



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABBES LAGHROUR  
KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES & DE LA  
TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE  
GENIE INDUSTRIEL

جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الصناعية

No. Réf. :

.....

Mémoire Présenté par:

Nourelhouda Boukraa

Rima Beddief

Pour obtenir le diplôme de MASTER (LMD)

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

*Thème*

# Élaboration et caractérisation de biocomposites : PE/%Fibres de Sisal

Devant le jury :

Dr. S. BAHLOULI

Président

U.A.L.K

Dr. A. MAKHLOUF

Rapporteur

U.A.L.K

Dr. R. KIHAL

Examineur

U.A.L.K

Année  
universitaire :  
2020 – 2021

## ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier en premier lieu « Allah » Le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour préparer ce mémoire.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr Azzedine MAKHLOUF**, pour sa disponibilité, son écoute et ses conseils et surtout pour la réalisation des essais **DRX et DSC/ATG au niveau du laboratoire LSPN, Université 8 Mai 1945 Guelma** ; ces efforts nous ont facilité la tâche pour la réalisation de ce modeste mémoire.*

*Sans oublier de remercier **Dr Ahmed BELAADI** pour la fourniture des échantillons utilisés dans ce travail.*

*Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire.*

*Et tous ceux que l'on n'a pas cité Merci à vous*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail*

*A ma chère mère et mon adorable père, qui sont la joie de ma vie et qui me  
Procurent tant de soutien, d'amour et d'affection ; ma moindre réussite est le fruit  
De leur sacrifice, dévouement et persévérance ; je leurs dédie ce travail en signe  
D'une sincère reconnaissance et d'une gratitude éternelle.*

*Je dédie ce travail également à mes chères frères et sœurs : Saida, Rachida, Somia, Alima,  
Wassila, Bilal, Boukhari, Moussa et Rabiee pour leurs encouragements*

*Et soutiens.*

*Sans oublier à tous mes amis qui j'ai passé les plus beaux moments avec eux.*

***Nour Elhouda***

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail*

*A ma chère mère, et mon adorable père, qui sont la joie de ma vie et qui me  
Procurent tant de soutien, d'amour et d'affection ; ma moindre réussite est le fruit  
De leur sacrifice, dévouement et persévérance ; je leurs dédie ce travail en signe  
D'une sincère reconnaissance et d'une gratitude éternelle.*

*Je dédie ce travail également à mon mari et mes enfants et à mes chers frères et sœurs : Bilal  
Belkacem, Sofiane Ramzi Laila  
, pour leurs encouragements*

*Et soutiens.*

*Sans oublier à tous mes amis qui j'ai passé les plus beaux moments avec eux.*

**RIMA**

## Table des matières

<i>Remerciements</i> .....	I
<i>Dédicace</i> .....	II
<i>Dédicace</i> .....	III
<i>Table des matières</i> .....	IV
<b>List de Figure:</b> .....	VII
<i>List de Tableau</i> .....	X
<i>Introduction générale</i> .....	2
<b>CHAPITRE I : Les polymères</b> .....	3
<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	3
<b>I .2. Définition de polymère</b> .....	4
<b>I.3. Classification des polymères</b> .....	4
<b>I.3.1. Selon la structure des chaines</b> .....	4
<b>I.3.3. Selon leur origine</b> .....	4
<b>I.3.4. Selon la nature chimique</b> .....	4
<b>I.3.1. Classement de polymères selon la structure des chaines</b> .....	4
<b>I.3.1.a. Polymères linéaires</b> .....	4
<b>I.3.1.b. Polymères ramifiés</b> .....	5
<b>Figure I.8 : Schématisation d'un polymère ramifié [5].</b> .....	6
<b>I.3.1.c. Polymères réticulés (tridimensionnels)</b> .....	6
<b>Figure I.10 : Schématisation d'un polymère réticulé. [5].</b> .....	6
<b>I.3.2. Classement de polymères selon leur comportement thermique et mécanique</b> .....	6
<b>I.3.2.a Polymères thermodurcissables</b> .....	7
<b>I.3.2.b Polymères thermoplastiques</b> .....	7
<b>I.3.2.c- Polymères élastomères</b> .....	7
<b>I.3.3 . Classement de polymères selon leur origine</b> .....	8
<b>I.3.3.a Polymères naturels</b> .....	8
<b>I .4. Domaine d'application des polymères</b> .....	12
<b>I.5. Structure d'un polymère</b> .....	12
<b>I.6. Les propriétés des polymères</b> .....	14
<b>I.6.1. Propriétés physiques</b> .....	14

<b>I.6.2. Propriétés thermiques</b> .....	14
<b>I.6.3. Propriétés mécaniques</b> .....	15
<b>I.6.3. a. Les thermodurcissables</b> .....	15
<b>I.7. CONCLUSION :</b> .....	15
<b>CHAPITRE II : Matériaux composites</b> .....	16
<b>II.1. Introduction</b> .....	17
<b>II.A. Matériaux composites</b> .....	17
<b>II.A.1. Définition</b> .....	17
<b>II.A.2. Constituants des matériaux composites</b> .....	18
<b>II.A.2.1 La matrice</b> .....	18
<b>II.A.2.1.1. Les résines thermodurcissables</b> .....	19
<b>II.A.2.1.2 .Les résines thermoplastiques</b> .....	19
<b>II.A.2.1.3. Matrices naturelles</b> .....	19
<b>II.A.2.1.4. Résines époxydes</b> .....	20
<b>II.A.2.1.5. Phénoplastes ou phénols-formols</b> .....	20
<b>II.A.2.1.6. Résines thermostables</b> .....	20
<b>II.A.2.2. Renforts</b> .....	20
<b>II.A.2. 2. 1. Fibres de verre</b> .....	21
<b>II.A.2. 2. 2. Fibres de carbone</b> .....	22
<b>II.A.2. 3. L'interface</b> .....	23
<b>II.A.3. Classification des matériaux composites</b> .....	23
<b>II.A.3.1 Classement suivant la nature des constituants</b> .....	23
<b>II.A.3.1.2 Les composites à matrice métallique</b> .....	24
<b>II.A.3.1.3 Les composites à matrice minérale : (céramique)</b> .....	24
<b>II.A.3.2 Classement suivant la forme des constituants</b> .....	24
<b>II.A.4. Charges et additifs</b> .....	25
<b>II.A.5. Avantages et inconvénients des composites</b> .....	26
<b>II.A.6. Structure du composite</b> .....	27
<b>II.B. Les biocomposites</b> .....	29
<b>II.B.1. Définition</b> .....	29
<b>II.B.2. Constituants</b> .....	30
<b>II.B.2.1. Matrice</b> .....	30
<b>II.B.3. Les charge</b> .....	33
<b>II.B.4. Domaine d'application</b> .....	33

CONCLUSION :	35
CHAPITRE III : Matériaux et Techniques	36
III.1 INTRODUCTION :	37
III.A Fibres de sisal	37
III.A.1. Le Sisal	37
III.A.2 Historique du sisal à Madagascar [49]	40
III.A. 3. La culture	41
III.A.4 Domaine d'utilisation des fibres de sisal	41
III.A. 4. 2. Les autres utilisations :	42
III.A. 5. La production du sisal dans le monde :	42
III.A.6 Morphologie	43
III.A.7 Composition chimique	46
III.B. Polyéthylène	47
III.B.1 Définition	47
III.B.2 Caractéristiques générales des polyéthylènes [70]	48
III.B.3 Structure du polyéthylène	49
III.C. Techniques expérimentales :	53
III.C.1. introduction	53
III.C.2. Méthodes d'analyse	53
III.C.2.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)	57
III.C.2.3. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	58
III.D. Matériaux utilisés	59
III.D.1. Résine	59
III.D.2. Charge	60
III.E. Méthode d'élaboration des biocomposites	61
III.E.1. Préparation des échantillons	61
III.2 CONCLUSION	63
CHAPITRE IV : Résultats et discussion	63
IV. Résultats et discussion	64
IV.1. Analyse thermogravimétrique (ATG)	64
IV.2. Analyse calorimétrique différentielle (DSC)	66
IV.3. Diffraction des rayons X (DRX)	68
IV.4. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	70
IV.4.1 Analyse FTIR	71

<b>CONCLUSION GENERAL</b> .....	72
<b>LIST DE REFERENCES :</b> .....	73
<b>RÉSUMÉ</b> .....	79

**List de Figure:**

**Figure I.1 :** produit à base polymères naturels.

**Figure I.2 :** Produits à base polymères synthétiques.

**Figure. I.3 :** structure d'un polymère linéaire

**Figure I. 4.** Différents exemples de polymères linéaires.

**Figure I. 5:** Schématisation d'une chaîne linéaire.

**Figure I.6 :** structure d'un polymère ramifié ou greffé.

**Figure I.7 :** (a) Homopolymère ramifié ; (b) copolymère ramifié.

**Figure I.8 :** Schématisation d'un polymère ramifié [5].

**Figure I. 9.** Polymère réticulé avec un pont di-sulfure reliant deux chaînes.

**Figure I.10 :** Schématisation d'un polymère réticulé. [5]

**Figure I.11 :** schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère thermodurcissable au cours d'un chauffage

**Figure I.12 :** schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère thermoplastique au cours d'un chauffage

**Figure I. 13:** schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère élastomère au cours d'un chauffage.

**Figure I. 14 :** Différents types de polymères selon l'ordre moléculaire

**Figure I. 15 :** Structure de la molécule nucléotide.

**Figure I.16 :** Exemples de polymères en plastique.

**Figure I.17 :** Structure chimique du glucose 1,4(Amylose).

**Figure I. 18 :** Structure chimique de l'amilopectine

**Figure I. 19 :** Structure chimique de l'amidon

**Figure.I.20 :** Ruban Adhésif,Colle liquide.

**Figure I.21 :** structure d'un homopolymère d'une façon globale.

**Figure I.22 :**Différentes structures de polymères

**Figure II.1 :** matériaux composites.

**Figure II.2:** Différentes familles de matrices.

**Figure II.3:** Principaux matériaux de renfort.

**Figure II.4 :** Classification des matériaux composites selon la forme des constituants.

**Figure .II.5 :** Les types de charges.

**Figure II.6 :** composite monocouche.

**Figure II.7 :** composite stratifié.

**Figure II.8 :** Composite sandwichs.

**Figure II.9 :** Classification des biocomposites.

**Figure II.10 :** Constituants d'un matériau composite.

**Figure II.11:** Types de matrice.

**Figure II.12:**Différents types de renforts.

**Figure II.13:** Représentation d'un composites à particules et à fibres.

**Figure II.14 :** Conception et applications innovantes des biocomposites en fibres de bambou.

**Figure II.15:** Applications de plastiques renforcés de fibres naturelles dans les produits de construction.

**Figure II.16 :** Application des composites à fibres naturelles dans le secteur militaire.

**Figure II.17 :** Composites thermoplastiques renforcés avec les fibres de bambou.

**Figure II.18 :** Quelques applications de fibres naturelles dans le domaine de l'automobile.

**Figure III.1 :** schéma du sisal.

**Figure.III.2 :** Extraction des fibres de sisal.

**Figure.III.3 :** Schéma de principe d'une machine mécanique à décortiquer.

**Figure.III.4 :** Le sisal (a) la plante, (b) vue en coupe de la lame, et (c) vue au microscope d'une région sélectionnée en (b)

**Figure.III.5 :** Géométrie structurale de la fibre : (a) forme d'un fer à cheval ; (b) surface approximative.

**Figure III.6 :** Morphologie de Arch. fibre: (a) Arch. fibre liée à ses tissus de conduite ; (b) détail de conduites du tissu.

**Figure III.7 :** Aperçu microstructural de fibre de sisal : (a) cellules de fibre avec le lumen et les lamelles moyennes (b) détail de ML et des murs de la cellule.

**Figure III.8 :** Microstructure d'une cellule de fibre.

**Figure III.9 :** Diagramme schématique de la structure ligne-cellulosique de fibre d'Agave (Agave Americana)

**Figure III.10 :** Représentation semi-développée de la macromoléculaire du polyéthylène.

**Figure III.11 :** Schéma représentatif du motif du polyéthylène.

**Figure III.12 :** Polymérisation du polyéthylène.

**Figure III.13:** Photo de l'appareil DRX (Bruker D8).

**Figure III.14:** Photographie d'un diffractomètre de laboratoire.

**Figure III.15:** Schéma d'un diffractomètre, avec les repères de l'échantillon ( $O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ ) et de l'instrument ( $O, \vec{X} \text{ inst}, \vec{Y} \text{ inst}, \vec{Z} \text{ inst}$ ).

**Figure III.16:** Principe d'établissement de la loi de Bragg

**Figure III.17:** photo d'un appareil DSC/ATG (NETZSCH).

**Figure III.18:** schéma descriptif de DSC.

**Figure III.19 :** Poudre du PEHD.

**Figure III.20 :** Fibres de Sisal.

**Figure III.21:** méthode d'élaboration des plaques biocomposites entre les deux cylindres.

**Figure III.22 :** Le moule entre les deux résistances.

**Figure III.23:** plaque obtenue après le pressage.

**Figure IV.1 :** courbe TG de la fibre de sisal

**Figure IV.2 :** courbe TG du PFHD vierge

**Figure IV.3 :** courbe TG du PFHD/10% fibres de sisal

**Figure IV.4 :** courbe TG du PFHD/20% fibres de sisal

**Figure IV.5 :** courbe DSC du PFHD vierge

**Figure IV.6 :** courbe DSC du PEHD vierge, PEHD/10% fibres de sisal et PEHD/20% fibres de sisal

**Figure IV.7 :** courbe DSC du PEHD/20% fibres de sisal

**Figure IV.8 :** diffractogramme de la fibre de sisal

**Figure IV.9 :** diffractogramme du PEHD vierge

**Figure IV.10 :** diffractogramme du composite PEHD/20% la fibre de sisal

**Figure IV.11 :** spectre FTIR de la fibre de sisal, PEHD vierge et PEHD/20% fibres de sisal

### ***List de Tableau***

**Tableau I.1 :** les principales différences entre les 3 polymères.

**Tableau I.02 :** quelques homopolymères avec leurs monomères et noms commerciaux.

**Tableau II.1 :** **Caractéristiques** des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques

**Tableau II.2 :** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.

**Tableau II.3 :** Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone

**Tableau III.1** Bulletin statistique de la production du sisal au monde.

**Tableau III.2 :** comparaison entre le PEHD et le PEBD.

**Tableau IV.1 :** Résultats de l'ATG.

**Tableau IV.2 : Résultats de DSC.**

**Tableau IV.3 : Résultats de DRX**

## ***Introduction générale***

Ces dernières années, la responsabilisation et la conscience ont poussé les chercheurs dans le domaine de matériaux composites à l'utiliser des charges naturelles issues de la biomasse, ces charges remplacent les charges synthétiques, minérales ou organiques dans la fabrication des matériaux afin d'améliorer les propriétés du matériau composite obtenu et de rendre ce matériau plus au moins recyclable.

La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940, n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'application dans des domaines variés; l'industrie aérospace, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration... etc. Les fibres sont issues de ressources renouvelables, elles sont biodégradables et moins irritantes pour la peau et le système respiratoire des personnes qui les manipulent. Par ailleurs les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres minérales.

Bien que les fibres végétales soient souvent présentées comme nouvelles et révolutionnaire, en revanche, certains inconvénients constituent un frein au niveau de leur développement industriel, à savoir: la stabilité thermique limitée, leurs propriétés non constantes qui dépendent des conditions climatiques et surtout leurs caractères hydrophiles responsables de l'absorption d'humidité par le biais des liaisons hydrogène, provoquant ainsi le gonflement du matériau et par conséquent la détérioration de ses propriétés.

Afin de mieux comprendre cette étude, ce manuscrit est subdivisé en quatre chapitres.

- Le premier chapitre : généralités sur les polymères
- Le deuxième chapitre : matériaux composites
- Le troisième chapitre : matériaux et Techniques
- Le quatrième chapitre : résultats et discussion.

# **CHAPITRE I :**

## **Les polymères**

## I.1 INTRODUCTION

Depuis des siècles, nous utilisons les polymères naturels, tirés des végétaux et des animaux, tels que le bois (Figure I.1), le caoutchouc, le coton, la laine, le cuir et la soie ainsi que les protéines, les enzymes, les amidons et la cellulose qui jouent un rôle important dans les processus biologiques et physiologiques des végétaux des animaux.

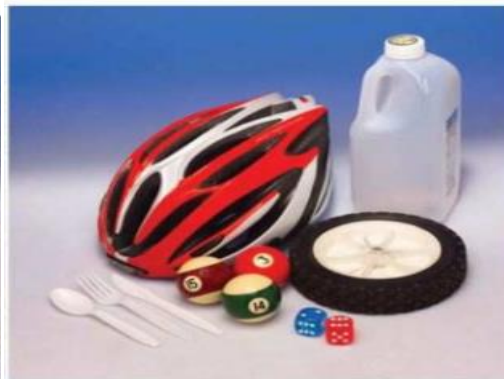
Les outils de la recherche scientifique moderne ont permis de déterminer la structure moléculaire de ce groupe de matériaux et de mettre au point de nombreux polymères synthétisés (Figure I.2) à partir de petites molécules organiques.

Les polymères représentent une classe de matériaux de plus en plus importante. Ils concurrencent les matériaux traditionnels, métaux et matériaux minéraux, grâce à :

- leur faible densité alliée à des propriétés thermomécaniques de plus en plus élaborées ;
- leur faible coût de production ;
- leurs propriétés très spécifiques (cas des polymères fonctionnels) ;
- leur possibilité de recyclage, au moins en ce qui concerne les matières thermoplastiques.



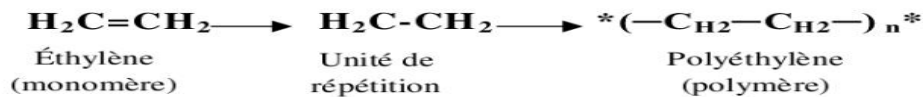
**Figure I.1 :** produit à base polymères naturels. [1]



**Figure I.2 :** Produits à base polymères synthétiques.[1]

## I.2. Définition de polymère

Les macromolécules sont des molécules géants, formées de plusieurs milliers de motifs structuraux simples appelées mères, du grec « meros » qui signifie « partie » liés entre eux par des liaisons covalentes. L'exemple suivant présente la formation de polyéthylène (PE) par polymérisation des monomères d'éthylène[2].



## I.3. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés différemment selon la considération de leurs structures, le type de réaction qui a servi à les préparer et leurs propriétés physiques. Ceci veut dire que les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés (selon la structure).

Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement (semi cristallin), et cristallisés [2].

### I.3.1. Selon la structure des chaînes

- Polymères linéaires; Polymères ramifiés; Polymères réticulés.

### I.3.2. Selon leur comportement thermique

- Polymères thermoplastiques ; Polymères thermodurcissables ; Polymères thermo-élastiques (élastomères).

### I.3.3. Selon leur origine

- Polymères naturels ; Polymères synthétiques et de transformation

### I.3.4. Selon la nature chimique

- Polymères minéraux ; Polymères organiques ; Polymères mixtes.

### I.3.1. Classement de polymères selon la structure des chaînes

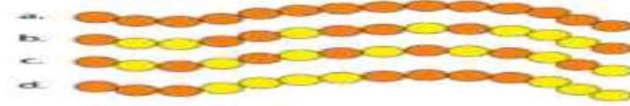
#### I.3.1.a. Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes ; représentés comme suit

---

**Figure. I.3 :** structure d'un polymère linéaire

Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse  $T_g$ . La transition vitreuse correspond au passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.



**Figure I. 4.** Différents exemples de polymères linéaires.  
a. homopolymère, b. copolymère statistique.  
c. copolymère alterné, d. copolymère séquencé.



**Figure I. 5:** Schématisation d'une chaîne linéaire [5].

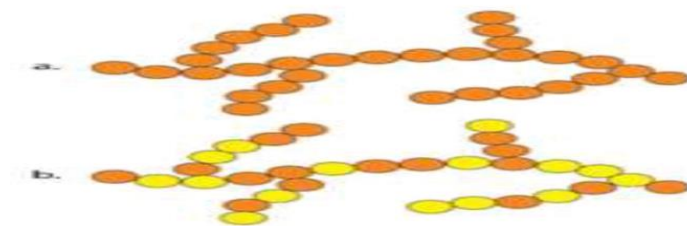
### I.3.1.b. Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires, représentés de la façon

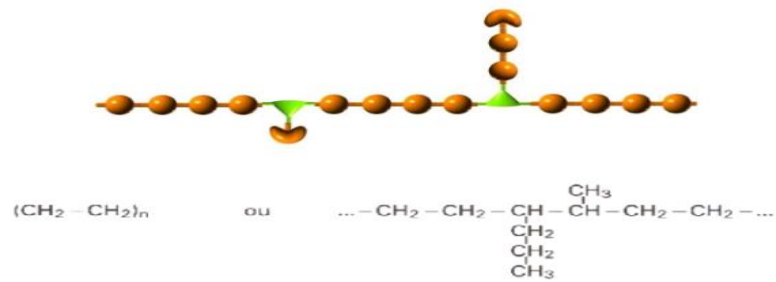


**Figure I.6 :** structure d'un polymère ramifié ou greffé.

Il existe des polymères et copolymères greffés représentés en figure en bas



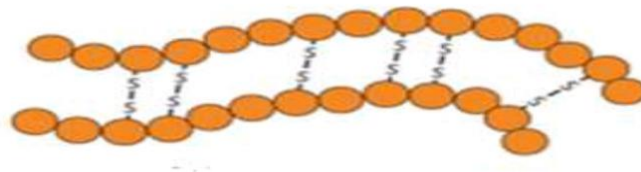
**Figure I. 7 :** (a) Homopolymère ramifié ; (b) copolymère ramifié.



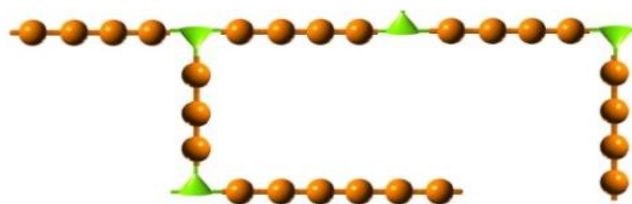
**Figure I.8** : Schématisation d'un polymère ramifié [5].

### I.3.1.c .Polymères réticulés (tridimensionnels)

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau (polymère tridimensionnel dur, non fusible et non soluble) ; représentés de la façon suivante



**Figure I. 9.** Polymère réticulé avec un pont di-sulfure reliant deux chaînes



**Figure I.10** : Schématisation d'un polymère réticulé. [5]

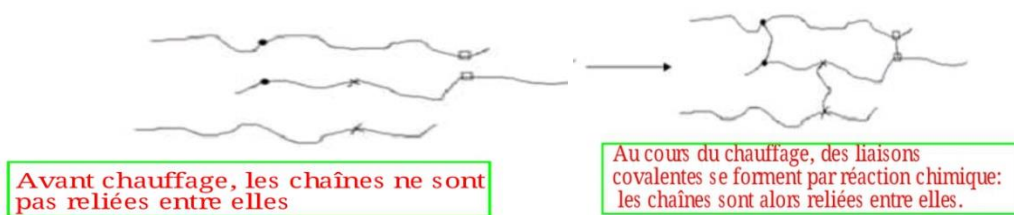
### I.3.2. Classement de polymères selon leur comportement thermique et mécanique

Les différences de propriétés thermiques et mécaniques résultent de la différence de structure des polymères et des interactions ou véritables liaisons entre les chaînes.

On distingue 3 types de polymères selon le comportement thermique :

### I.3.2.a Polymères thermodurcissables

Sous l'effet de la chaleur, il devient dur et ne peut plus fondre. Une nouvelle hausse de température mènerait à une destruction du polymère. Explication : les polymères thermodurcissables sont réticulés : ils sont obtenus par réaction chimique : les réticulations (liaisons covalentes) sont formées au cours du chauffage et ne peuvent ensuite plus être rompues [3].

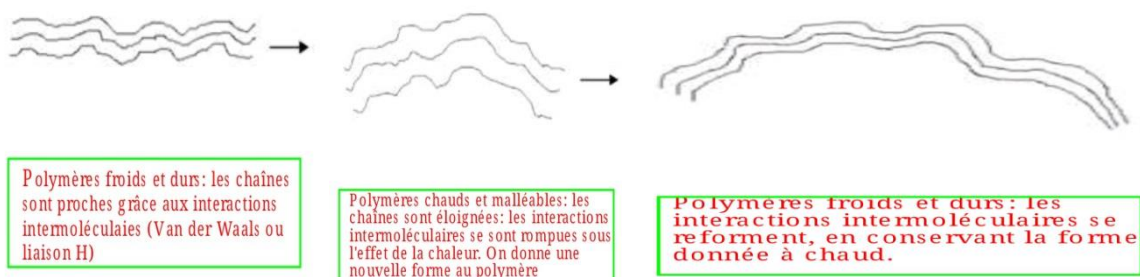


**Figure I.11** : schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère thermodurcissable au cours d'un chauffage

### I.3.2.b Polymères thermoplastiques

Sous l'effet de la chaleur, il se ramollit et devient malléable (tend à se fondre), en se refroidissant, il se durcit en conservant la forme donnée à chaud. Ex : PE, PS, Polyamide.

Explication : Les polymères thermoplastiques sont linéaires ou ramifiés [3].



**Figure I.12** : schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère thermoplastique au cours d'un chauffage

### I.3.2.c- Polymères élastomères

Ils s'étirent sous l'effet d'une action mécanique et reviennent à leur forme initiale lorsque l'action mécanique cesse. Ex : caoutchouc, polyester. Explication : les élastomères sont des polymères réticulés :

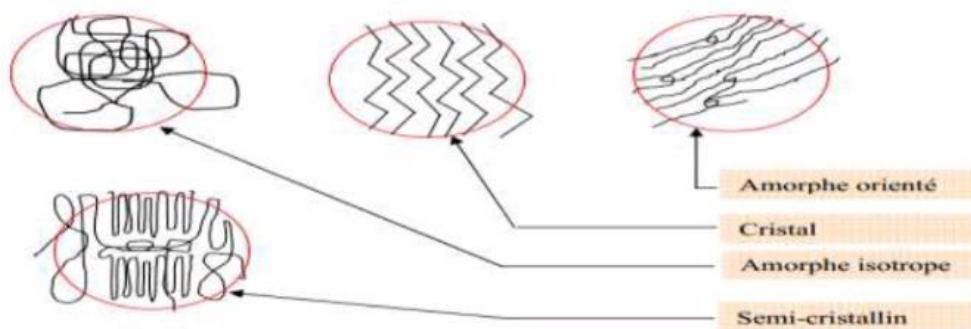


**Figure I. 13** : schéma explicatif de la formation des liaisons au sein d'un polymère élastomère au cours d'un chauffage.

Le tableau ci-dessous donne les principales différences entre les 3 polymères :

**Tableau I.1** : les principales différences entre les 3 polymères [3].

Thermoplastiques	Thermodurcissables	Elastomères
Polymères fusibles, solubles, recyclables, amorphes ou semi-cristallins, dont les chaînes peuvent être séparées les unes des autres et avec une $T_g$ ou une $T_f > T_{amb}$ .	Polymères infusibles, insolubles, non recyclables, amorphes, dont toutes les chaînes sont liées les unes aux autres (réticulé) et avec une $T_g > T_{amb}$ .	matériau amorphe, souvent réticulé, et présentant une $T_g$ faible (souvent inférieure à $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figure I. 14** : Différents types de polymères selon l'ordre moléculaire

### I.3.3 . Classement de polymères selon leur origine

On distingue deux types de polymères selon leur origine : Polymères naturels et polymères synthétiques et de transformation [3].

#### I.3.3.a Polymères naturels

Ce sont de grandes macromolécules (polymères) qui existent au sein du corps humain et animale et même végétal.

### I.3.3.a .1. Protéines

L'hémoglobine est une protéine dont la principale fonction est le transport du dioxygène dans l'organisme humain. Elle est constituée de quatre chaînes identiques deux à deux : deux chaînes  $\alpha$  de 141 acides aminés chacune et de deux chaînes  $\beta$  de 146 acides aminés chacune (ce qui donne un total de 574 acides aminés pour l'hémoglobine).

### I.3.3.a.2. Acides nucléiques

Les acides nucléiques sont des polymères dont l'unité de base, ou monomère, est le nucléotide. Ces nucléotides sont reliés par des liaisons phosphodiesters.

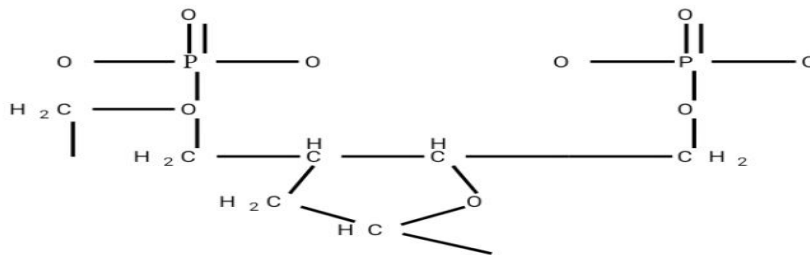


Figure I. 15 : Structure de la molécule nucléotide.

### I.3.3.a.3. Enzyme

Protéine qui a pour but d'accélérer les réactions chimiques dans l'organisme.

### I.3.3.a .4. Cellulose

La cellulose est un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de D-Glucose.

### I.3.3.a 5. Caoutchouc naturel

sont des polymères élastomères qu'on a déjà étudiés.

### I.3.3.b. Polymères synthétiques

On distingue 5 types de polymères synthétiques [3] :

### I.3.3.b.1. Polymère plastique

Le polymère plastique est un composé organique, donc il est composé de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), de soufre (S) et de silicium (Si).



Figure I.16 : Exemples de polymères en plastique

### I.3.3.b .2. Polymères caoutchoucs et élastomères

Un élastomère est un polymère linéaire amorphe présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation tels que les pneumatiques.

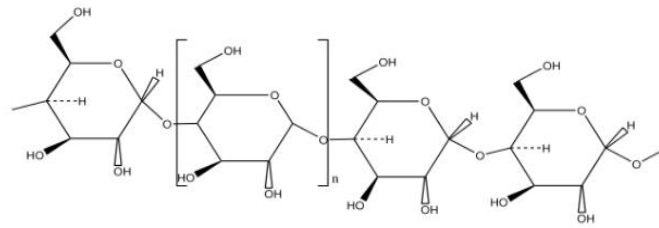
Un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre (état désordonné), ce qui le distingue des composés cristallisés (état ordonné). Les verres, les élastomères et les liquides sont des polymères amorphes.

La plupart des élastomères sont des polymères organiques [3]. Ils sont caractérisés par leur élasticité et le gonflement. Les tapis du sol et la céramique sont des exemples de polymères élastomères.

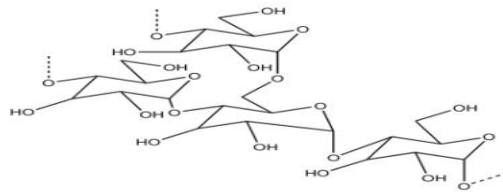
Le caoutchouc naturel contient 99,9 % d'unités 1,4-cis-polybutadiène, au nombre d'environ 20 000. Il possède une élasticité, des propriétés mécaniques et une résilience élevées.

### I.3.3.b.3. Fibres

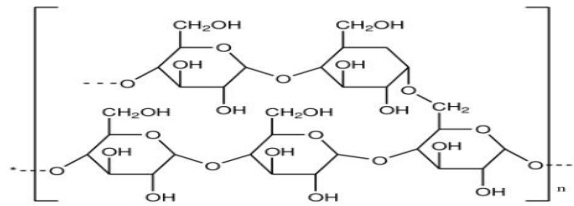
La fibre synthétique est une fibre (ou un fil) qui se trouve dans le textile (matériau organique) produit à partir de matière(s) synthétique(s) tel que l'amidon qui est un mélange de deux homopolymères, l'amylose (glucose  $\alpha$  1,4) et l'amylopectine.



**Figure I.17 :** Structure chimique du glucose 1,4(Amylose)



**Figure I. 18 :** Structure chimique de l'amilopectine



**Figure I. 19 :** Structure chimique de l'amidon

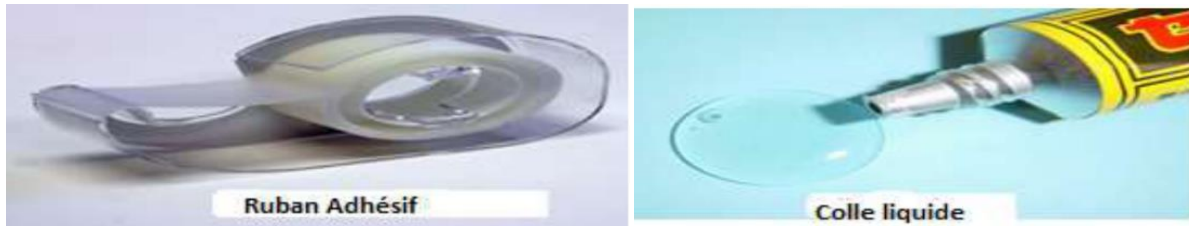
**NB : Il existe de fibres polymères haute technologie pour béton armé.**

#### **I.3.3.b.4. Peintures**

La peinture est une composition liquide, liquéfiable ou en mastic, employée pour protéger, décorer ou améliorer la surface d'un objet.

#### **I.3.3.b.5. Adhésifs**

Un adhésif est un matériau qui permet de faire adhérer entre eux des objets. Selon la nature des objets à assembler (notamment son aspect de surface : rugosité, porosité), on utilise différents types d'adhésifs, dont la structure chimique va ou non réagir avec la surface des pièces assemblées [3].



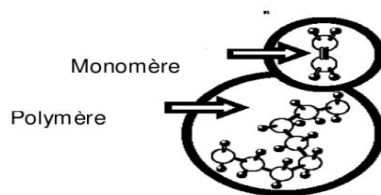
**Figure.I.20** : Ruban Adhésif,Colle liquide.

#### **I.4. Domaine d’application des polymères**

Les polymères sont à la base de plusieurs matériaux et sont utilisés dans différents domaines, tels que : fibres textiles naturelles et synthétiques, mousses isolantes, colles, vêtements, vaisselle, emballage alimentaire (bouteille), et industrie (flacons de détergents, sachets,...) industrie chimique (tuyauteries, cuves,...) [2].

#### **I.5. Structure d’un polymère**

Le polymère est un matériau organique, composé essentiellement d’atomes de carbone et d’hydrogène. D’autres éléments notamment l’oxygène et l’azote plus rarement le chlore, le fluor, le soufre et le silicium peuvent encore intervenir dans la composition de la chaîne. Ces différents éléments sont tous des non métaux, de faibles poids atomiques et par conséquent le polymère est un matériau léger, un mauvais conducteur de l’électricité et de la chaleur (0,1 à 0,3 W/m °K) [AGGASANT, 1993]. On distingue les homopolymères constitués de répétition d’une unique structure moléculaire (figure I.01) (cas du polyéthylène à haute densité PEHD, polypropylène PP) et les copolymères constitués d’une répétition de plusieurs structures différentes, comme par exemple l’acrylonitrile butadiène styrène (ABS). La plupart des polymères sont élaborés à partir d’un ou deux types de monomères seulement [EHRENSTEIN, 2000].



**Figure I.21** : structure d’un homopolymère d’une façon globale.

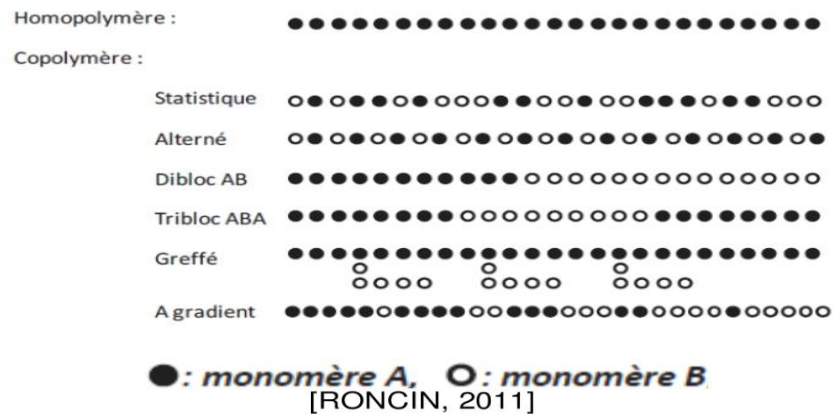
Le tableau I.02 présente les monomères de quelques homopolymères avec leurs noms commerciaux :

**Tableau I.02:** quelques homopolymères avec leurs monomères et noms commerciaux.

Polymère	Abréviation	Monomère	Noms commerciaux
Polyéthylène	PE	$\text{---CH}_2\text{---CH}_2\text{---}$	Lactène Hostalen Dowlex
Polypropylène	PP	$\text{---CH}_2\text{---}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{---}$	Appryl Novolen
Polychlorure de vinyle	PVC	$\text{---CH}_2\text{---}\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}\text{---}$	Lacovyl Vinidur Vinnolit
Polychlorure de vinyle	PVC	$\text{---CH}_2\text{---}\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}\text{---}$	Lacovyl Vinidur Vinnolit
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	$\text{---CH}_2\text{---}\underset{\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \text{C}=\text{O} \\ \text{O} \\ \text{CH}_3 \end{array}}{\text{C}}\text{---}$	Plexiglas Altuglas Lucry
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	$\text{---CF}_2\text{---CF}_2\text{---}$	Téflon Hostaflon

Soit A, B deux monomères différents, on distingue différents types de copolymères selon l'organisation des monomères le long de la chaîne (figure I.20) :

- 1. Les copolymères statistiques :** la séquence des monomères obéit à une loi statistique.
- 2. Les copolymères alternés :** les unités répétitives se succèdent régulièrement.
- 3. Les copolymères à blocs :** ils sont constitués de séquences différenciées (habituellement incompatibles) de chacun des co-monomères. Il existe par exemple des diblocs AB, des triblocs ABA.
- 4. Les copolymères greffés :** des branches (ou ramifications) constituées de chaînes d'un type de monomère, sont greffées sur un squelette principal formé de monomères d'un autre type.
- 5. Les copolymères à gradient :** ils possèdent un gradient de concentration ou de composition de leurs unités respectives d'un constituant vers l'autre.



**Figure I.22** : Différentes structures de polymères

## I.6. Les propriétés des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques [5].

### I.6.1. Propriétés physiques

La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion. La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone).

### I.6.2. Propriétés thermiques

La température de transition vitreuse et la température de fusion sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température.

### **I.6.3. Propriétés mécaniques**

Le comportement mécanique des polymères est différent de celui des métaux. Il dépend de la structure, du mode de fabrication, de la forme de la pièce, de la température et de la composition :

#### **I.6.3. a. Les thermodurcissables**

- Le pourcentage d'allongement est le plus faible.
- Ils se déforment peu avant rupture.
- Ils sont plus fragiles et plus sensibles aux chocs
- Leur rigidité est importante et est conservé jusqu'à la dégradation.
- Leur résistance en compression est souvent plus élevée que la résistance en traction.

#### **I.6.3. b. Les thermoplastiques**

- Sous charge, les thermoplastiques se déforment instantanément dans un premier temps, puis continuent à se déformer progressivement au cours du temps (des formations retardées ou fluage).
- Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.
- La destruction des liaisons, le glissement entre les macromolécules, le frottement interne sont les principales causes du fluage [5].

## **I.7. CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques généralités et propriétés des polymères. Les polymères représentent une branche de la chimie à part entière car avec des molécules dont la chimie est proche (les dérivés vinyliques avec la double liaison C=C), on obtient des polymères avec des propriétés physico-chimiques très différentes. Les uns sont des thermoplastiques solubles ou non dans l'eau, les autres des thermo durs insolubles et infusibles.

# **CHAPITRE II :**

# **Matériaux composites**

## **II.1. Introduction**

Un des objectifs de ce chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures.

Etant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tout type de composite.

La première partie de ce chapitre est consacré à la présentation des différents constituants des matériaux composites. Dans la deuxième partie, on va présenter le procédé de fabrication de ce type de matériaux et leurs structures.

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par apport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite et liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Il offre une meilleure isolation thermique ou phonique, et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [06].

### **II.A. Matériaux composites**

#### **II.A.1. Définition**

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite.

La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère.

## II.A.2. Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- d'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites, des charges ;
- d'un renfort ;
- d'une interface.

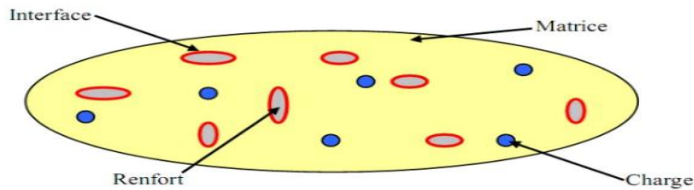


Figure II.1 : matériaux composites [7]

### II.A.2.1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :

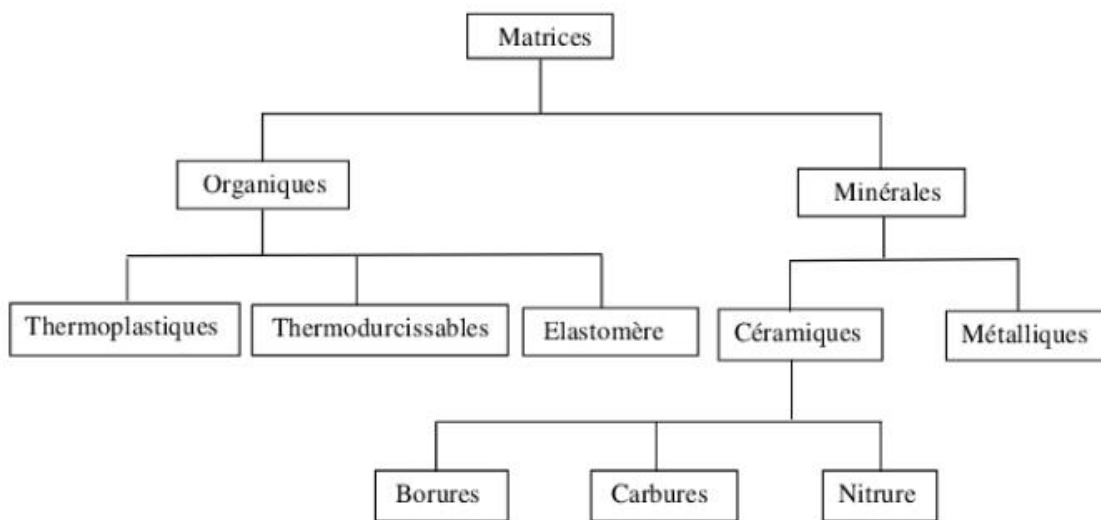


Figure II.2: Différentes familles de matrices [08]

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

**II.A.2.1.1. Les résines thermodurcissables**

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu’une seule fois [08].

**II.A.2.1.2 .Les résines thermoplastiques**

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (Force de van der Waals, liaisons d’hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement [09]. Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau 1 :

**Tableau II.1:**Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [14].

<b>Matrices</b>	<b>Thermoplastiques</b>	<b>Thermodurcissables</b>
Etat de base	Solide prêt à l’emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chute et déchets	Recyclables	Perdus

**II.A.2.1.3. Matrices naturelles**

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et microorganismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l’amidon, la cellulose la lignine [10].

#### II.A.2.1.4. Résines époxydes

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone) [12].

#### II.A.2.1.5. Phénoplastes ou phénols-formols

Les phénoplastes sont des matières thermodurcissables obtenues par polycondensation d'un phénol et d'un aldéhyde avec élimination d'eau et formation d'un réseau tridimensionnel [13].

#### II.A.2.1.6. Résines thermostables

Elles se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [11].

#### II.A.2.2. Renforts

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

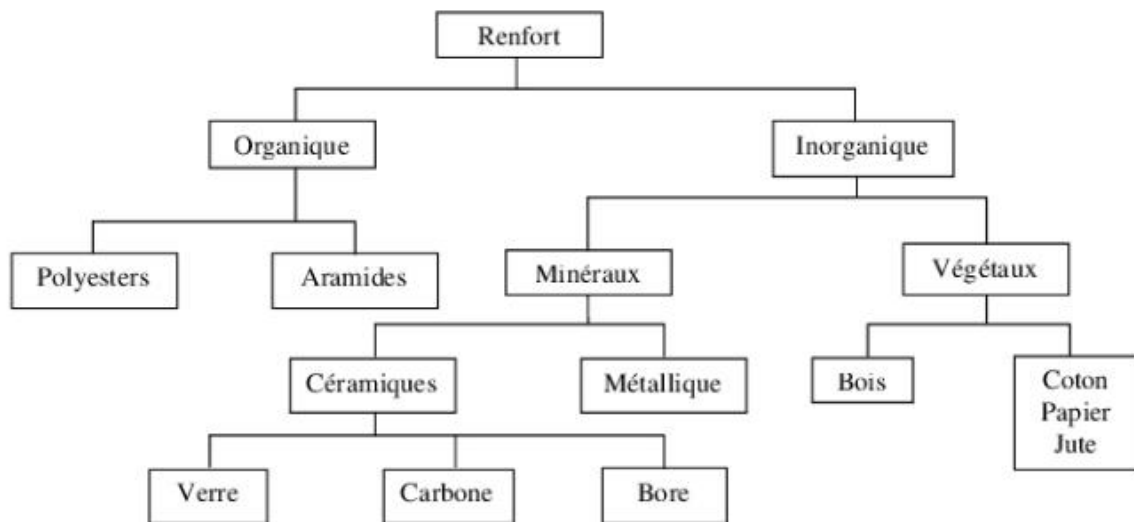


Figure II.3: Principaux matériaux de renfort [17].

### II.A.2. 2. 1. Fibres de verre

Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). On distingue différents types de fibre :

- **verre E:** le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- **verre D:** il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- **verre C:** il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.
- **verre R ou S:** il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre.

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau 2.

**Tableau II.2 :** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

**II.A.2. 2. 2. Fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont pour la plupart obtenues à partir d'une fibre précurseur de type polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent une étape d'oxydation pour faire réticuler le plan et le rendre ainsi moins « fusible » en vue des traitements thermiques ultérieurs. Elles sont ensuite soumises à une seconde étape, qui peut être une carbonisation à 1500°C ou à une graphitisation à 3000°C. Pendant cette étape, les fibres sont maintenues sous tension afin de conserver l'orientation de la structure moléculaire.

Dans le premier cas, on obtient des fibres haute résistances ou HR, et dans le deuxième cas, on obtient des fibres haut module ou HM (Tableau 3). Il existe également des fibres de module intermédiaire, appelée inter médiate modules ou IM. Elles peuvent ensuite passer dans un électrolyte ou subir une oxydation pour créer des groupements polaires, destinés à favoriser l'enzymage. Il existe différents traitements de surface pour les fibres de carbone.

**Tableau II.3 :** Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone [15]

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM	Fibres IM
Résistance en traction (MPa)	3400-4500	2000-2500	4800
Module en traction (GPa)	230-250	390-450	296
Allongement à la rupture (%)	1.4-1.8	0.5-0.6	2
Résistance en compression(MPa)	2200-2800	1300-1700	-

Les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 à 24000 filaments, de fibres coupées, de rubans ou bien encore de tissus, qu'ils soient uni ou multidirectionnels. Elles présentent des caractéristiques spécifiques élevées comme leur haut module en traction. Elles ont également un coefficient de dilatation très faible, une conductivité thermique élevée. En revanche, certains inconvénients demeurent comme leur résistance limitée aux chocs, une faible résistance à l'abrasion.

### **II.A.2. 3. L'interface**

L'utilisation d'une couche interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Qui se forme spontanément lorsque deux phases sont mises en présence l'un de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau, l'interface n'est pas simplement une simple discontinuité entre les deux phases du matériau hétérogène ou leur juxtaposition [18].

### **II.A.3. Classification des matériaux composites**

Actuellement il existe un grand nombre de matériaux composites qui peuvent être classés suivant la nature ou la forme de ces constituants.

#### **II.A.3.1 Classement suivant la nature des constituants**

Selon la nature de la matrice, on a :

##### **II.A.3.1.1 Les composites à matrice organique**

Ce type de matrices sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, une grande déformation à rupture et un faible poids, exemple : polymères ou résines organiques, ces composites occupent actuellement une grande place dans le domaine industrielle [19,20] et peuvent être divisés en deux grandes catégories :

##### **II.A.1.1. a. Les thermoplastiques**

Les polymères thermoplastiques sont linéaires ou ramifiés, et ils possèdent la propriété de passer de façon réversible, sous l'effet de la chaleur de l'état solide à l'état ramolli et devient malléable, leurs recyclage constitue l'un des grands avantages qui prend une grande importance de nos jours [21]. Les plus souvent utilisés sont: le polychlorure de vinyle pour la fabrication des tuyauteries, le polyéthylène pour les sacs de supermarchés et bouteilles, etc [22].

##### **II.A.3.1.1.b. Les thermodurcissables**

Les polymères thermodurcissables sont réticulés et sous l'effet de la chaleur ils passent de l'état liquide à l'état solide infusible et ne peuvent plus fondre (irréversible) [21], une nouvelle hausse de température mènerait à une destruction du polymère, mais ils présentent l'avantage

de posséder des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevés [21], les plus connus sont les polyesters insaturés, les résines époxydes, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques), etc. [22]

#### **II.A.3.1.2 Les composites à matrice métallique**

Les composites à matrice métallique ont des propriétés mécaniques meilleures ou plus adaptables aux changements, ils sont généralement utilisés dans les moteurs d'automobile. La matrice peut être en Aluminium, Magnésium ou bien Titane.[19.20]

#### **II.A.3.1.3 Les composites à matrice minérale : (céramique)**

Ces composites sont utilisés dans des environnements sévères à hautes températures, par exemple les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz.[19.20]

#### **II.A.3.2 Classement suivant la forme des constituants**

Selon la morphologie des renforts les composites peuvent être divisés en quatre catégories[19,20] :

##### **II.A.3.2.1 Composites à renforts de particules**

Les particules ne possèdent pas de dimensions privilégiées et sont petites devant les autres dimensions du système, leur utilisation apportent aux matériaux composites de la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, etc.

##### **II.A.3.2.2 Composites à renforts de paillettes**

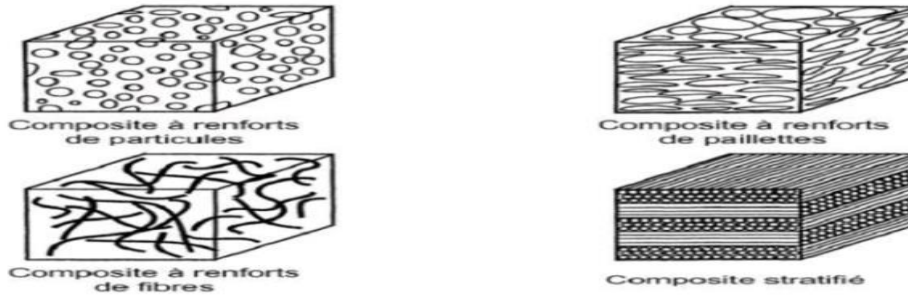
Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions du matériau, leurs arrangements parallèles confèrent des propriétés plus uniformes au matériau par rapport aux arrangements aléatoires.

##### **II.A.3.2.3 Composites à renforts de fibres**

Les fibres utilisées se présentent soit sous la forme de fibres continues ou bien discontinues, leur arrangement et orientation influent les propriétés mécaniques des matériaux composites (anisotrope, isotrope).

#### II.A.3.2.4 Composites stratifiés

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériaux empilés selon différentes orientations.



**Figure II.4 :** Classification des matériaux composites selon la forme des constituants [19].

#### II.A.4. Charges et additifs

Au sein de la matrice on incorpore des différents produits en quantités variables pour lui conférer des bonnes nouvelles caractéristiques particulières sans affecter sa structure moléculaire de base, comme même pour lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques.

Les charges et les additifs jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, ainsi que pour faciliter la mise en œuvre.

##### II.A.4. 1. Les charges

Les charges sont des particules solides non miscibles ajoutées en quelques dizaines de % à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les caractéristiques mécaniques, électriques ou thermiques, d'amélioration l'aspect de surface ou bien de réduire le prix de revient du matériau transformé, comme le montre dans la figure (I.6):

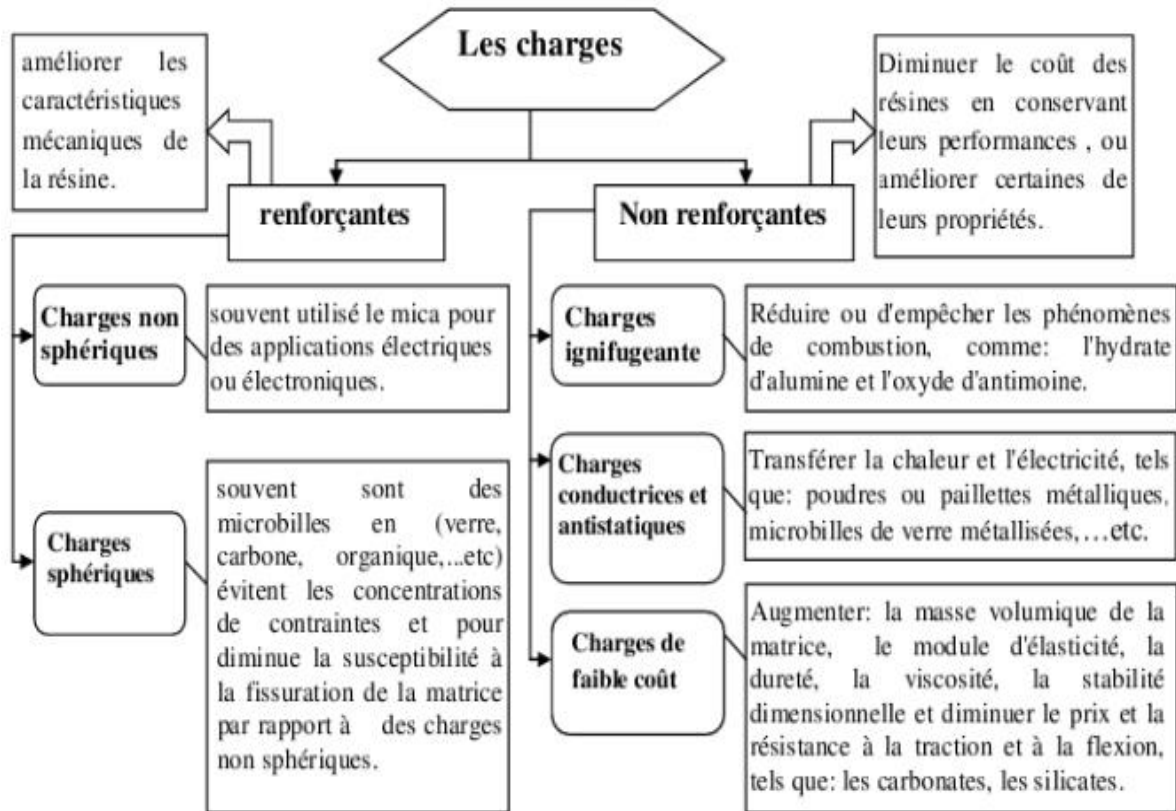


Figure .II.5 : Les types de charges.

#### II.A.4. 2. Les additifs

La Commission européenne définit les additifs comme des substances incorporées dans les résines pour obtenir un effet technique sur le produit fini et de meilleure performance lorsqu'il est utilisé [24], ces substances sont ajoutées en faible quantité de quelques % et moins, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique en machine de transformation, ou bien d'assurer une adhérence adéquate entre le renforcement et la matrice. Suivant les cas, on ajoute généralement: des lubrifiants et agents de démoulage, des pigments et colorants, des agents anti-retraits, des agents anti-ultraviolets, des accélérateurs, des catalyseurs,...etc. [23, 25].

#### II.A.5. Avantages et inconvénients des composites

##### II.A.5.1. Avantages

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

- Légèreté.
- Rigidité.

- Bonne résistance à la fatigue et aussi à la corrosion.
- Insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Possibilité de concevoir le matériau selon le besoin (pour les sandwichs et les stratifiés), d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

#### **II.A.5.2. Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion**

- La sensibilité à la chaleur.
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- Le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité [26, 27].

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [26].

#### **II.A.6. Structure du composite**

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

##### **II.A.6.1 Les monocouches**

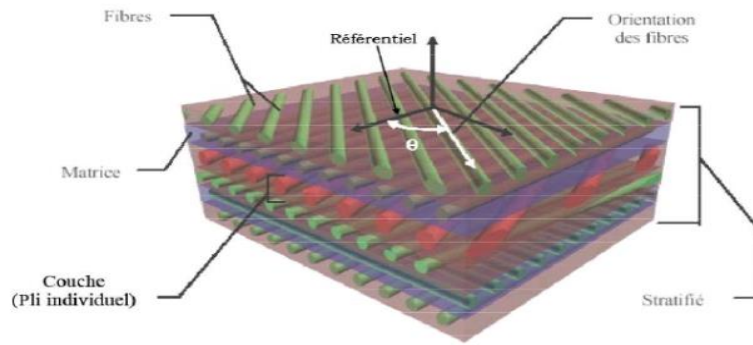
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



**Figure II.6 :** composite monocouche

##### **II.A.6.2 Les stratifiées**

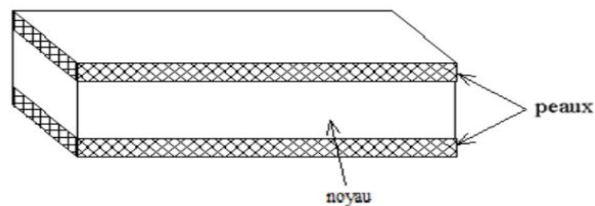
Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques [28].



**Figure II.7** : composite stratifié [29]

### II.A.6.3 Les sandwichs

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau (Fig.14)



**Figure II.8** : Composite sandwichs

Les propriétés de ce type de matériaux dépendent de celles du noyau et des peaux, de leurs épaisseurs et des caractéristiques de liaison entre elles.

#### II.A.6.3. Le noyau

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

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

#### II.A.6.3. 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 [28].

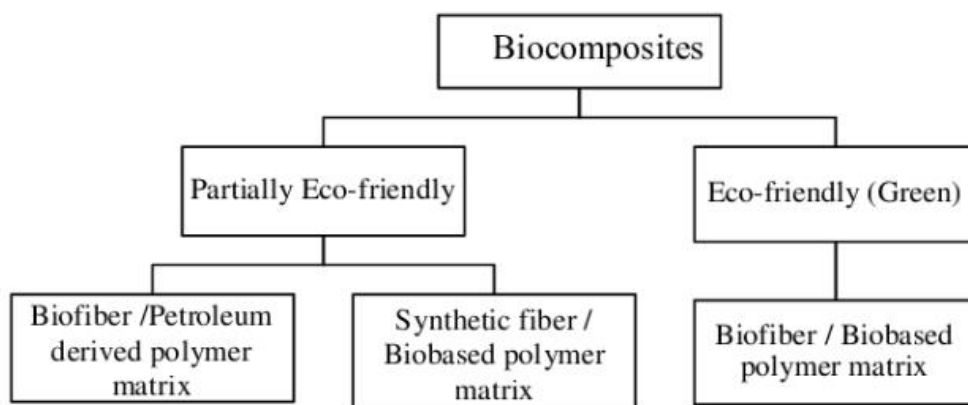
## II.B. Les biocomposites

### II.B.1.Définition

Dans nos jours, l'utilisation des ressources renouvelables dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente, exigeantes et étudiées, en raison de leurs importance économique, environnementale et mécanique, et leur larges applications, sont des matériaux aux appellations diverses (bio composite, biodégradable, biocompatible, etc.) [31].

Un biocomposite est un matériau composite dont l'une des parties au moins, renfort ou matrice, est issue de ressources renouvelables, tels que des renforcements de fibres naturelles ou des bio polymères.

Les biocomposites présentent différents niveaux de respect de l'environnement en fonction de leurs matériaux constitutifs et de leur biodégradabilité. La Figure (I.15) présente un schéma de ces catégories de biocomposites d'après la définition actuelle. Selon le type de polymère utilisé, ces composites peuvent également être entièrement biodégradables, suggérant ainsi le plus haut niveau d'avantages économiques et environnementaux [32].



**Figure II.9 :** Classification des biocomposites.

Les biocomposites ayant des propriétés mécaniques élevées sont la cible de nombreux efforts de recherche, Cependant, l'état immature des biopolymères, la variabilité des

propriétés des fibres et les difficultés de traitement des composites ont limité leurs performances, empêchant ainsi leur capacité à concurrencer les matériaux composites synthétiques traditionnels. Néanmoins, l'avantage évident des biocomposites du point de vue environnementale a encouragé de nouveaux efforts pour développer de nouveaux matériaux, ainsi que pour caractériser et améliorer les propriétés des matériaux biocomposites actuellement développés. Il est prévu qu'une industrie des biocomposites performante, respectueuse de l'environnement et économiquement stable soit possible avec de tels progrès continus [33].

### II.B.2. Constituants

Un biocomposite est comme un composite, il est constitué d'une matrice et d'un renfort. Le concept de matériau composite, par le choix des constituants et de leurs proportions respectives, ainsi que par le choix de la forme, des dimensions et de la disposition des renforts, permet donc de concevoir un matériau présentant les caractéristiques spécifiques recherchées.

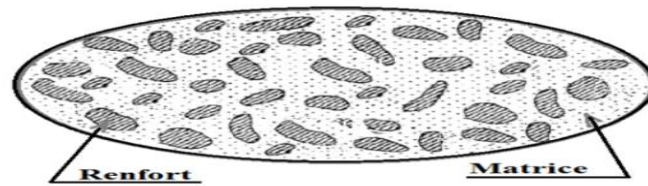


Figure II.10 : Constituants d'un matériau composite [39].

#### II.B.2.1. Matrice

La matrice maintient le renfort, le protège des agressions extérieures, donnant la forme désiré au matériau et assure les transferts de charge [40]. La classification des types de matrices couramment rencontrée est donnée sur la figure IV.2

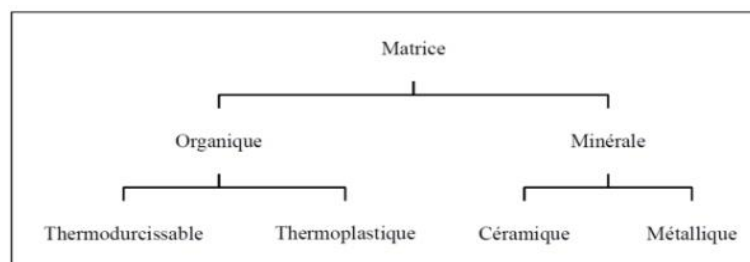


Figure II.11: Types de matrice.

### **II.B.2.1.a. Les thermoplastiques**

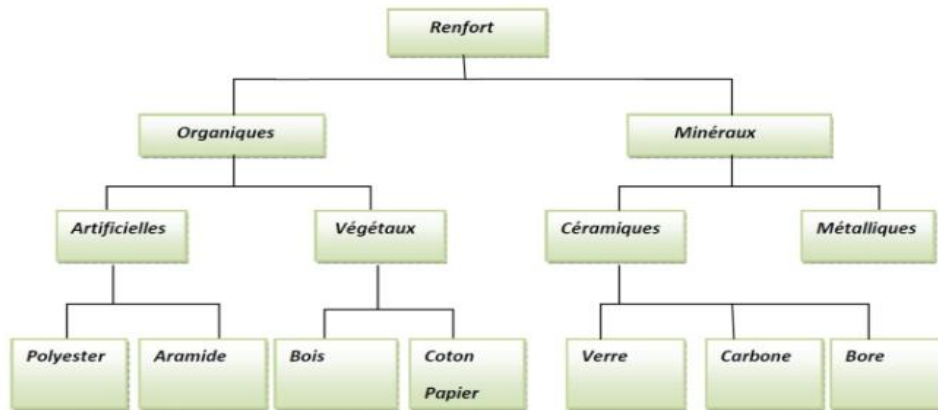
Les thermoplastiques (TP) sont des macromolécules généralement solubles, linéaires ou légèrement ramifiées, amorphes ou semi cristallins, recyclables et fusibles à haute température. Le thermoplastique représente le plus grand tonnage en terme de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Les résines thermoplastiques les plus courantes sont : le polystyrène (PS), le polyéthylène (PE), le polyéthylène téréphthalate (PET), le polypropylène (pp)... [42]. Leur recyclabilité et leur thermo-réversibilité constituent l'un des grands avantages qui prend de plus en plus d'importance de nos jours [43].

### **II.B.2.1.b. Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables (TD) sont des polymères qui ont la forme d'un réseau tridimensionnel et qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques [44]. Ils se présentent sous forme liquide visqueux et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification. Ils sont infusibles, donc non recyclable. Les plus connus sont les polyesters insaturés, les résines époxydes, les résines phénoliques, les aminoplastes,...etc.) [43].

### **II.B.2.2. Le renfort**

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques, il contribue à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [39]. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût [45]. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses (figure I.3).



**Figure II.12:** Différents types de renforts [46].

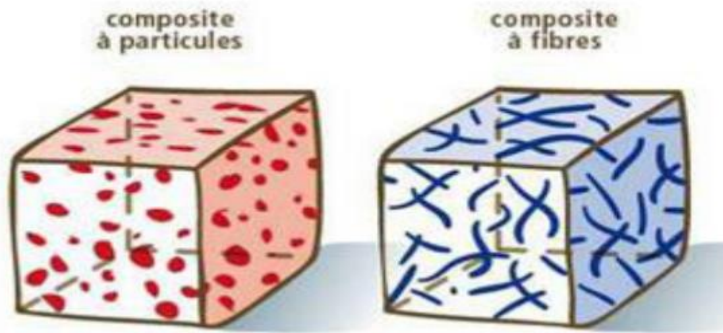
Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont fortement influencées par la nature des fibres et la forme du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles [47].

#### **II.B.2.2.a. Composites à fibres**

Un composite à fibres est un composite dans lequel le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler les propriétés mécaniques et d'obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

#### **II.B.2.2.b. Composites à particules**

Un composite à particules est un composite dans lequel le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait.



**Figure II.13:** Représentation d'un composite à particules et à fibres.

### II.B.3. Les charges

Le problème majeur que rencontre le renforcement des polymères par les renforts naturels est la mauvaise adhésion entre les deux phases. Cela est dû au comportement hydrophile des fibres. Afin d'améliorer l'adhésion entre les renforts végétaux et la matrice, une diminution de l'hydrophilie des fibres est requise. Cette diminution peut être réalisée à travers un traitement chimique de la surface des fibres naturelles ou par l'utilisation des agents de compatibilité. Parmi les agents de compatibilité qui ont été utilisés pour ces fins, on peut citer l'anhydride maléique greffé Polypropylène (MAPP), le poly diphenylmethane diisocyanate (pMDI). L'ajout des renforts pour les matrices polymères engendre la diminution de certaines propriétés mécaniques de la matrice comme la résistance à l'impact. Ce phénomène est cité dans plusieurs travaux dans la littérature. Afin d'améliorer la résistance au choc du composite, plusieurs chercheurs ont eu recours à l'utilisation des élastomères avec la matrice. Parmi ces élastomères, on trouve les polyoléfines élastomères (POE) et l'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM). Cependant, l'utilisation du POE dans les composites diminue la rigidité de la matrice.

### II.B.4. Domaine d'application

L'industrie des biocomposites renforcés avec les fibres naturelles a connu une croissance continue en raison des progrès technologiques et des applications accrues pour ces matériaux, leur utilisation s'inscrit dans une démarche d'éco-conception. Le développement de granulés thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles végétales est utilisé dans des différents domaines (cosmétique, automobile, horticulture, électroménager, mobilier urbain, outillage...) [31], Les figures (II.13) à (I.20) montrent quelques ces applications.

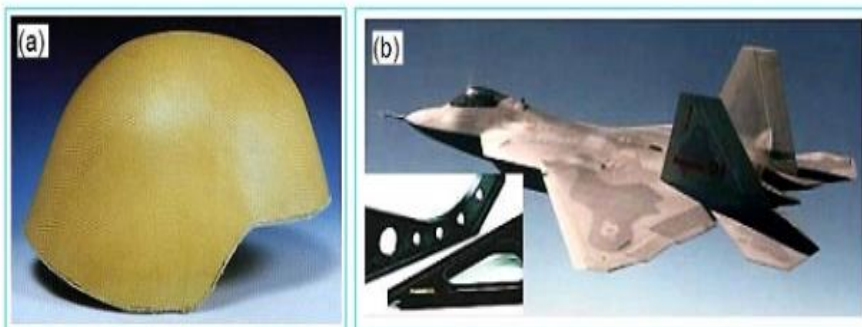


**Figure II.14 :** Conception et applications innovantes des biocomposites en fibres de bambou dans : - (a) l'aéroport Adolfo-Suárez de Madrid-Barajas.

- (b) Parking garage (Zoo de Leipzig, Allemagne) [35].



**Figure II.15:** Applications de plastiques renforcés de fibres naturelles dans les produits de construction [32].



**Figure II.16 :** Application des composites à fibres naturelles dans le secteur militaire.

- (a) Casque militaire léger à base de composite renforcé avec des fibres naturelles et
- (b) pièces structurales de l'avion de chasse de Lockheed Martin 'F-22 Raptor' fabriqué avec des composites renforcés avec des fibres naturelles [37].



**Figure II.17 :** Composites thermoplastiques renforcés avec les fibres de bambou [35].



**Figure II.18 :** Quelques applications de fibres naturelles dans le domaine de l'automobile [38].

## CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelque généralité sur les matériaux composites et biocomposites. Premièrement on a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites, leurs propriétés physiques et mécaniques, le mode de fabrication des pièces en matériaux composites tel que le moulage, leur utilisation dans le secteur industriel tel que l'automobile, le sport et l'aéronautique...etc. Par ailleurs, nous avons décrit les différents types de matériaux et résines les plus utilisées dans l'industrie.

# **CHAPITRE III :**

# **Matériaux et**

# **Techniques**

### III.1 INTRODUCTION

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.



**Figure III.1** : schéma du sisal.

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. [48]

#### III.A Fibres de sisal

##### III.A.1. Le Sisal

Le sisal est issu de l'*Agave sisalana*, originaire de la péninsule du Yucatan, au Mexique (une autre agave mexicain, *A. fourcroydes*, produit une fibre similaire, l'henequen) [52], le Sisal

tolère la sécheresse prolongée et les températures élevées également. Le sisal, dont les fibres peuvent mesurer 1 mètre de longueur, est qualifié de fibre dure impropre à la fabrication de vêtements et de tapisseries. Les ficelles et les cordes étaient autrefois en sisal, mais la concurrence croissante des matières synthétiques, notamment le polypropylène, a fait chuter la demande. D'autres débouchés voient le jour; aujourd'hui il sert surtout à fabriquer du papier, des filtres, des géotextiles, des matelas, des tapis et des revêtements de murs. Il est de plus en plus utilisé pour renforcer les matériaux composites, en particulier les composants de l'automobile. Les produits dérivés du sisal entrent dans la composition de biogaz, d'ingrédients pharmaceutiques et de matériaux de construction [53]. Presque 4,5 millions de tonnes de fibre de sisal sont produits chaque année dans le monde entier. La Tanzanie et le Brésil sont les deux pays producteurs principaux (Tableau III.1).

**Tableau III.1** Bulletin statistique de la production du sisal au monde [54].

<b>Production de Sisal — 2007</b>	
<b>(China 2006) (thousands of tonnes)</b>	
Brésil	113.3
Tanzanie	36.9
République Populaire de Chine	34.0
Kenya	27.6
Madagascar	9.1
Haïti	2.2
Soude Afrique	1.6
<b>World Total</b>	<b>240.7</b>

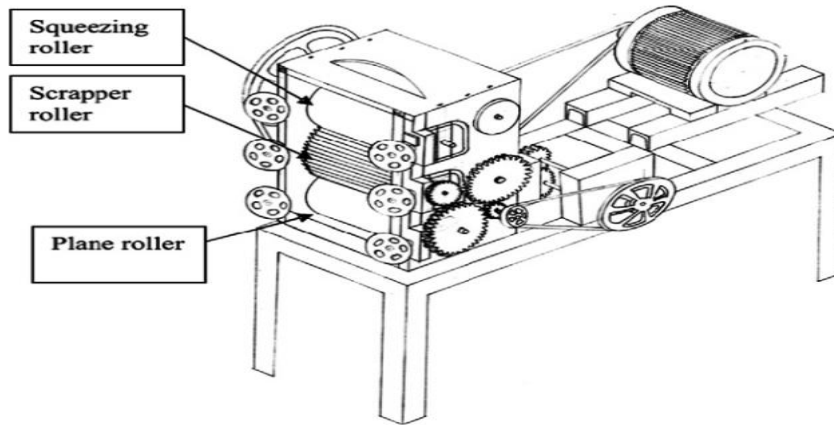
Le renfort de sisal peut être employé en tant que fibres distribuées au hasard, longues fibres installées, ou comme tissu de fibre. Des fibres de sisal sont extraites à partir des lames de plante de sisal (Figure III.4a) sous forme de longs faisceaux de fibres [55].

Les méthodes d'extractions des fibres de sisal ont été décrites et étudiées par Chand et al [56] et Mukherjee et Stayanarayana [57]. Les méthodes incluent (1) l'eau rouissant suivi du grattement figure.III.4 et (2) le moyen mécanique utilisant les décortiqueuses mécaniques industrielles figure III.5 [58]. La décortiqueuse est une machine qui se compose d'une paire de rouleaux de départ et d'un batteur. Les lames ont été introduites dans le batteur par les

rouleaux de départ et entre le rouleau de serrage et un rouleau scraper. Les fibres ont été extraites, et les pulpes ont été séparées. Les fibres décortiquées ont été séchées au soleil pour retirer la teneur en eau [58].



**Figure.III.2 :** Extraction des fibres de sisal : **(a)** photos de la plante de sisal naturelle **(b)** lames de sisal attachement des lames dans des sacs et plongé dans l'eau d'un ruisseau pendant 3-4 jours, **(c)** retirent de la partie supérieure des lames, **(d)** séchage au soleil, et **(e)** la forme finale des fibres de sisal [55].



**Figure.III.3** : Schéma de principe d'une machine mécanique à décortiquer [58].

### III.A.2 Historique du sisal à Madagascar [49]

Le « taretra » ou variété locale d'aloès est utilisé depuis les anciens temps par les Malgaches pour fabriquer des ficelles, cordes, cordages, nattes, tapis. Son emploi nécessite un rouissage préalable et les procédés sont restés au stade artisanal.

Largement répandu sur les hautes terres, il sert de matière pour la confection des objets traditionnels précédemment cités, mais également pour les sacs, jouets, figurines, multiples objets de vannerie. L'agave *Rigida sisalana* est la seule espèce cultivée à l'échelle industrielle. Les premières plantations ont été établies vers 1928 au Nord de l'île près de Diego-Suarez et au Nord-Ouest près de Marovoay, le long du fleuve Betsiboka. Quelques années plus tard, les premières exploitations furent installées dans le Sud-Ouest près de Tuléar et vers 1935, dans le Sud-Est à Ranopiso, à 30 km environ du centre actuel de l'industrie sisalière, Amboasary, et à 70 km environ de son port, Fort-Dauphin. Vers 1939, la production du sisal de Madagascar totalisait quelques 2500t, entièrement exportées, pour laquelle en chiffre ronds, les régions de Diego-Suarez, Ranopiso et Majunga, fournissaient 500 t chacune, et Tuléar 1000 t.

La production autour de Diego-Suarez a cessé en 1953, quand la chute des prix postérieure aux événements de Corée se joignit aux difficultés qu'il y avait à cultiver du sisal sur des sols pauvres et avec une main d'œuvre insuffisante. La production autour de Majunga cessa une année plus tard, en raison des mêmes difficultés de prix et de main d'œuvre, et aussi parce que le coton s'avérait une culture beaucoup plus rentable pour les bonnes terres sur lesquelles venait le sisal. Autour de Tuléar, la production atteignit 1300t par an, pendant la période de sécheresse, vers 1955-1956, mais les nouvelles possibilités d'irrigation amenèrent une rapide

conversion dans d'autres cultures, et la production de la majorité des exploitations se termina en 1957.

Finalement, l'industrie sisalière malagasy s'installa dans la vallée du Mandrare, sur la rive droite du fleuve, entre la mer et Amboasary, et plus tard, en amont sur la rive gauche, jusqu'à Ifotaka. Cette culture put s'implanter solidement dans cette partie du pays à cause de la présence d'une main d'œuvre abondante, n'ayant guère de travail rémunérateur, constituée par l'ethnie locale des Antandroy, à cause également des facilités d'écoulement offertes par la proximité du port de Fort-Dauphin, d'une pluviométrie suffisante pour le sisal, alors qu'elle l'est peu pour d'autres cultures. En effet, le milieu naturel assez particulier, limite la gamme des produits susceptibles d'être mis en valeur à grande échelle, à moins de gros investissements (irrigation, etc).

### **III.A. 3. La culture**

Le sisal qui est une plante résistante 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. 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 [50].

### **III.A.4 Domaine d'utilisation des fibres de sisal**

#### **III.A. 4. 1. Les principales utilisations :**

Les fibres de sisal sont utilisées principalement dans la fabrication de cordes naturelles, ficelle, moquette, qui peuvent être utilisés pour fabriquer des tapis, des nattes et divers produits artisanaux. Les fibres peuvent être utilisées également dans les matières textiles comme les filets, les tapis (les tapis de sol d'automobile). Le sisal sert souvent à fabriquer les chiffons de polissage car il est assez solide pour polir l'acier et suffisamment doux pour ne pas le rayer. Mais elles sont également utilisées comme une fibre de renforcement de matériaux composites, les fibres de sisal sont de plus en plus souvent utilisées dans les matériaux composites. Les fibres de sisal peuvent être utilisées en substitut ou en complément de la fibre de verre employée pour renforcer le plastique dans les automobiles, les bateaux, les tuyaux et les réservoirs d'eau. Elles peuvent aussi renforcer les mélanges de ciment pour la

construction des logements à bas coûts et remplacer l'amiante dans les toitures et les plaquettes de freins. Du fait de sa faible densité et de ses bonnes propriétés de soudage, le sisal recèle un intéressant potentiel pour le renforcement des composites polymères : les thermoplastiques et les thermodurcissables. On le retrouve également dans les produits de papier. En effet, la biomasse du sisal contient une forte proportion de cellulose et sa cellulose et sa pulpe peut donc être utilisée comme substitut de la fibre de bois pour épaissir le papier et le carton. Ses qualités d'absorption et sa résistance au pliage en font un intrant de qualité pour les produits de papier. Compte tenu de sa porosité, il peut notamment être utilisé dans les filtres des cigarettes et les sachets de thé [55].

### **III.A. 4. 2. Les autres utilisations :**

Les sous-produits de l'extraction du sisal peuvent être utilisés pour fabriquer du biogaz, des ingrédients pharmaceutiques et du matériel de construction. La biomasse restant après le défibrage, qui peut représenter jusqu'à 98 % de la plante, est rarement utilisée. Afin de valoriser économiquement ces résidus, qui représentent quelque 15 millions de tonnes par an, le Fonds commun pour les produits de base et l'industrie tanzanienne du sisal ont créé la première usine de traitement des résidus du sisal pour produire du biogaz, de l'électricité et des engrais. L'évaluation actuelle de l'usine indique que 75 % de l'énergie produite pourrait être distribuée aux foyers ruraux et 25% utilisée pour transformer le sisal. Les déchets issus du décorticage c'est-à-dire le jus de sisal, les particules des tissus parenchymateux sont broyés et les fragments de feuilles et de fibres peuvent être utilisés comme engrais ou aliments pour animaux. Enfin, le jus de la plante entre dans la composition de produits pharmaceutiques tels que l'hécogénine et l'inuline.

### **III.A. 5. La production du sisal dans le monde :**

Le sisal est cultivé pour sa fibre dans plusieurs pays: Afrique du Sud, Angola, Brésil, Chine, Cuba, Haïti, Indonésie, Kenya, Madagascar, Mozambique, Mexique, Tanzanie et Thaïlande. Les modes de production varient d'un pays à l'autre. En Tanzanie et au Kenya, le sisal est essentiellement une culture de plantation, tandis qu'au Brésil, il est surtout cultivé artisanalement. La production mondiale de sisal est estimée à 300 000 tonnes, soit une valeur de 75 millions de dollars. Les principaux producteurs sont :

- **le Brésil avec une production de 120 000 t par an, dont une exportation de près de 100000 t de fibres brutes et de produits manufacturés .**

- **la Tanzanie avec une production de 30 000 t avec la moitié dédiée à l'export.**
- **le Kenya a une production de 25 000 t, avec 20 000 t étant exportées.**

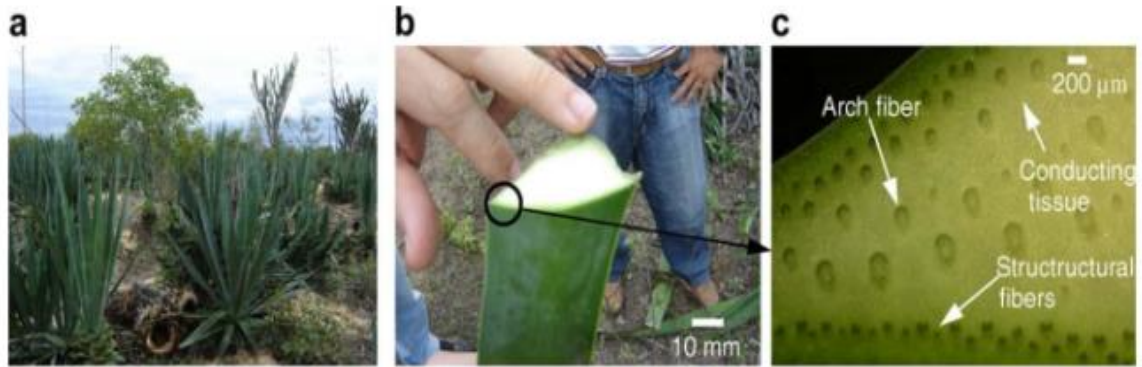
Par rapport à ces quantités des principaux pays producteurs, la production de Madagascar atteint à peine 10 000 t/an [51].

### **III.A.6 Morphologie**

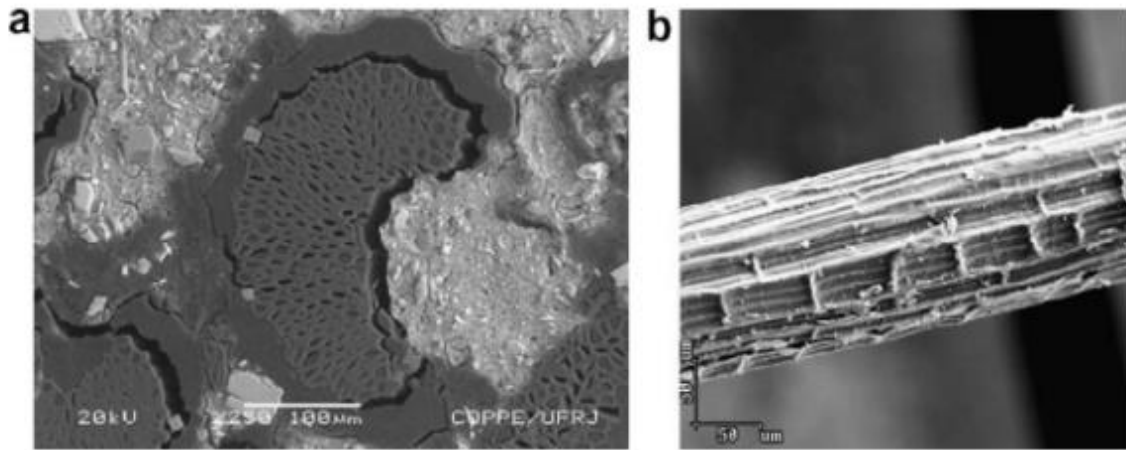
Les fibres de sisal sont extraites à partir des lames de plante de sisal sous forme de longs faisceaux de fibres appelés les fibres techniques. Une plante de sisal produit environ 200 à 250 lames avant la floraison [59]. Chacune d'elles contient approximativement 700-1400 faisceaux de fibres avec une longueur de 0.5-1.0 m [60]. La lame de sisal est une structure sandwich composée de 4 % de fibre, de 0,75 % cuticle, 8 % matière sèche et 87,25 % d'eau [59]. Trois types de fibres renforcent la lame : structural, Arch (voûte) et xylème. Les fibres structurales donnent à la lame de sisal sa dureté et elles se trouvent dans la périphérie de la lame (voir la Figure I.3b et c). Elles présentent rarement une section transversale de forme circulaire et habituellement la surface est en forme approximative d'une chaussure de cheval (Figure II. 4).

Le diamètre équivalent des fibres est environ 200  $\mu\text{m}$ . Les fibres structurales sont importantes parce qu'elles ne se divisent presque jamais pendant le procédé d'extraction. Les fibres de voûte se développent en association avec les tissus de conduite de la plante (Figure II.5) et sont habituellement trouvées au milieu de la lame (Figure II.4c). Les fibres d'xylème se développent vis-à-vis des fibres de voûte et sont branchées à elles par des tissus de conduite.

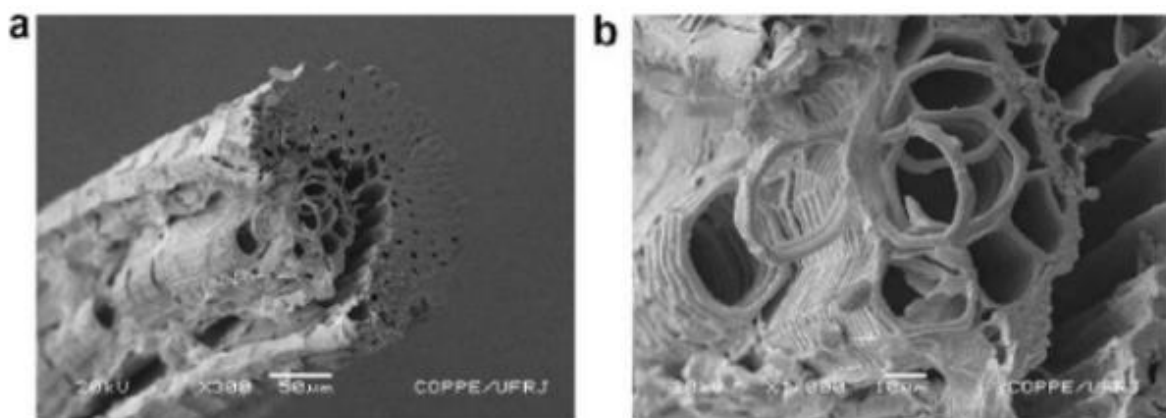
Ces fibres se composent de cellules à parois minces, et sont détruites pendant le procédé d'extraction de la fibre 5 [61].



**Figure.III.4 :** Le sisal (a) la plante, (b) vue en coupe de la lame, et (c) vue au microscope d'une région sélectionnée en (b) [61].

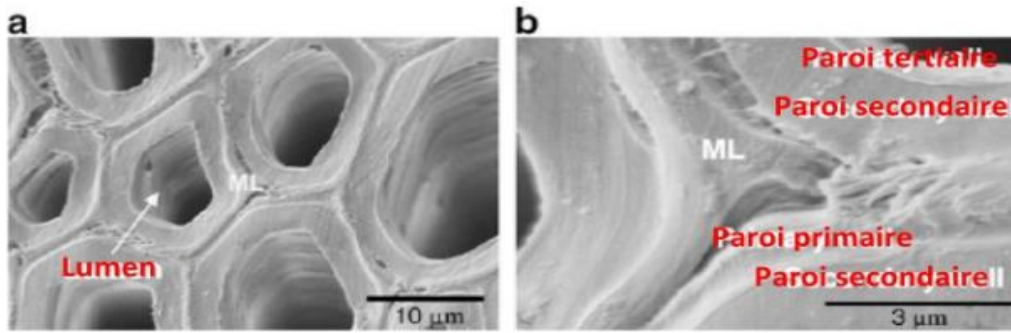


**Figure.III.5 :** Géométrie structurale de la fibre : (a) forme d'un fer à cheval ; (b) surface approximative [62].



**Figure III.6 :** Morphologie de Arch. fibre: (a) Arch. fibre liée à ses tissus de conduite ;

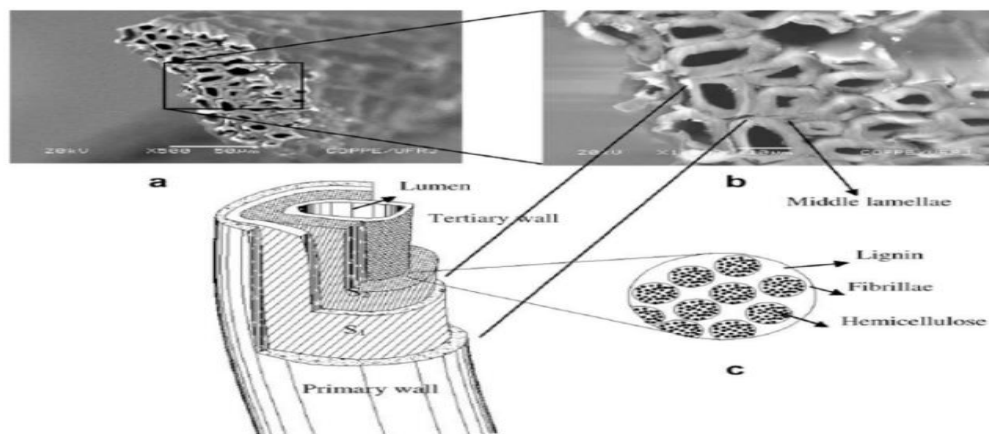
(b) détail de conduites du tissu [62].



**Figure III.7** : Aperçu microstructural de fibre de sisal : (a) cellules de fibre avec le lumen et les lamelles moyennes (b) détail de ML et des murs de la cellule [61].

Il est intéressant de noter que la fibre de sisal a une structure hiérarchisée. Chaque fibre contient de nombreuses différentes cellules de fibre, d'un diamètre environ 6-30 µm [59]. Chaque cellule de fibre se compose de quatre majeures parties, à savoir la paroi primaire, la paroi secondaire épaisse, la paroi tertiaire, et le lumen (Figure III.10). Les cellules de fibre sont jointes ensemble au moyen des lamelles moyennes (ML), qui se composent d'hémicellulose et de la lignine (Figure III.10). Le lumen varie dans la taille mais il est habituellement bien défini. Les parois se composent de plusieurs couches de fibrilles se composants de structure fibrillaire qui sont joints ensemble par la lignine. Dans la paroi primaire, les fibrillés ont une structure réticulée, alors que dans la paroi secondaire extérieure les fibrillés sont arrangés dans les spirales. La paroi tertiaire mince, la plus secrets a une structure fibrillaire parallèle et joint le lumen. Les fibrilles sont à leurs tours construits de micro-fibrilles avec une épaisseur environ 20 nm. Les micro-fibrilles se composent de réseaux de cellulose avec une épaisseur d'environ 0.7 nm et d'une longueur de quelques micromètres et sont joints ensemble au moyen d'hémicellulose [63].

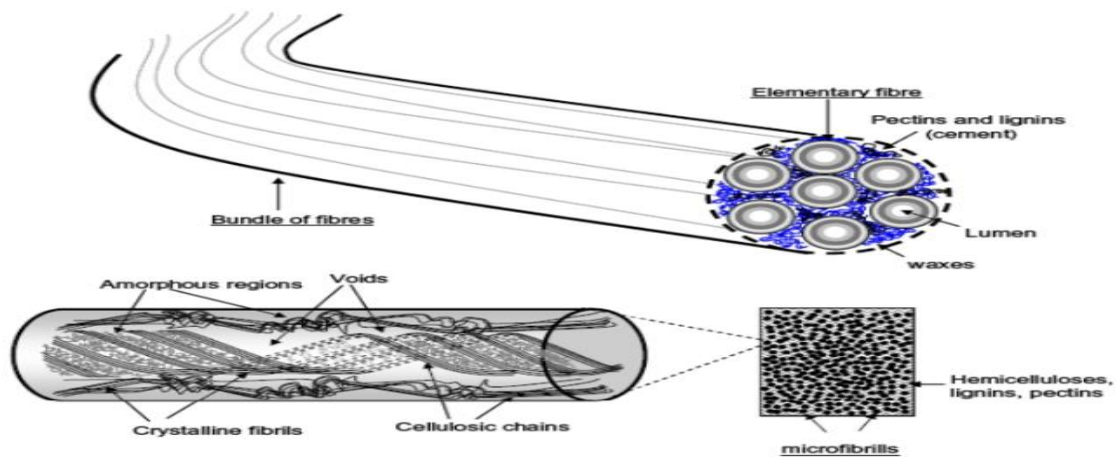
Les fibrilles sont assemblées dans des plusieurs couches pour accumuler la structure de la fibre. Les fibres sont collées ensemble dans la plante par la lignine, pectines, les hémicelluloses qui peuvent être dissoutes dans des conditions alcalines. Les cires dues aux acides gras sont également des composantes de la fibre qui peuvent être trouvées à la surface. La Figure III.11 a, b montres des photographies MEB (microscope à balayage électronique) des faisceaux de fibres [62].



**Figure III.8 :** Microstructure d'une cellule de fibre : (a) vue en coupe montrant les cellules de fibre, les lumens et les lamelles moyennes ; (b) un zoom sur la section transversale et (c) schéma montrant les différentes couches d'une cellule de fibre individuelle.

### III.A.7 Composition chimique

Chimiquement les fibres de sisal contiennent (~70%) de cellulose, (~12%) d'hémicelluloses, (~10%) de lignine et une petite quantité de la pectine, des cires et de la graisse (~2%). La cellulose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> est un polysaccharide linéaire polymère constitué par le monosaccharide de glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) [64]. Le degré de polymérisation de cellulose dans la fibre de sisal est environ 25000 et pour cette raison il y aura peu de réseau à l'extrémité pour perturber l'agencement cristallin [63]. L'hémicellulose sont les polysaccharides et les poly-uranides isotropes à courtes chaînes amorphes, souvent des sucres très assimilés, par exemple galactose et mannose rarement si toujours cristallin [64]. L'hémicellulose de polysaccharide sont chimiquement jointes ou en partie mélangées et installées avec des molécules de cellulose. Les hémicelluloses présentent un degré de polymérisation relativement inférieur et sont solubles en alcalis. Selon Gram [63] l'hémicellulose se produit principalement dans la paroi primaire et leur degré de polymérisation dans les fibres de sisal est entre 50 et 200. La lignine est isotrope et non cristalline à chaîne courte composée des éléments du phenylpropane, on la trouve dans la lamelle moyenne de la fibre et dans les parois des fibrilles [67]. Environ 25% de toute la lignine doit être trouvée dans la lamelle moyenne. Puisque la lamelle moyenne est très mince, la concentration de la lignine est également élevée (~70%). Leur degré de polymérisation est 60 [65]. Selon Gram [63], Velpari et al [66] la lignine peut être décomposée à l'extérieur dans un environnement alcalin. Un schéma de principe d'une structure ligne-cellulosique de fibre d'agave est donné dans la Figure III.12.



**Figure III.9 :** Diagramme schématique de la structure ligne-cellulosique de fibre d'Agave (Agave Americana) [67].

## III.B. Polyéthylène

### III.B.1 Définition

Formule moléculaire :  $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$

C'est en 1963 que l'on réussit pour la première fois à obtenir un polyéthylène solide par polymérisation directe de l'éthylène sous haute pression. La majeure partie du polyéthylène produit industriellement est aujourd'hui encore fabriquée d'après le même procédé. On découvrit plus tard de nouveaux procédés permettant la polymérisation sous basse pression au moyen de catalyseur d'un nouveau type.

En 2008, la quantité produite de plastiques synthétiques a été de 245 millions de tonnes. Le polyéthylène à lui seul représente un quart de cette production en raison de son faible coût de fabrication et de ses bonnes propriétés physiques et mécaniques. De plus ce polymère permet une mise en forme généralement aisée telle que l'extrusion ou l'injection. Il possède également d'excellentes propriétés d'isolation électrique et de résistance aux chocs et présente une grande inertie chimique et biologique (contact alimentaire).

Le polyéthylène ou polythène est un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique inerte, sous forme de granulés. Son nom vient du fait qu'il est le polymère obtenu par polymérisation des monomères d'éthylène gazeux. La combustion du PE ne présente pas des produits toxiques [69].

Par définition le polyéthylène est un hydrocarbure : ces molécules sont constituées par des chaînes d'atomes de carbone dont les valences libres sont saturées par des atomes d'hydrogènes

- Le procédé pression primitif fournit un polyéthylène à chaînes ramifiées.
- Le procédé basse pression fournissent des polyéthylènes à peine ramifiées, c'est – à dire a structure essentiellement linéaire.

Le tassement des molécules dépend du degré de ramification. Les chaînes ramifiées ne permettent pas d'obtenir la même capacité que les chaînes non ramifiées. Par conséquent, le polyéthylène ramifié est de densité faible ou moyenne et le polyéthylène linéaire est caractérisé par une densité élevée.

Polyéthylène est un nom générique utilisé afin de décrire les polyoléfines issues de la polymérisation de l'éthylène. Ce sont probablement les polymères les plus couramment utilisés, en effet ils sont employés pour la fabrication des sacs plastiques, des bouteilles d'emballage et de certains jouets. Il en existe de nombreux types mais ceux-ci sont généralement classés dans deux grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- polyéthylènes basse densité ou PE-BD :  $0,92 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,94 \text{ g/cm}^3$ .
- polyéthylènes haute densité ou PE-HD :  $0,95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$  [68].

### **III.B.2 Caractéristiques générales des polyéthylènes [70]**

La température de fusion des zones cristallines les mieux formées se situe à 135 °C. Les séquences non cristallisées subissent le phénomène de transition vitreuse à ~ -110 °C. Cette transition (dite « $\gamma$ ») correspond au mouvement de courtes séquences (3 à 4 groupe méthylène) et est observée dans tous les types de PE. On admet que le PE présente une seconde transition à ~ -20 °C (transition « $\beta$ ») qui est liée au mouvement de segments plus longs et qui n'est pratiquement pas décelable dans les polymères des cristallinité élevée. Le taux de cristallinité des polyéthylènes est étroitement dépendant de leur structure ; il peut varier de 30 % à 70 % selon que la proportion des ramifications (ou celle du comonomères) est élevée ou faible.

Un cas particulier est celui des PE linéaire de très forte masse molaire ( $M_w > 3.106 \text{ g.mol}^{-1}$ ) dont la cristallisation peut être partiellement inhibée ( $d = \sim 0.94$ ), non par la proportion des branches, qui est faible, mais par la viscosité très élevée du milieu. La forte densité d'énergie cohésive des zones cristallines est responsable de la faible solubilité du polyéthylène : il est insoluble dans tous les solvants à la température ambiante et n'est soluble, à haute température ( $T > 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que dans certains hydrocarbures (décahydronaphtalène...) des hydrocarbures halogéné (o-dichlorobenzène, trichlorobenzène...) ou bien des cétones, des esters et des éthers portant des groupe alkyle lourds (diamyl éther). L'insolubilité du PE à la température ambiante a nécessité, pour sa caractérisation structurale en solution, la mise au point de technique opérant à haute température. En raison de sa structure paraffinique le PE présente un caractère hydrophobe marqué et une inertie chimique, sa résistance à la dégradation thermo-oxydante est en étroite relation avec son taux de ramification car les hydrogènes tertiaires sont plus sensibles que les secondaires à l'attaque de l'oxygène moléculaire

### III.B.3 Structure du polyéthylène

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) menant à des macromolécules composées par la répétition du motif  $-(\text{CH}_2)$

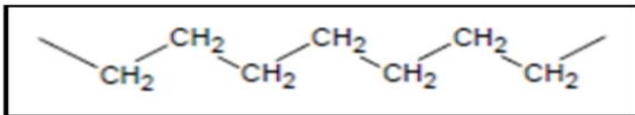


Figure III.10 : Représentation semi-développée de la macromoléculaire du polyéthylène.

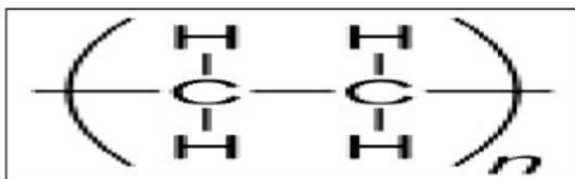


Figure III.11 : Schéma représentatif du motif du polyéthylène.



**Figure III.12 : Polymérisation du polyéthylène.**

Mais selon les différents modes de polymérisation on obtient plusieurs natures du polyéthylène par exemple :

- A partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse-densité PEBD
- A l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haute densité PEHD (linéaire donc plus compact que le précédent d'où son nom).

**III.B.4 Types de Polyéthylène**

Il existe de nombreux types de polyéthylène et principalement trois grandes familles qui définissent en fonction de leur masse volumique :

- Polyéthylène basse densité ou PEBD.
- Polyéthylène haute densité ou PEHD.
- Polyéthylène moyenne densité ou PEMD.
- Polyéthylène à masse molaire élevée ou PE-UHPM.
- Polyéthylène réticulé ou PE-R
- Polyéthylène réticulé à haute densité ou PE-RHD.
- Polyéthylène à très basse densité ou PE-TBD [71].

**III.B.4.1 Polyéthylène basse densité PEBD**

Ce polymère thermoplastique de grande consommation est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène (éthane) en opérant sous haute pression à environ 200°C [72]. Le PEBD est produits sous haute pression (82\_276MPa) et sous haute température (132\_332°C) avec un initiateur de radical libre (tel que le peroxydes et l'oxygène) et contient quelques longues et courtes branches. Dans le PEBD serait une chaine complètement ramifiée de groupement (-CH<sub>2</sub>-). Cette structure donnant ainsi une densité plus faible et une flexibilité plus grande à celle quand peut obtenir dans le cas de PEHD [73].

**III.B.4.1.1Application du PEBD**

Emballage industriel Emballage alimentaire Emballage produits hygiéniques Isolation câbles d'énergie et de télécommunications Gainage câbles téléphoniques Articles ménagers

Bouchons/Couvercles Poignées Sacs cabas Transport de l'eau Emballage du lait Revêtement de pipe-line [74].

#### **III.B.4.1.2 Avantages du PEBD**

- Solidité, résistances aux chocs et à l'abrasion, même à froids
- Inerte chimique, et non toxique pour usage alimentaires
- Résistance à la corrosion et à l'oxydation
- Adaptabilité
- Sécurité

#### **III.B.4.1.3 Inconvénients du PEBD**

- Pas résistant au feu
- Résistance à la température de l'eau limitée
- Rapide propagation de fissures
- Ne peut ni se coller ni se visser
- Les extrémités ont tendance à se fermer

#### **III.B.4.2 Polyéthylène haut densité PEHD**

Le PEHD est un thermoplastique blanc, moins translucide et plus rigide que le PEBD La molécule de PEHD est un long assemblage linéaire de 500 à 1000 molécules de l'éthylène pratiquement sans ramifications qui se cristallise pour donner un solide rigide Le polyéthylène haute densité (PEHD) est obtenu par la polymérisation cationique catalysée de l'éthylène. On utilise principalement les catalyseurs Ziegler-Natta et les catalyseurs à base de chrome (procédé de Philips) réduits et activés à haute température (400°C-800°C) [75].

Le PEHD, polyéthylène haute densité synthétisé sous faible pression par le procédé Ziegler (catalyse organométallique supportée base titane). Il se présente sous la forme d'une chaîne macromoléculaire linéaire régulière. Quelques irrégularités restent présentes (1%0 carbone) et se manifestent sous la forme de courtes ramifications. Sa masse volumique est la plus importante de tous les polyéthylènes et varie entre 0.955 et 0.970 g/cm<sup>3</sup> polyéthylènes haute densité ou PEHD : 0,95 g/cm<sup>3</sup> <math>\rho</math> <math>0,97</math> g/cm<sup>3</sup>.

##### **III.B.4.2.1 Application du PEHD**

Bouteille de lait bidon d'huile, flacons détergents solides et liquides, bidons produits sanitaires, bidons produits chimiques, réservoirs à essence, réservoirs casiers seaux, ménager bouteilles...

#### III.B.4.2.2 Avantages du PEHD

- Mise en œuvre aisée, injection, extrusion, films.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Grande inertie chimique.
- Qualité alimentaire.
- Résistance aux chocs
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures.

#### III.B.4.2.3 Inconvénients du PEHD

- Sensible en présence d'oxygène.
- Sensible à la fissuration sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important. [76].
- **Remarque :**

Le PEBD est plus ramifié que le PEHD, ce qui signifie que les chaînes ne s'assemblent pas bien entre elles. Les forces intermoléculaires de type force de Van der Waal sont donc plus faibles. Il en résulte une plus faible densité, une plus grande malléabilité et une biodégradabilité plus rapide [77].

Dans le tableau suivant une comparaison entre le PEHD et le PEBD :

**Tableau III.2** : comparaison entre le PEHD et le PEBD.

Dénomination des différentes propriétés	PEBD	PEHD
<b>Physiques et chimiques</b>		
Masse volumique	0.915-0.935	0.945-0.960
Taux de cristallinité	65-70%	65-80%
Masse molaire moyenne	10 000 g/mol	jusqu'à 8 million de g/mol
Indice de poly moléularité	faible	faible
<b>Mécaniques</b>		
Structure	branchée	linéaire
Caractéristiques principales	souplesse transparence soudabilité	rigidité résistance mécanique résistance chimique
Contrainte au seuil (rupture)	10-13 MPa	24-30 MPa
Module de traction	200-300 MPa	800-1200 MPa
Module de flexion	60-400 MPa	1150-1500 MPa
<b>Thermiques</b>		
Température de fusion	110-120°C	128-135°C
Transition vitreuse	environ -110°C	environ -110°C
Plage de t° de résistance	de -70 à +60°C	de -70 à +90°C
Retrait au moulage	1.5/3.5%	1.3/3%
Conductivité thermique	faible	faible
Point de Fusion	125°C	135°C
Température de transition vitreuse	110°C	110°C
Absorption d'eau	Néant	Néant
Conductivité thermique	0,48 W/m*°C	0,48 W/m*°C

### III.C. Techniques expérimentales

#### III.C.1. introduction

Les techniques utilisées pour la caractérisation des échantillons préparées sont :

- Diffraction des Rayons –X (DRX) ;
- Analyse Thermogravimétrique (ATG) ;
- Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) ;
- Essai de traction.

Dans ce chapitre nous présentons les techniques de caractérisations des composites qui ont été étudiés en expliquant le principe de chaque technique.

#### III.C.2. Méthodes d'analyse

##### III.C.2.1. Diffraction des Rayons –X (DRX) aux grands angles

A cause de leurs propriétés, les rayons-X sont utilisés dans divers domaines. Ils sont utilisés plus particulièrement dans le domaine de la détermination des structures cristallines.

Le principe des rayons-X consiste en une interaction de ces derniers avec la matière à analyser.

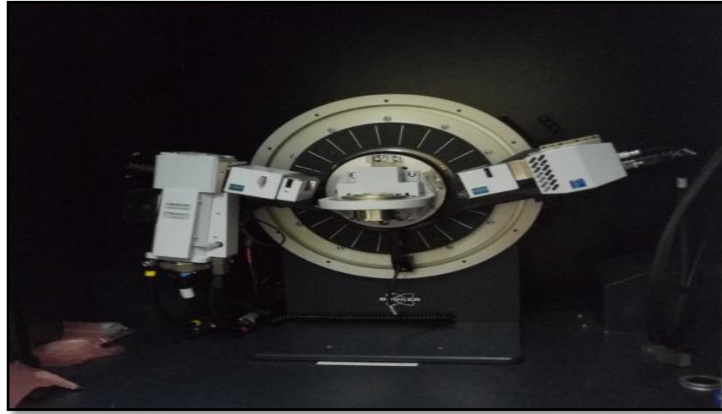
La diffraction est une technique dont l'utilisation va de la simple identification des cristaux jusqu'à la détermination de leur structure atomique. Elle permet non seulement d'accéder à des paramètres structuraux (arrangement des atomes, paramètres de maille...) mais fournit également des informations sur la microstructure de l'échantillon (taille et forme des domaines cohérents). Pour étudier des systèmes cristallisés, les rayons X sont les plus employés car leur longueur d'onde est proche de 1 Å, ce qui correspond à l'ordre de grandeur des distances interatomiques dans la matière condensée. Bien que la détermination des structures cristallines se fasse préférentiellement à partir de monocristaux, l'étude de matériaux composites et finement divisés peut se faire à partir d'une poudre. De façon simplifiée, les informations contenues dans un diffractogramme de poudre proviennent des angles auxquels sont observés les pics de diffraction, de leur intensité et de leur largeur.

#### III.C.2.1.1.Présentation du dispositif expérimental

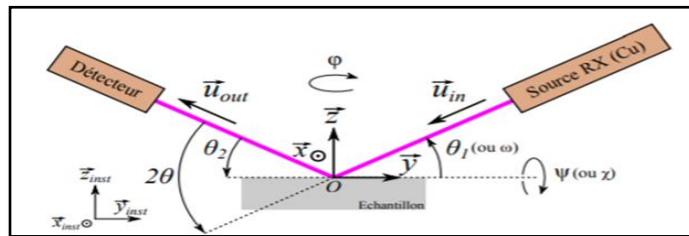


**Figure III.13:** Photo de l'appareil DRX (Bruker D8).

Un diffractomètre est composé d'une source de rayons X (anode en cuivre), d'un détecteur linéaire rapide (LynxEye). Des moteurs permettent de les faire tourner autour de l'échantillon à analyser. Une photographie et un schéma de ce dispositif sont donnés dans les figures III.14 et III15.



**Figure III.14:** Photographie d'un diffractomètre de laboratoire.



**Figure III.15:**Schéma d'un diffractomètre, avec les repères de l'échantillon  $(O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  et de l'instrument  $(O, \vec{X}_{inst}, \vec{Y}_{inst}, \vec{Z}_{inst})$ .

Les rayons X sont produits par un tube composé d'une cathode et d'une anode, entre les quelles une haute tension est appliquée (généralement de 40 kV). Un courant d'électron entre ces électrodes excite les atomes de l'anode.

La désexcitation des atomes de cuivre produit des rayons X de différentes longueurs d'ondes. Après filtrage, seuls les rayons avec les deux longueurs d'ondes suivantes sortent de la source :  $\lambda K_{\alpha 1}$  (1,5405 Å) et  $\lambda K_{\alpha 2}$  (1,5444 Å) du Cuivre (Cu), Le rapport de leur intensité ( $K_{\alpha 2}/K_{\alpha 1}$ ) est de 51/100. Les rayons de la raie  $K_{\alpha 2}$  ne sont pas filtrés, car cela impliquerait une forte baisse du flux de photons.

Ce faisceau est focalisé avec un diamètre de l'ordre de 0,5 à 1cm dans une direction  $\vec{u}_{in}$ .

L'intercepte l'échantillon au milieu de la surface implantée. Ce point d'intersection est appelé O et le repère de l'instrument est défini par  $(O, \vec{X}_{inst}, \vec{Y}_{inst}, \vec{Z}_{inst})$ , ou  $\vec{X}_{inst}$  et  $\vec{Y}_{inst}$  sont parallèles au sol et  $\vec{Z}_{inst}$  perpendiculaire au sol. Le faisceau incident porté par le vecteur normé  $\vec{u}_{in}$  est inclus dans le plan  $(O, \vec{Y}_{inst}, \vec{Z}_{inst})$

Le 1er moteur permet à la source de faire une rotation de centre O d'un angle  $\pm \theta_1$  autour de l'axe  $\vec{X}$  inst. Le détecteur ponctuel est placé de manière à recevoir tout photon provenant du point O avec une direction portée par le vecteur normé  $\overrightarrow{u_{out}}$ .

Le 2<sup>ème</sup> moteur permet à ce détecteur de faire une rotation de centre O d'un angle  $\pm \theta_2$  autour de l'axe  $\vec{X}$  inst.

L'échantillon est posé sur le porte échantillon de manière à ce que la base  $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  soit identique à  $(\vec{X} \text{ inst}, \vec{Y} \text{ inst}, \vec{Z} \text{ inst})$ . Le 3<sup>ème</sup> moteur permet à l'échantillon de faire une rotation de centre O d'un angle  $\pm \varphi$  autour de l'axe  $\vec{Z}$ . Dans le cas d'un poly cristal, la section du faisceau avec la surface de l'échantillon peut ne pas la recouvrir en totalité et ne pas être bien centrée. Or seuls les grains dans cette section diffractent. Si leur nombre est insuffisant, la statistique peut être augmentée en effectuant cette rotation  $\varphi$  pendant le temps de comptage du détecteur. Enfin, le 4<sup>ème</sup> moteur permet de tourner le porte échantillon d'une rotation de centre O d'un angle de  $\pm \psi$  autour de l'axe  $\vec{Y}$  inst.

### III.C.2.1.2. Loi de Bragg

Bragg proposa une explication simple des angles observés pour les faisceaux diffractés par un cristal. On obtient des rayons diffractés lorsque les rayons réfléchis par les plans parallèles interfèrent de façon additive. Il y'a diffraction d'un rayonnement X par un milieu cristallin, lorsque les rayons réfléchis par deux plans voisins de la même famille de plans (hkl) ont une différence de marche d'un nombre entier de longueurs d'ondes.

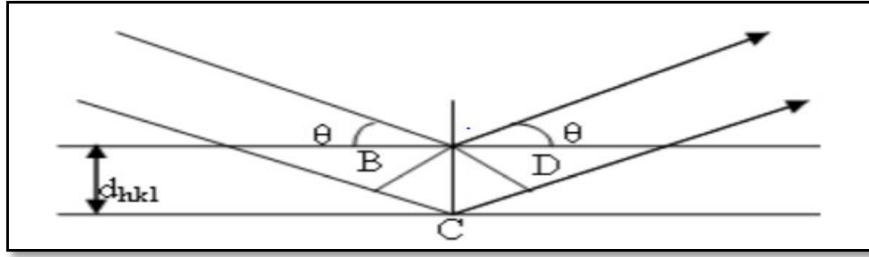
$$\delta = n \times \lambda$$

Où :  $\delta$  est la différence de marche entre deux rayons réfléchis sur deux plans voisins et  $\lambda$  la longueur d'onde du rayons-X incident.

$$\delta = BC + CD = 2 d \sin \Theta$$

Où d est la distance perpendiculaire entre les plans, et  $\theta$  l'angle d'incidence du rayon. Or on a  $\delta = n \lambda$ , d'où (1):

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta$$



**Figure III.16:**Principe d'établissement de la loi de Bragg.

### III.C.2.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)

#### III.C.2.2.1. Définition

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une méthode permettant de suivre une réaction de décomposition grâce à l'évolution de la masse de l'échantillon testé au cours du temps ou en fonction de la température. Elle permet de mettre en évidence les effets thermiques de cette réaction liés aux variations d'enthalpie correspondant à des phénomènes physiques ou chimiques.

#### III.C.2.2.2. Principe

La technique d'analyse thermogravimétrique (ATG) donne la variation de la masse qui permet de déterminer la température minimale de dégradation des composés.

L'analyse thermogravimétrique (ATG) ou thermogravimétrie a pour objectif la caractérisation des matériaux par mesure directe de leur variation de masse en fonction de la température et/ou du temps à l'aide d'une thermo-balance. La mesure se fait en milieu inerte (azote, argon ou hélium pour des essais à hautes températures) ou en milieu oxydant (dioxygène). Cette technique de mesure peut également être couplée avec d'autres méthodes d'analyse effectuées simultanément afin par exemple, de déterminer la nature des produits qui s'évaporent de l'échantillon. L'échantillon est utilisé sous forme de poudre ou sous forme massive. La perte de masse est calculée pendant un cycle thermique par rapport à une référence étalon. L'échantillon présente généralement une masse comprise entre 10 mg et 1g suivant l'appareil utilisé et le matériau analysé. La plage de température d'essai se situe entre 100 à 950°C.



**Figure III.17:** photo d'un appareil DSC/ATG (NETZSCH).

### **III.C.2.3. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)**

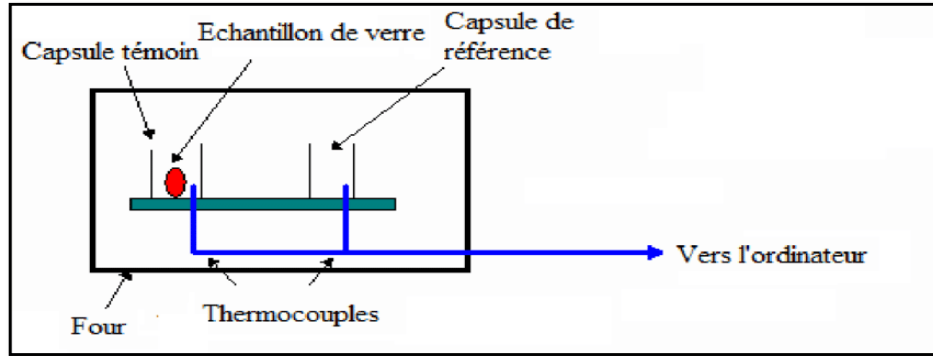
#### **III.C.2.3.1. Définition**

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC : Differential Scanning Calorimetry en anglais) est une technique permettant d'étudier les transitions thermiques des matériaux. On peut ainsi détecter la transition vitreuse, la cristallisation et la fusion (Figure II.5).

L'analyse thermique consiste, de manière générale, à mesurer les évolutions d'une propriété physique d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une variation programmée (généralement linéaire) de température avec le temps sous une atmosphère contrôlée. La calorimétrie différentielle à balayage se rapporte à l'étude de la température de l'échantillon et des échanges thermiques entre celui-ci et le milieu extérieur. Cette analyse se fait en mesurant les différences d'échange de chaleur entre l'échantillon à analyser et une référence (souvent un creuset vide). Elle permet l'étude de la stabilité thermique des matériaux en déterminant leurs transitions de phase. Ainsi, les températures de fusion, de cristallisation ou encore de décomposition peuvent être déterminées.

#### **III.C.2.3.2. Principe de l'appareil**

La calorimétrie différentielle à balayage est une technique utilisée pour étudier ce qui arrive aux polymères lorsqu'ils sont chauffés. Cette technique sert à étudier les transitions thermiques d'un polymère. Les transitions thermiques sont les changements qui interviennent dans un polymère quand on le chauffe. La fonte d'un polymère cristallin ou la transition vitreuse en sont des exemples. Ainsi comment peut-on étudier ce qui arrive à un polymère lorsqu'on le chauffe ? La première étape consiste à le chauffer, évidemment. C'est ce que l'on fait dans la Calorimétrie Différentielle à Balayage, (DSC).



**Figure III.18:** schéma descriptif de DSC .

Il y a deux récipients. Dans l'un des deux, le récipient témoin, nous mettons notre échantillon de polymère. L'autre, que nous laissons vide, est le récipient de référence. Les deux récipients se trouvent dans un four qui chauffe habituellement à une vitesse comme  $10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ . Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur. L'ordinateur fait la différence entre la température de l'échantillon et celle de la référence, et les convertit en flux de chaleur. L'échantillon de polymère représente de la matière supplémentaire dans le récipient témoin par rapport au récipient de référence. La présence de cette matière supplémentaire et son "inertie thermique" (plus y'a de matière, plus il faut de temps pour que tout soit chaud) font que le récipient témoin ne sera pas à la même température que le récipient de référence.

Lors d'une manipulation DSC : Sur l'axe des abscisses nous traçons la température (du four). Sur l'axe des ordonnées nous traçons la différence de chaleur entre les deux récipients, témoin et référence.

### III.D. Matériaux utilisés

#### III.D.1. Résine

La matière première qui a été utilisée dans cette étude pour la préparation des formulations comporte le polyéthylène haute densité de grade 5502 (PEHD) comme résine, c'est un produit commercialisé par « POLYMED » (de l'unité POLYMED CP2 /K situé à la zone industrielle de Skikda). Il se présente sous forme de poudre et granulés.



**Figure III.19 :** Poudre du PEHD.

### III.D.2. Charge

La charge utilisée dans cette étude est : fibre végétale de Sisal que nous avons récoltés et nous l'avons coupé à une longueur de 5mm.

Trois différentes concentrations massiques en fibre ont été étudiées:

- ✓ PEHD pur.
- ✓ Composite 125 g PEHD + 15 g fibre de Palmier (donc la masse de fibre représente 10% de la masse totale).
- ✓ Composite 2 → 120 g PEHD + 30 g fibre de Palmier (donc la masse de fibre représente 20 % de la masse totale).



**Figure III.20 :** Fibres de Sisal.

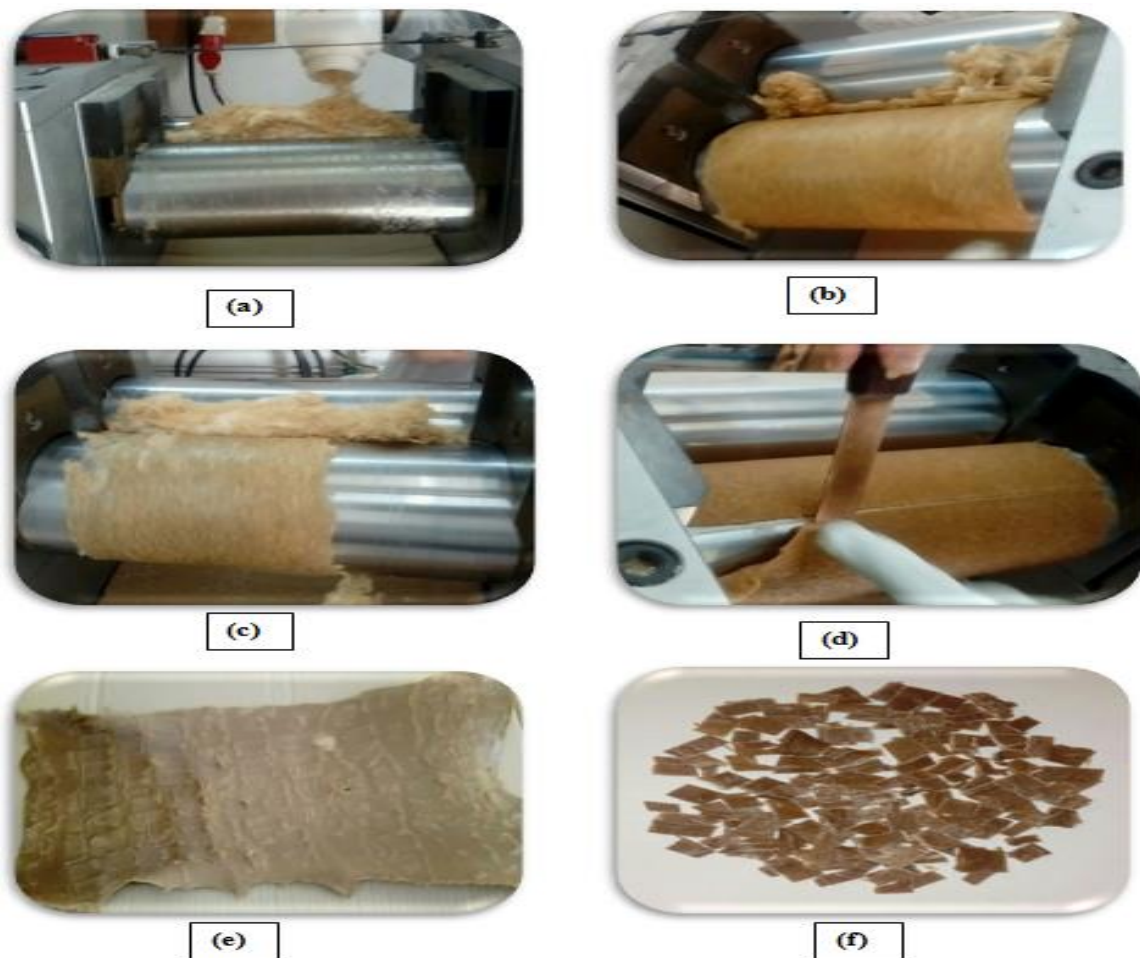
### III.E. Méthode d'élaboration des biocomposites

#### III.E.1. Préparation des échantillons

Les composites ont été élaborés dans un malaxeur comportant deux cylindres tournant en sens inverse à une vitesse angulaire de 32 tour par minute et à une température de 175°C.

On introduit le mélange entre les deux cylindres durant 12 minutes, ce qui assure une fusion complète du mélange de polymère. Nous pouvons obtenir une feuille (refroidir à l'air libre) coupées en petits morceaux de 2,5 à 4 cm (voir Figure. IV.4).

Les échantillons ont été fabriqués à l'aide d'une presse chauffante réglée à 177°C et d'un moule constitué de plaques d'aluminium.



**Figure III.21** : méthode d'élaboration des plaques biocomposites entre les deux cylindres.



**Figure III.22 :** Le moule entre les deux résistances.



**Figure III.23 :** plaque obtenue après le pressage.

## III.2 CONCLUSION

Pour conclure, on peut affirmer qu'on peut fabriquer un matériau composite à partir du polyester renforcé de fibres de sisal. L'utilisation de la fibre végétale telle que celle du sisal comme renfort d'un matériau composite est une excellente alternative pour la conception d'un nouveau matériau à Madagascar.

Le polyéthylène (PE) est l'un des plastiques les plus utilisés au monde, et concerne un nombre incalculable d'industries, de segments et d'applications. Le PE permet d'emballer les produits alimentaires de façon économique tout en prolongeant leur durée de vie, de transporter et de distribuer des produits chimiques en toute sécurité, d'acheminer l'eau potable auprès des populations, de protéger les carrosseries des voitures neuves contre les rayures, et pléthore d'autres applications utiles de la vie quotidienne.

# **CHAPITRE IV :**

# **Résultats et**

# **discussion**

## IV. Résultats et discussion

### IV.1. Analyse thermogravimétrique (ATG)

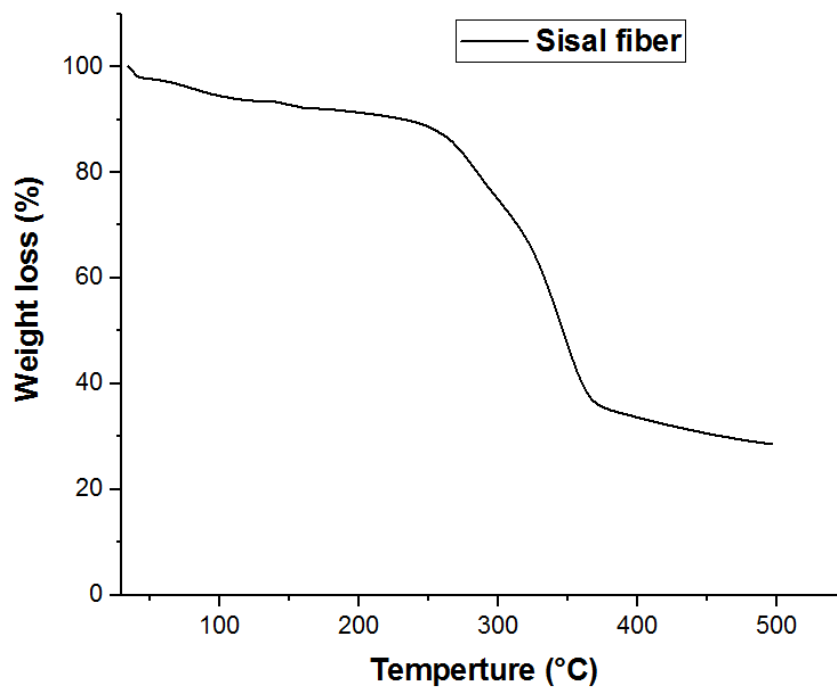


Figure IV.1 : courbe TG du PFHD vierge

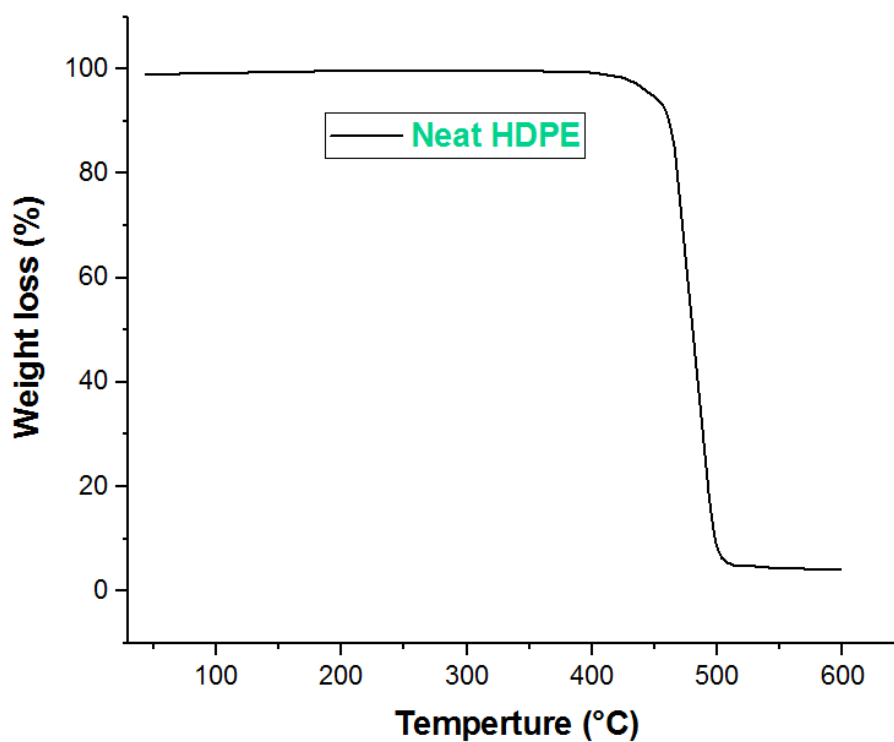


Figure IV.2 : courbe TG du PFHD vierge

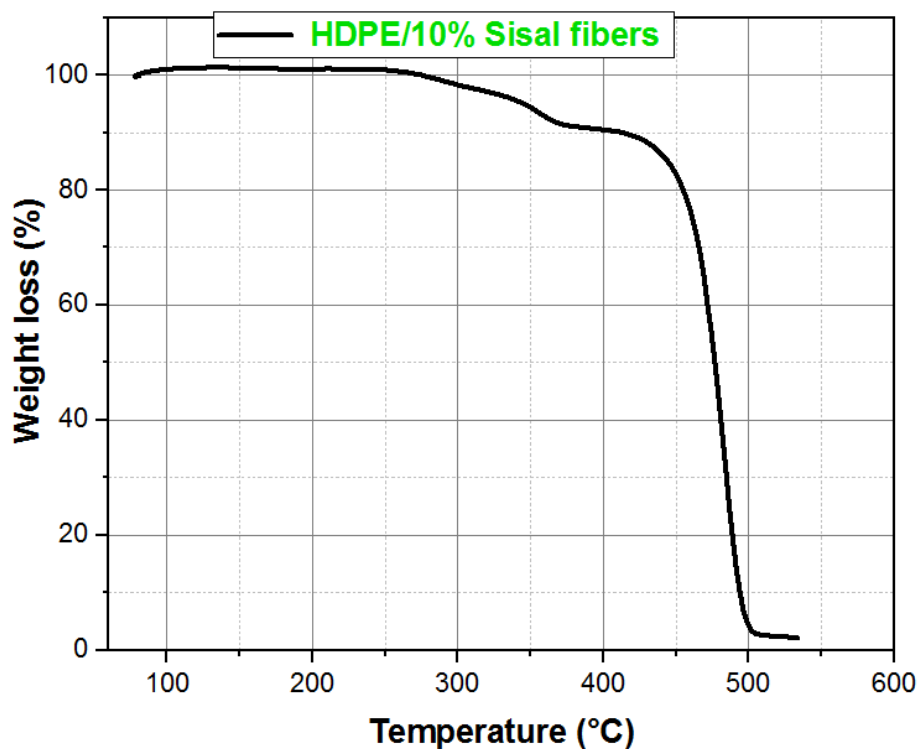
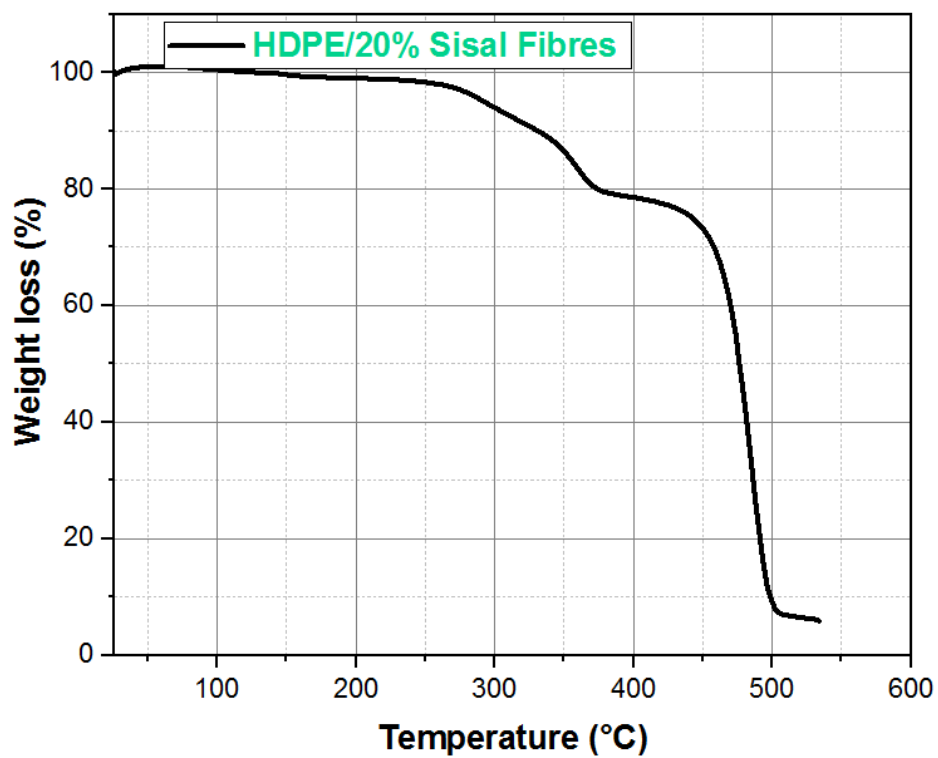


Figure IV.3 : courbe TG du PFHD/10% fibres de sisal



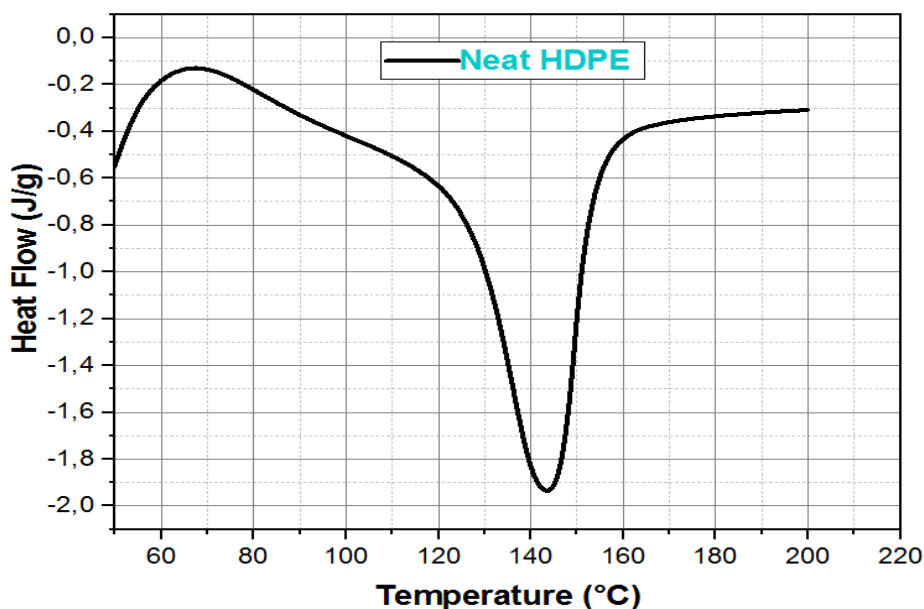
**Figure IV.4 :** courbe TG du PFHD/20% fibres de sisal

**Tableau IV.1 :** Résultats de l'ATG.

	PEHD pur	Fibre de Sisal	Composite PEHD/10% fibres de Sisal		Composite PEHD/20% fibres de Sisal	
			PEHD	Fibre de Sisal	PEHD	Fibre de Sisal
<b>T<sub>onset</sub></b> (°C)	382	194	403	273	439	170
<b>T<sub>offset</sub></b> (°C)	508	385	502	370	515	377

Les résultats de l'ATG regroupés dans le tableau IV.1 montrent que l'incorporation de la charge de renfort de Sisal a modifié le comportement thermique du composite obtenu en décalant la température de début de dégradation vers les hautes températures de 382 à 403 °C pour 10 % de charge et de 382 à 439 °C pour 20% de charge en masse mais pour la fin du processus de dégradation le décalage était léger de 508 à 515 pour 20% de charge en masse.

#### IV.2. Analyse calorimétrique différentielle (DSC)



**Figure IV.5:** courbe DSC du PFHD vierge

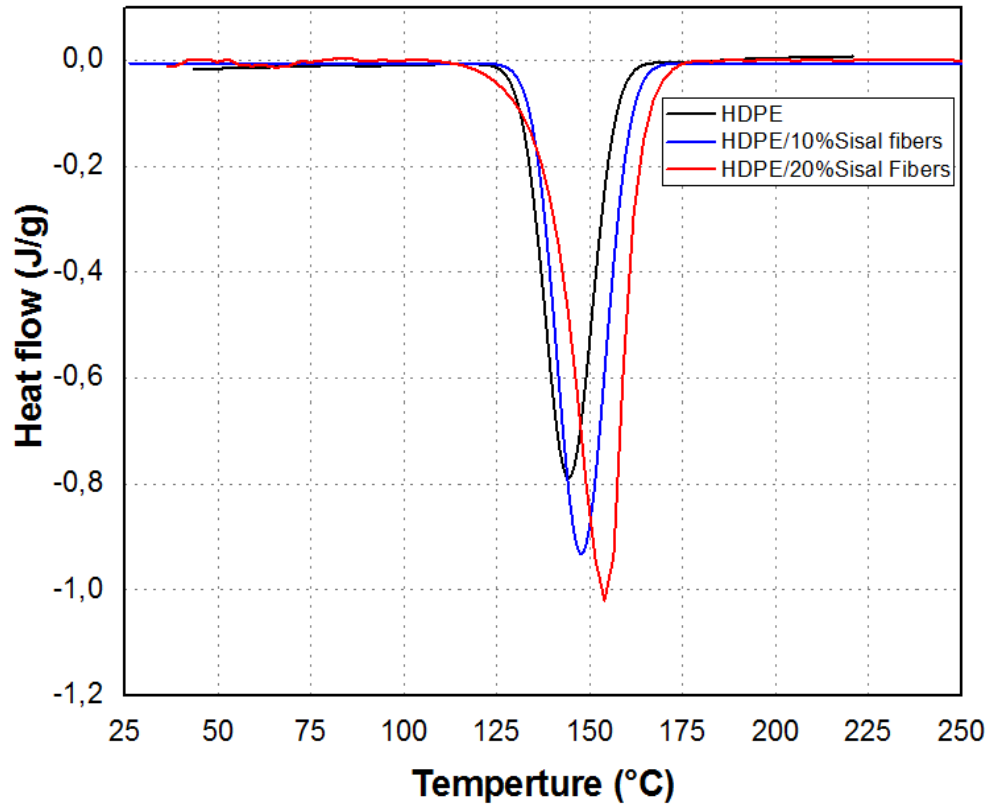


Figure IV.6 : courbe DSC du PEHD vierge, PEHD/10% fibres de sisal et PEHD/20% fibres de sisal

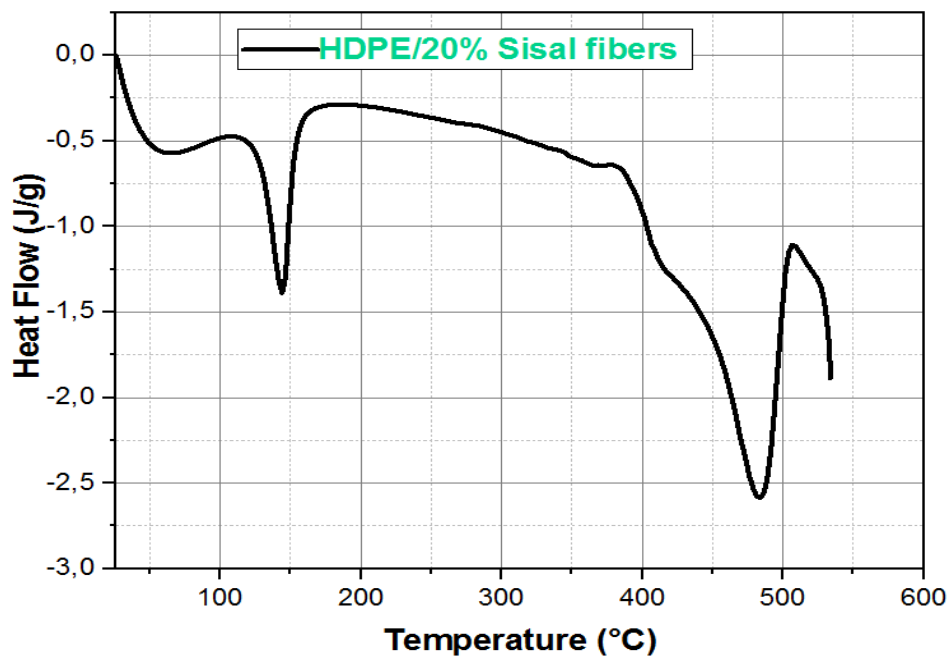


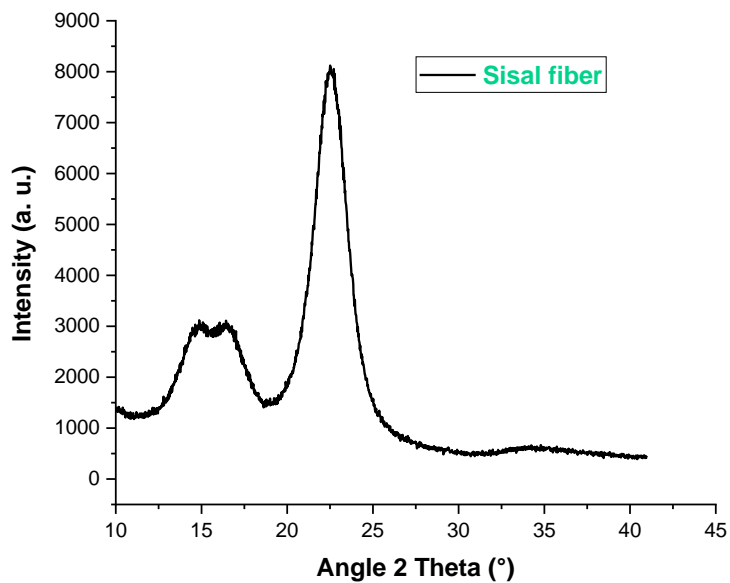
Figure IV.7 : courbe DSC du PEHD/20% fibres de sisal

**Tableau IV.2 :** Résultats de DSC.

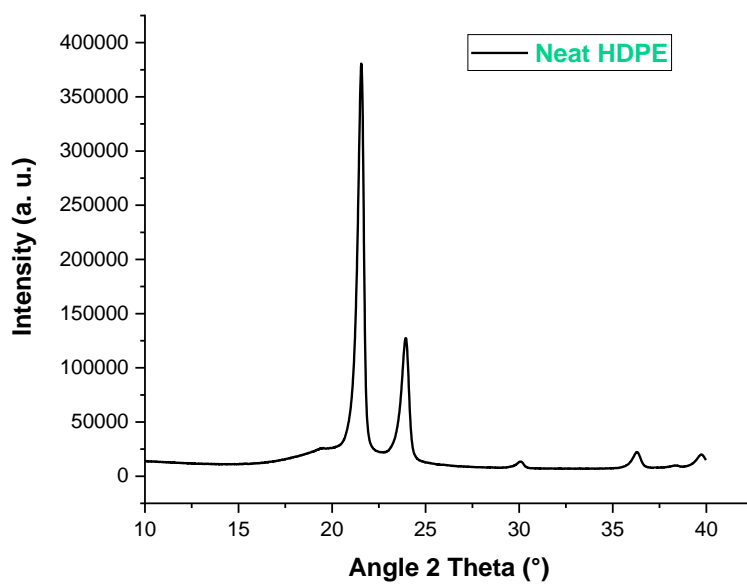
	PEHD pur	Fibres de Sisal	Composite PE/10% fibres de Sisal		Composite PEHD/20% fibres de Sisal	
			PEHD	Fibres de Sisal	PEHD	Fibres de Sisal
T <sub>f</sub> (°C)	144	91	485	147	486	145

En regardant les résultats illustrés dans le tableau IV.2, on constate que le comportement thermique du composite préparé a changé dans le sens des hautes températures et cela pour les deux pourcentages de renfort en fibre de Sisal à savoir la température de fusion du PEHD passe de 144 à 485 pour une charge de 10% en masse et garde presque la même plage de température pour le renfort de 20% en masse.

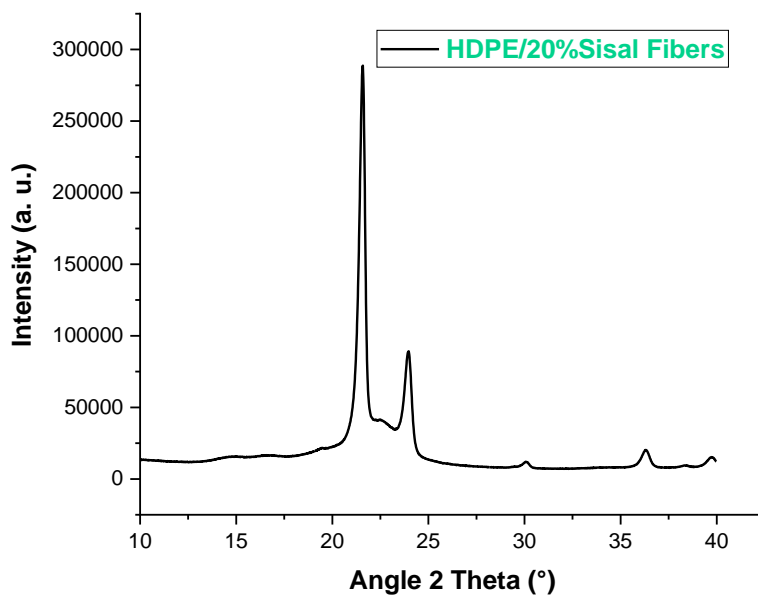
### IV.3. Diffraction des rayons X (DRX)



**Figure IV.8 :** diffractogramme de la fibre de sisal



**Figure IV.9 :** diffractogramme du PEHD vierge



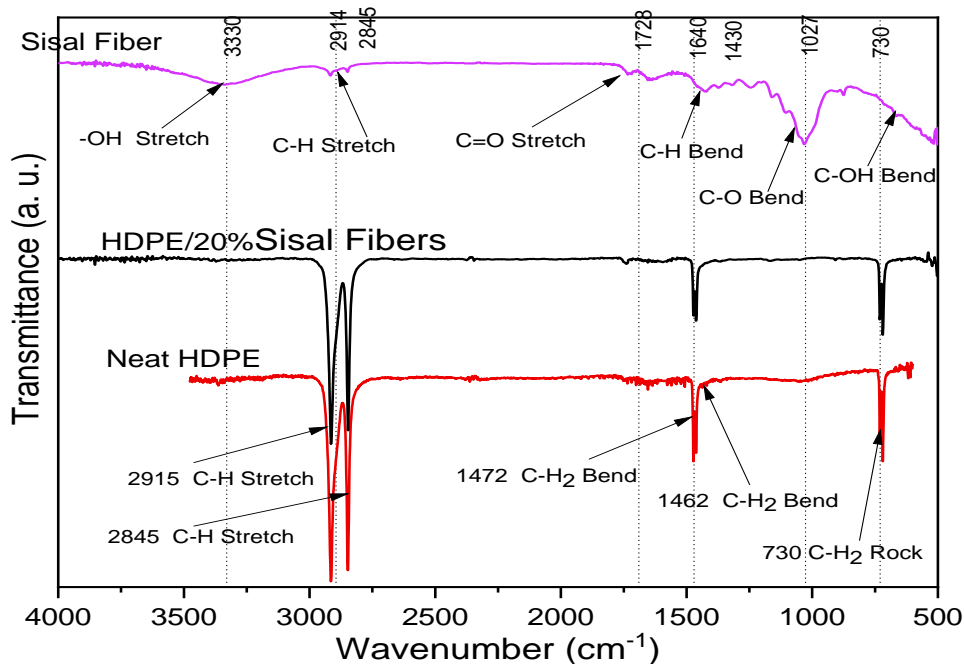
**Figure IV.10 :** diffractogramme du composite PEHD/20% la fibre de sisal

**Tableau IV.3** : Résultats de DRX

	Fibres de Sisal		PEHD pur			Composite PEHD/20% fibres de Sisal		
	3000	8000	375000	125000	12500	256000	90000	12500
<b>Intensité de chaque pic (a.u)</b>								
<b>Angle 2 Théta (°)</b>	16.50	22.50	21.95	24.89	36.50	22.02	24.99	36.50

Les résultats de DRX pour les composites de l'étude montrent que l'ajout de la charge de fibres de Sisal n'a affecté la structure du composite que légèrement, c.à.d: le diffractogramme affiche trois pics aux mêmes angles 2 théta de même pour le PEHD ; la seule différence est dans l'intensité des pics qui diminue avec le taux de charge incorporé dans la matrice du PEHD. Alors, on peut conclure que l'ajout de cette charge comme renfort de la matrice du PEHD ne modifie pas la structure cristalline de ce matériau.

#### IV.4. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)



**Figure IV.11** : spectre FTIR de la fibre de sisal, PEHD vierge et PEHD/20% fibres de sisal

La spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR : Fourier Transformé infrared spectroscopy) est une méthode d'analyse pour caractériser les liaisons chimiques ou la composition du matériau. Le principe de cette technique qualitative s'appuie sur l'illumination d'un polymère par un faisceau infrarouge, les différentes liaisons et fonctions chimiques présentes dans sa structure vibrent en absorbant de l'énergie à une fréquence particulière. Ainsi, en repérant l'emplacement et l'intensité des bandes d'absorption des spectres obtenus lors de l'analyse, on peut connaître la nature et la concentration des différents groupements qui composent les chaînes polymères

#### IV.4.1 Analyse FTIR

La structure chimique de la fibre de Sisal, du PEHD et du composite HDPE/20% Fibres de Sisal peut être déterminée par analyse FTIR. La figure ? illustre les spectres FTIR des échantillons étudiés. Pour le PEHD et son composite, les pics représentatifs sont observés comme suit: l'étirement de la liaison C-H apparaît à 2914 et 2848  $\text{cm}^{-1}$ ; le  $\text{CH}_2$  plié à 1468  $\text{cm}^{-1}$ , et enfin le  $\text{CH}_2$  rock à 718  $\text{cm}^{-1}$ . En regardant les spectres FTIR du PEHD et HDPE /20% Fibres de Sisal, on peut constater qu'ils se différencient uniquement par l'intensité des pics ce qui veut dire que l'incorporation de la charge de Sisal n'a pas modifié les groupes fonctionnels présents initialement dans la matrice PEHD. Tandis que le spectre de la fibre de Sisal se compose d'une large bande d'absorption observée à 3340  $\text{cm}^{-1}$ , elle est attribuée à l'étirement du groupement OH de la cellulose. Dans la région 2800–2900  $\text{cm}^{-1}$ , deux pics ont été observés qui sont attribués à l'étirement de la liaison - CH de l'hémicellulose. Le pic d'absorption à 1730  $\text{cm}^{-1}$  correspond aux vibrations d'étirement du groupe ester carbonyle C = O principalement dues au groupe hémicellulose. Vers 1645  $\text{cm}^{-1}$  est apparu le pic d'étirement de la liaison C = C qui retourne à la lignine ; la courbure C-H de la cellulose est observée à 1424  $\text{cm}^{-1}$  ; le pic à 1030  $\text{cm}^{-1}$  est attribuée à la vibration d'étirement C-O du groupe acétyle dans l'hémicellulose et la lignine. Enfin, le pic de déformation C-OH a été trouvé à près de 730  $\text{cm}^{-1}$ .

## **CONCLUSION GENERALE**

Pour conclure, on peut affirmer qu'on peut fabriquer un matériau composite à partir de polymères renforcés de fibres de sisal. L'utilisation de la fibre végétale telle que celle du sisal comme renfort d'un matériau composite est une excellente alternative pour la conception d'un nouveau matériau.

Pour pouvoir utiliser les fibres en tant que renfort, une étude préliminaire est nécessaire. Avant toute opération, il faut extraire les fibres, l'extraction consiste à la collecte de leurs feuilles, au laminage, au prélavage ainsi qu'au séchage. Pour obtenir une bonne compatibilité des fibres avec la matrice, il est nécessaire de leur faire subir un traitement de surface. Cette opération consiste à tremper les fibres dans une solution de soude à une certaine concentration pendant une certaine durée.

L'incorporation d'une charge de sisal renforcée a modifié le comportement thermique du mélange obtenu en élevant la température au début de la décomposition à des températures élevées C pour le roulement afin que le déplacement ne soit pas affecté par la masse.

Nous espérons, par l'étude que nous avons effectuée, avoir mis au point un matériau composite renforcé de fibres de sisal avec des propriétés mécaniques plus intéressantes comparées à celles des composites à base de fibres de verre et que nous avons contribué à la valorisation de nos ressources naturelles en général et des fibres végétales en particulier.

## LIST DE REFERENCES :

- [1] William D. Callister, Jr. science et génie des matériaux, John Wiley et Sons, Inc. (2007).
- [2] Ghorzi, Wissam - dspace.univ-tlemcen.dz. Etude de la diffusion des molécules de bas poids moléculaire dans des réseaux de polymères acrylique. Driss. 2012.
- [3] Mohamed, marref. synthèses, analyses et applications. 2020. universite des sciences et de la technologie faculte de chimie mohamed boudiaf d'oran (u.s.t.o)
- [4] SADOUN, Sofiane. EFFET DE LA TEMPERATURE, DE LA VITESSE DE DEFORMATION ET DE VIEILLISSEMENT SUR LA STRUCTURE DU PEHD. 2018. biblio.univ-annaba.dz
- [5] GASMI, Bouthayna. Influence du vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques du polyamide PA 6-6. 2020- dspace.univ-guelma.dz.
- [06] BERREUR.L, MAILLARD.B.d, et NÖSPERGER.S, « L'industrie française des matériaux composites », Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, p1-47,2002.
- [07] BOUDENNE.A, « Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques de matériaux composite à matrice polymère », Université PARIS XII 2003.
- [08] JULES.E.J, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers 2001.
- [09] KAUSCH.H.-H, HEYMANS.N, PLUMER.C.J, and DECROLY.P, « Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physique », 2001.
- [10] BEWA.H, « Matériaux polymères biodégradables et applications Note de Synthèse II », Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques, p1-16,2006.
- [11] BERTHELOT.J.-M, « Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse de structures », 1999.
- [12] BARDONNET.P « Résines époxydes (EP) », Techniques de l'Ingénieur, vol.A3465.

## LIST DE REFERENCES

- [13] BENSAID.S, « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », thèse de doctorat, l'université de Nantes, 2006.
- [14] BERTHELOT.J-M« matériau composites : comportement mécanique et analyse des structures »,4ièmeédition, Lavoisier, 2005.
- [15] CHEVALIER.M« Phénoplastesouphénols-formolsPF », Techniquesde l'Ingénieur, vol.A3435.
- [16] Glossaire des matériaux composites, EditionCARMA, octobre2006.
- [17] MOKADDEM.A, « Modélisation du Comportement de L'interface Fibre-Matrice de Matériaux Composites », Mémoire de magister, USTO, 2008.
- [18] RENARD.J, « Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère », Lavoisier, 2005.
- [19] P.Prombut, Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier France, 2007.
- [20] H.Boudjema, Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables. Thèse d' Doctorat, Université d'Oran22016.
- [21] A.Khaldoune, Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio composites, Université M'sila 2016.
- [22] E.Babacar, Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres de cellulose, Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
- [23] Sivam, R., Potential of Brazilian natural cellulosic fibres for composite manufacturing. Symposium on fibre reinforced composites. South Africa, 2009: p. 2425
- [24] M, M., Étude prospective de la valorisation du lin par l'industrie automobile. Rapport de synthèse, Goyhenetche consultants. 2008.
- [25] Baley, C., Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites2013: Ed. Techniques Ingénieur.
- [26] Liu, W.-J., H. Jiang, and H.-Q. Yu, Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. Green Chemistry, 2015. 17(11): p. 48884907.

## LIST DE REFERENCES

- [27] Couhert, C., Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno-cellulosique et de ses composés: production de gaz de synthèse, 2007, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [28] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>.
- [29] S. BENSALD, "CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A LA MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ANISOTROPES," l'Université de Nantes, 2006.
- [30] N. Gupta, "CHARACTERIZATION OF SYNTACTIC FOAMS AND THEIR SANDWICH COMPOSITES: MODELING AND EXPERIMENTAL APPROACHES," The Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2003.
- [31] Monties, B., Les polymères végétaux : Polymères pariétaux et alimentaires non azotés 1980: Gauthier-Villard.
- [32] Jayakumar, G.C., et al., Studies on the physico-chemical characteristics of collagen–pectin composites. RSC Advances, 2014. 4(109): p. 63840-63849.
- [33] Mancini, A., et al., Biological and nutritional properties of palm oil and palmitic acid: effects on health. Molécules, 2015. 20(9): p. 17339-17361.
- [34] E, U., Biología Molecular: Moléculas para el metabolismo. Biología, 2015: p. 65-71.
- [35] Charlet, K., et al. Etude morphologique d'un composite naturel. La fibre de lin. Revue des composites et des matériaux avancés, 2006. 16(1): p. 11.
- [36] Magniont, C., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, 2010, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- [37] Abdessamed, M., Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier. Université Ouargla, thèse de magister, 2006.
- [38] Bates.J, les fibres naturelles pour les composites. KU.LEUVEN, 2014.
- [39] :Berthelot JM. Matériaux composites / comportement mécanique et analyse des structures. 4ème édition. Paris : Lavoisier ; 2005.

## LIST DE REFERENCES

- [40] :Sandali A, Rabhi N. comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles, mémoire de master, université KasdiMarbah de Ouargla, 2013.
- [41] : Cornet L. Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1 - 6 Apr 2010.
- [42]: Vijay I.R., Palmese G.R., « Influence of Tetrahydrofuran on Epoxy–Amine Polymerization », *Macromolecules*, vol. 38, (2005), pp. 6923-6930.
- [43] : El Hadji Babacar LY. Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres decellulose, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
- [44]: A.Richard, Gross and BhanuKalra, *Biodegradable Polymers for the Environment*, Science vol 297, p 803-807, 2002.
- [45]: A. P. Gupta and V. Kumar, “New emerging trends in synthetic biodegradable polymers– Polylactide: A critique,” *European Polymer Journal*, 43, 4053–4074, 2007.
- [46]: J.M. Berthelot. *Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis*, New York, 1999.
- [47]: Behazin, E., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2017a). Sustainable biocarbon from pyrolyzed perennial grasses and their effects on impact modified polypropylene biocomposites. *Composites PartB:Engineering*, 118, 116-124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.003>.
- [48]: C.A.R.M.A, glossaire des matériaux composites, Actualisation 2004, p13 – 29
- [49] : F.A.O, le sisal malgache, CCP : HF/SC 70/10
- [50] : J. RAMONJISOA, le sisal à Madagascar.
- [51] : C.A.R.M.A, glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d’origine renouvelable.
- [52] Yan Li, Yiu-Wing Mai, Lin Ye. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *J of Composites Science and Technology*. Vol: 60 (2000) 2037±2055
- [53] [www.advancedbuildings.org](http://www.advancedbuildings.org)

## LIST DE REFERENCES

- [54] Sisal.htm - cite\_ref-8 [Source: FAO Fibres Statistical Bulletin- URL retrieved November 22, 2008]
- [55] A. Athijayamania, M. Thiruchitrambalamb, U. Natarajana, B. Pazhanivel. Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite. *J of Materials Science and Engineering A*. Vol: 517 (2009) 344–353.
- [56] Chand N, Tiwary RK, Rohatgi PK. Bibliography resource structure properties of natural cellulosic fibres Ð an annotated bibliography. *J of Materials Science*. Vol: 23 (1988)381±7.
- [57] Murherjee PS, Satyanarayana KG. Structure and properties of some vegetable fibres, part 1. Sisal fibre. *J of Materials Science*. Vol: 19 (1984) 3925±34.
- [58] P.A.Sreekumar, Selvin P. Thomas, Jean marc Saiter, Kuruvilla Joseph, G. Unnikrishnan, Sabu Thomas. Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding. *J of Composites: Part A*. Vol: 40 (2009) 1777–1784
- [59] Mukherjee KG, Satyanarayana KG. Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1: sisal fibre. *J of Materials Science*. Vol: 1984;19:3925–34.
- [60] Oksman K, Wallstrom L, Berglund LA, Toledo Filho RD. Morphology and mechanical properties of unidirectional sisal–epoxy composites. *J of Applied Polymer Science*. Vol: 2002; 84(13):2358–65.
- [61] Flavio de Andrade Silva, Nikhilesh Chawla, Romildo Dias de Toledo Filho. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibres. *J of Composites Science and Technology*. Vol: 68 (2008) 3438–3443
- [62] Romildo Dias Toledo Filho, Flavio de Andrade Silva, E.M.R. Fairbairn, João de Almeida Melo Filho. Durability of compression melled sisal fibre reinforced mortar laminates. *J of Construction and Building Materials*. Vol : 23 (2009) 2409–2420.
- [63] Gram HE. Durability of natural fibres in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo.; 1983. p. 225.
- [64] Walker JCF. Primary wood processing: principles and practice. Chapman and Hall; 1993.

## LIST DE REFERENCES

- [65] Wayne's Word. Major part of chemical compounds in plants & animals – Part II Phenolic compounds glycosides & alkaloids, <http://waynesword.palomar.edu/chemid2.htm#lignin>; 2006 [accessed 17.04.06].
- [66] Velpari V, Ramchandran BE, Bashkaron TA, Pai BC, Balasubramanian N. Alkali resistance of fibres in cement. *J of Materials Science*. Vol: 1980;15:1570–84.
- [67] A. Bessadok, D. Langevin, F. Gouanvé, C. Chappey, S. Roudesli, S. Marais. Study of water sorption on modified Agave fibres. *J of Carbohydrate Polymers*. Vol: 76 (2009) 74–85.
- [68] MICHEL FONTANILLE., YVES GNANOU., *Chimie et Physico-chimie Des Polymères (cours), 2e et 3e cycles , Ecoles d'ingénieurs., Nouvelle présentation 2005*. Dunod, Paris, 2002, p. 4-8 et 478-485.
- [69] Dimitris, Kottas. *Architecture et construction : Le plastique*. sl. Link, 1996.
- [70] D.C.Miles et J.H.Briston. *Technologie des polymères*. Paris : Dunod Edition, 1968.
- [71] *Connaissance de polyéthylènes*. Société ELF ATCHER: s.n., 1995.
- [72] M.Carrega. *Matières plastiques*. franc : 2ème Edition, 2007.
- [73] Comparaison entre les polyéthylènes haute et basse densité. [www.polyéthylène haute densité](http://www.polyéthylène haute densité). [En ligne] [Citation : 17 4 2018.]
- [74] J.Bost. *Matière plastique*. France : 2ème Edition, 1985.
- [75] C.Peru. *Polyéthylène haute densité PEHD, Techniques d'Ingénieur*. Paris : s.n, 2008. AM3315.
- [76] R.Dossogne. *Polyéthylène haute densité, Technique d'Ingénieur*. France : s.n, 1996.
- [77] *matières plastiques*. M.Carrega. Paris : s.n. 2005-2009.

**RÉSUMÉ**

La production de matériaux composites se développe rapidement dans un monde thermo physique et mécanique amélioré (densité à 23 °C élasticité, température de ramollissement et indice de fusion). Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux composites. Il s'agit en effet d'une ressource renouvelable et naturellement biodégradable et possède de nombreuses qualités mécaniques. La fibre de sisal est une fibre végétale avec de bonnes caractéristiques qualitatives, elle est disponible en abondance dans notre pays et se distingue par son faible coût. L'intérêt particulier de ces fibres réside dans leurs bonnes propriétés qualitatives, les fibres végétales étant de plus en plus utilisées comme moyen de renforcement des matrices polymères. Le motif derrière l'utilisation de ces fibres est une combinaison de respect de l'environnement et de viabilité économique. L'apport de combiner des fibres de sisal avec du polyéthylène haute densité dans différentes proportions par le mélangeur, nous a conduit à un matériau composite de polyéthylène haute densité (PEHD) et de fibres de sisal avec les caractéristiques thermomécanique meilleures. Ainsi, les objectifs de ce travail ont été atteints avec les matériaux composites les plus prometteurs qui ont un tonnage compris entre 10 et 20 % de fibres de sisal. **Mots clés :** Matériau composite, fibre de sisal, polyéthylène haute densité.

**ABSTRACT**

The production of composite materials is developing rapidly in an improved thermo-physical and mechanical world (density at 23 °C elasticity, softening temperature and melt index). Vegetable fibres are increasingly used as a reinforcement in composite materials. It is indeed a renewable and naturally biodegradable resource and has many mechanical qualities. Sisal fibre is a vegetable fibre with good qualitative characteristics; it is available in abundance in our country and is distinguished by its low cost. The particular advantage of these fibres lies in their good qualitative properties, plant fibres being used more and more as a means of reinforcing polymer matrices. The motive behind the use of these fibres is a combination of environmental friendliness and economic viability. The contribution of combining sisal fibres with high-density polyethylene in different proportions by the mixer, led sisal fibres and us to a composite material of high-density polyethylene (HDPE) with the best thermomechanical characteristics. Thus, the objectives of this work were achieved with the most promising composite materials, which have a tonnage of between 10 and 20% sisal fibres.

Key words: Composite material, sisal fibre, high-density polyethylene

نبذة مختصرة

يتطور إنتاج المواد المركبة بسرعة في عالم المحراري فيزيائي ميكانيكي محسن (الكثافة عند مرونة 23 درجة مئوية ودرجة حرارة التليين مؤشر الذوبان). تستخدم الألياف النباتية بشكل متزايد كعزز في المواد المركبة. إنها بالفعل مورد متجدد وقابل للتحلل البيولوجي بشكل طبيعي وله العديد من الصفات الميكانيكية. ألياف السيزال هي ألياف نباتية ذات خصائص جيدة، وهي متوفرة بكثرة في بلادنا وتتميز بتكلفتها المنخفضة. تكمن الميزة الخاصة لهذه الألياف في خصائصها النوعية الجيدة، حيث يتم استخدامها مع الألياف النباتية أكثر فأكثر كوسيلة لتعزز مصفوفات البوليمر. الدافع وراء استخدامها هو الألياف هو مزيج من صداقة البيئة والجدوى الاقتصادية. (HDPE) إن مساهمة الخلاط في الجمع بين ألياف السيزال والبولي إيثيلين عالية الكثافة بنسب مختلفة، قادتنا إلى مادة مركبة من البوليايثيلين عالية الكثافة وألياف السيزال المعافض للخصائص الحرارية الميكانيكية. وبالتالي، تمت تحقيق أهداف هذا العمل باستخدام أكثر المواد المركبة الواعدة التي تتبرر أو حملتها بين 10 و 20 ٪ من ألياف السيزال.

الكلمات المفتاحية: مادة مركبة، ألياف السيزال، بولي إيثيلين عالية الكثافة