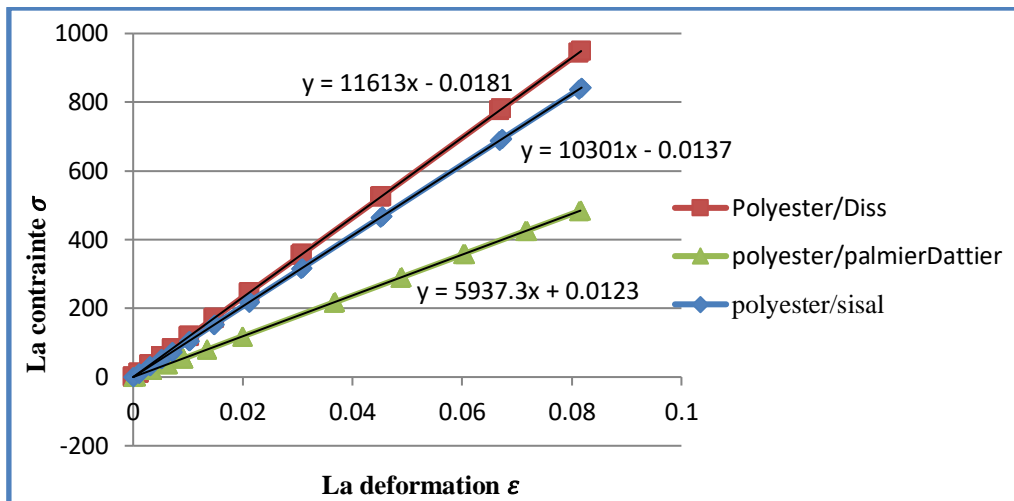


Fig.IV.13 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion 3 points : biocomposites à matrice Polyester

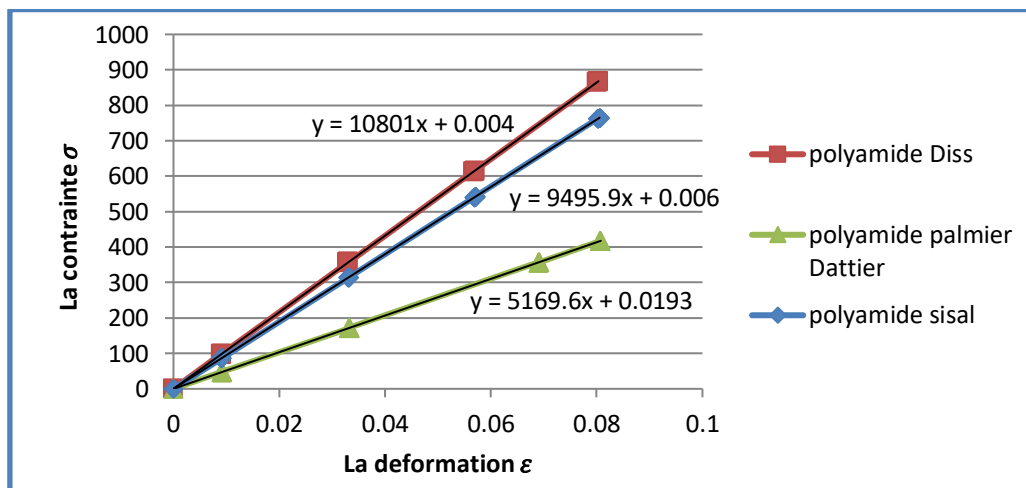


Fig.IV.14 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion 3 points : biocomposites à matrice Polyamide

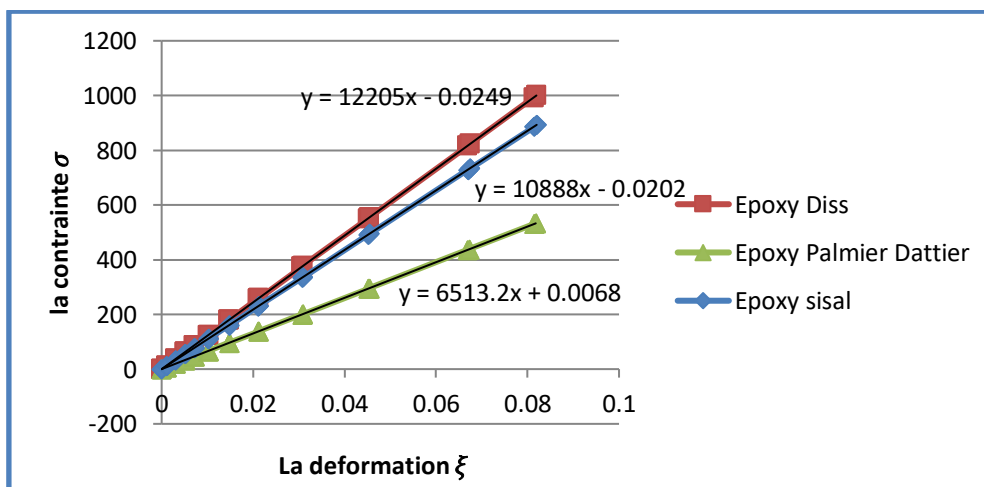


Fig.IV.15 Courbe qui lie les contraintes aux déformations $\sigma=f(\epsilon)$, essai de flexion 3 points : biocomposites à matrice Epoxyde

Tableau IV.3 Module de flexion des composite bio sourcés

Composite	Module de flexion E_f (MPa)
Epoxyde/sisal	10888
Polyester/sisal	10301
Polyamide/sisal	9495,9
Epoxyde/Palmier dattier	6513,2
Polyester/ Palmier dattier	5937,3
Polyamide/ Palmier dattier	5169,6
Epoxyde/Diss	12205
Polyester/Diss	11613
Polyamide/Diss	10801

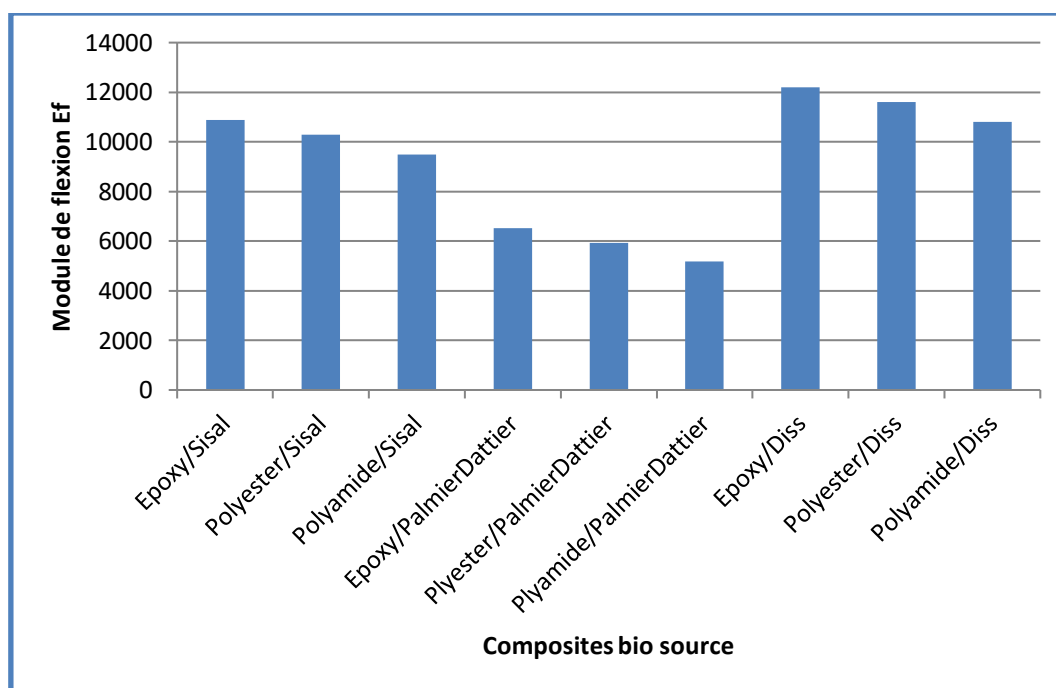


Fig.IV.16 Variation des modules de flexion des composite bio-sourcés

La figure représente l'histogramme du module de flexion E_f des différents composites étudiés. L'analyse de ce graphique permet de conclure que :

- Le composite ayant le module de flexion le plus élevé est le composite Epoxy/Diss avec : $E_f = 12205 \text{ Mpa}$
- Le composite ayant le module de flexion le plus bas est le polyamide/palmier Dattier avec : $E_f = 5169,6 \text{ Mpa}$

Références bibliographiques du chapitre IV

[1]	Bakhouche Hibat Erahmane, Daghboudj Samir, Elaboration et Caractérisation Numérique de Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres de Sisal, Mémoire Master II, Université Larbi Tébessi-Tébessa,(2020).
[2]	Semsari Billel, Etude et simulation d'un composite Aéronautique à base de fibre de carbone et matrice époxy, Mémoire de Master, Université Blida 1,2019
[3]	Bounadja Aicha, Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort métallique sollicités en flexion 3 points, Mémoire de Magister, Université de Bouira, (2006).
[4]	Brahimi Smail , Boucheneb Samir, Détermination des propriétés physico mécaniques d'un matériau composite stratifié, Mémoire de Master, Université Blida 1,(2016)

*Conclusion
générale*

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de mémoire constitue une contribution à l'étude du comportement en flexion de bio composites issues de la combinaison de trois types de fibres végétales (sisal, palmier dattier , diss) avec trois types de matrice polymériques (époxy, polyester , polyamide). Cette étude a permis de caractériser ces composites bio-sources en déterminant leurs propriétés micromécaniques par une approche analytique basée sur la loi de mélange et par une approche numérique utilisant le code de calcul ABAQUS. Par la suite des simulations de l'essai de flexion trois points ont été conduites dans le but de déterminer la rigidité à la flexion de ces bio composites.

Suite à cette étude nous nous sommes parvenu aux résultats suivants :

- Les propriétés micromécaniques des bio composites obtenues par homogénéisation par la loi de mélange et par une approche numérique utilisant le code de calcul ABAQUS sont pratiquement identiques.
- Les modules de Young E_L et E_T du composite (Epoxy/Diss) ont les valeurs les plus élevées ($E_L = 12388 \text{ Mpa}$, $E_T = 1079 \text{ Mpa}$).
- Le composite (Polyamide/ Palmier dattier) possède les modules de Young E_L et E_T les moins élevés ($E_L = 5380 \text{ Mpa}$, $E_T = 4021.9 \text{ Mpa}$).
- Les modules de cisaillement G_{LT} et G_{TT} du composite (Epoxy/Diss) ont les valeurs les plus élevées $G_{LT} = 3714.1 \text{ Mpa}$ et $G_{TT} = 3605.7 \text{ Mpa}$.
- Le composite (Polyamide/ Palmier dattier) possède les deux G_{LT} et G_{TT} les moins élevés $G_{LT} = 1622.2 \text{ Mpa}$, $G_{TT} = 1534 \text{ Mpa}$.
- Le composite (Epoxy/Diss) présente le module K_L le plus élevé ($K_L = 12719 \text{ Mpa}$)
- Le composite ayant le module de flexion le plus élevé est le composite Epoxy/Diss avec : $E_f = 12205 \text{ Mpa}$
- Le composite ayant le module de flexion le plus bas est le polyamide/palmier Dattier avec : $E_f = 5619,6 \text{ Mpa}$