



**Ministère de l'enseignement supérieure  
et de la recherche scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**



**Département de Génie Civil**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MASTER**

**FILIERE : Génie Civil**

**SPECIALITE : Matériaux**

**THEME**

***L'effet du traitement des fibres naturelles sur  
l'endommagement d'un béton polymère***

**Dirigé par :  
Pr. Rahmouni Zine El Abidine  
Dr. Rokbi Mansour**

**Présenté par :  
Omri Imen Yamina**

**Promotion : 2014/2015.**

# Remerciement

*Le premier remerciement c'est pour dieu qui nous a permis d'être dans cette situation et d'avoir cette formation.*

*Merci, chers parents, vous source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.*

*Merci, « **Pr Rahmouni. Zine Abiddine** » et « **Dr Rokbi Mansour** » qui ont encadré ce travail, pour leur disponibilité, ainsi que pour leurs soutiens tout au long de réalisation de ce projet.*

*Je remercie aussi « **Mr. Baali Brahim** » le directeur de Maghreb pipe qui aide moi au cours de mon travaille et donne tout les besoins au niveau du laboratoire.*

*Je remercie les membres des jurys et le responsable du hall Technologique « **Mr. Herizi** », « **Khaldoun Abdraouf** », « **Dr. Belouadh Zouhir** » ainsi de laboratoire des matériaux non métallique et mécanique de précision à l'université de Sétif.*

*Je remercie aussi mon amie « **Aiche Fatima Zahra** » et « **Baali Selma** » qui m'ont soutenu dans ce travail de recherche.*

*Enfin je remercie la directrice « **AL-SAWARI** » « **Mme.Sarmouked.Farida** » qui m'a donnée des conseils au cours du stage et dans mon domaine de spécialité.*

*Et toutes mes amies de spécialités « **Matériaux de construction** ».*

*Et tous mes enseignants du département de génie civil surtout « **Mr. Baali Aide** » qui m'a encouragé à donner le meilleur de moi-même en assurer une formation aussi meilleure que possible.*

*« **Imen yamina** »*

# Dédicace

## Dédicace

*Je dédie premièrement mon travaillé à mes très chers  
parents : « **Khaled** » et « **Sabrina** ».*

*Et ma grand famille : « **Omri** » et « **Hadj Chadi** ».*

*Je dédie mes frères: « **Abdraouf et Mohamed Yassine** » et ma sœur unique  
« **Khalida** ».*

*Je dédie à mes chers grands parents « **Mohamed** » et « **Djamila** » qui sont  
toujours donnée des conseils pour ma vie.*

*A mes  
tantes « **Souhila** », « **Ghaina** », « **Souade** », « **Habiba** », « **Tahar** », « **Fathie** »  
et surtout ma petite tante « **Amina** » qui a été toujours avec moi donne mon  
cycle d'étude.*

*« **Imen Yamina** »*

# *Résumé*

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des ressources naturelles telles que les fibres végétales en les utilisant comme renfort du béton polymère. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, compression et rupture.

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de l'introduction des fibres de Doum et fibres d'Alfa dans un béton polymère. Ainsi que l'influence du traitement chimique par 2% de NaOH. Les résultats des tests sur les différentes éprouvettes en bétons polymères renforcés par ces fibres, montrent que la solution NaOH a un effet significatif surtout sur le comportement à la flexion trois points, compression et la rupture. Les résultats de ce travail suggèrent que les fibres de Doum sont comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort dans des matrices polymériques. Elles sont complètement aptes à l'utilisation comme renfort dans les bétons polymères.

**Mots clés :** renforcement, fibres végétales, traitement chimique, béton polymère, fibres de Doum, fibres d'Alfa.

# ***Abstract***

The objective of this work is the valorisation of natural resources such as vegetable fibres using them as reinforcement of the polymer concrete. For reduced environmental impact and improve the mechanical behavior of concrete in bending, compression and rupture.

In this work, we studied the effect of the introduction of Doum fibres and fibres of Stipa Tenacissima in a polymer concrete. Thus the influence of chemical treatment with 2% NaOH. The results of tests on different test specimens concrete these fibre-reinforced polymers show that the NaOH solution at a significant impact especially on bending behaviour three points, compression and the rupture. The results of this work suggest that the fibers of Doum are comparable with other natural fibres used as reinforcement in polymeric matrices. They are completely situables for the use as reinforcement in concrete polymers.

**Keywords:** reinforcement, vegetales fibers, chemical treatment, concrete polymer, Doum fibers, Stipa Tenacissima fibers.

## ملخص

الهدف من هذا العمل, هو استغلال الموارد الطبيعية مثل الألياف النباتية باستخدامها كتعزيزات ملموسة في الخرسانة البوليميرية. لتقليل الأثر البيئي، وتحسين السلوك الميكانيكية للخرسانة في الانحناء وضغط وتمزق

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير إدخال ألياف الدوم والحلفاء على الخرسانة البوليميرية, بالإضافة إلى ذلك تأثير المعالجة كيميائية ب 2% من هيدروكسيد الصوديوم. وأظهرت نتائج الاختبارات على عينات مختلفة من الخرسانة البوليميرية المدعمة بالألياف إن محلول هيدروكسيد الصوديوم له تأثير كبير على سلوك هذه المواد في تجربة الانحناء الثلاثي, الضغط وتمزق أيضا.

نتائج هذه الدراسة تشير إلى أن ألياف الدوم يمكن مقارنتهم مع الألياف الطبيعية الأخرى المستخدمة كتعزيز في الخرسانة البوليميرية. فهي مناسبة تماما لاستخدامها كتعزيز في الخرسانة البوليميرية.

**المفاتيح :** التدعيم, ألياف نباتية, معالجة الكيماوية, الخرسانة البوليميرية, ألياف الدوم, ألياف الحلفاء.

# *Sommaire*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les constituants des matériaux composites.....	5
I.2.1. La matrice .....	5
I.2.1.1. La matrice organique.....	5
a) les matrices thermodurcissables (TD) .....	5
b) les matrices thermoplastiques (TP) .....	7
I.2.1.2. La matrice minérale .....	9
a) la matrice céramique .....	9
b) la matrice métallique .....	9
I.3. Les renforts .....	9
I.3.1. Les type des renforts .....	10
I.3.2. Architecture des renforts.....	13
I.4. Relation matrice – renfort .....	14
I.5. Charge et additifs .....	14
I.6. Les caractéristiques générales des matériaux composites.....	15
I.7. Structure du composite.....	15
I.7.1. Les monocouches.....	15
I.7.2. Les stratifiées .....	16
I.7.3. Les sandwichs .....	16
I.8. Avantages et inconvénients des composites .....	17
I.9. Conclusion .....	17

## Chapitre II : Généralités sur les fibres végétales

II.1. Introduction.....	19
II.2. Définition des fibres naturelles .....	19
II.3. Classification des fibres naturelles .....	19
II.4. Définition de la fibre végétale .....	20
II.4.1. Classification des fibres végétales .....	20

II.4.2. La composition chimique d'une fibre végétale.....	21
II.4.3. Propriétés usuelles des fibres végétales .....	22
II.4.3.1. Propriétés physiques des fibres végétales .....	22
II.4.3.2. Propriétés mécaniques des fibres végétales .....	22
II.4.3.3. Propriétés chimiques des fibres végétales.....	23
II.4.3.4. Propriétés écologiques des fibres végétales.....	23
II.4.3.5. Autres propriétés spéciales sur les fibres végétales .....	23
II.4.4. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites .....	24
II.5. Les différents renforcements à base de fibres végétales .....	24
II.5.1. Le chanvre .....	25
II.5.2. Le lin.....	25
II.5.3. Le Coton .....	26
II.5.4. L'Abaca.....	26
II.5.5. Le Kenaf .....	27
II.5.6. Le Jute.....	27
II.5.7. Le Sisal .....	27
II.5.8. Le Ramie.....	28
II.5.9. Le Coco.....	28
II.5.10. Palmier dattier.....	29
II.5.11. Alfa .....	29
II.6. L'utilisation des fibres végétales dans le domaine de génie civil.....	30
II.7. Conclusion.....	30

### Chapitre III : Généralités sur le béton polymère

III.1. Introduction .....	32
III.2. La composition principale d'un béton polymère .....	32
III.3. Les caractéristiques principales des bétons polymères.....	33
III.3.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton polymère .....	33
III.3.2. Caractéristiques physiques d'un béton polymère .....	34
III.3.3. Caractéristiques chimiques d'un béton polymère.....	34



III.3.4. Caractéristiques hydrauliques d'un béton polymère .....	34
III.4. Les principaux avantages et les inconvénients du béton polymère .....	34
III.4.1. Les avantages d'un béton polymère .....	34
III.4.2. Les inconvénients d'un béton polymère .....	35
III.5. La comparaison entre un béton polymère et un béton ordinaire .....	35
III.6. Les différentes applications d'un béton polymère .....	36
III.6.1. L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil .....	36
III.6.2. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques .....	36
III.6.3. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture .....	37
III.6.4. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussées et planchers .....	37
III.6.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie .....	38
III.6.6. L'utilisation des bétons polymère comme isolation phonique .....	38
III.7. Conclusion .....	39

## Chapitre IV : Théorie de mécanique de rupture

IV.1. Introduction .....	40
IV.2. L'endommagement et la rupture des matériaux .....	40
IV.2.1. L'endommagement des matériaux .....	40
IV.2.2. Rupture des matériaux .....	40
IV.3. Fissure et modes de rupture .....	41
IV.4. Théorie de la mécanique de rupture .....	41
IV.4.1. Approche énergétique ou Approche de Griffith .....	41
IV.4.2. Approche en termes d'intensité de contrainte .....	42
IV.4.3. Taux de restitution d'énergie $G$ .....	44
IV.5. L'application de la mécanique de rupture des matériaux .....	47
IV.6. Cas d'une éprouvette fissurée en flexion trois points .....	47
IV.7. Conclusion .....	48

## Chapitre V : matériaux et techniques expérimentales

V.1. Introduction .....	50
V.2. Caractéristiques principales pour chaque matériau utilisé .....	50
V.2.1. Résine polyester .....	50
V.2.1.1. Caractéristiques des résines polyester .....	51

V.2.1.2. Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester .....	51
V.2.2. Silice .....	52
V.2.3. Techniques de préparation et d'extraction des fibres utilisées .....	53
Fibres de verre .....	53
V.2.3.1. Préparation des fibres d'Alfa .....	53
V.2.3.2. Préparation des fibres de palmier Doum .....	54
V.2.3.3. Traitement chimique des fibres .....	55
Traitement des fibres Alfa .....	55
Traitement des fibres de Doum .....	56
V.2.3.4. Traitement thermique des fibres végétales .....	57
V.2.3.5. Longueur choisi pour fibres .....	57
V.3. Technique de moulage .....	58
V.3.1. Préparation des moules utilisées .....	58
V.3.2. Elaboration des éprouvettes en béton polymères .....	59
V.3.3. Le traitement thermique du béton polymère élaboré .....	61
V.4. Essais mécaniques appliqués sur le béton polymère renforcé et non renforcé .....	62
V.4.1. Essai de flexion trois points (FTP) .....	62
V.4.2. Essai de compression .....	63
V.4.3. Essai de la rupture .....	64
V.5. Conclusion .....	65

## Chapitre VI : résultats et discussions

VI.1. Propriétés mécanique des Bétons Polymères en flexion trois points .....	67
VI.1.1 Analyse des courbes contrainte-déformation des bétons polymères .....	67
VI.1.2. Analyse des modules en flexion .....	70
VI.2. Analyse de la résistance à la compression .....	72
VI.3. Paramètre de rupture ( $K_R$ ): .....	73
VI.4. Faciès de rupture des bétons polymères .....	74
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	75
<b>Références bibliographiques</b>	

## *Liste des tableaux*

Tableau. I.1 : Caractéristiques principales des matrices thermodurcissables (TD) [4].....	7
Tableau. I.2 : Caractéristiques principales des matrices thermoplastiques (TP) [4]. ....	8
Tableau. I.3 : Principales différences entre matrices TP et TD [4]. ....	9
Tableau. I.4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [4]. ....	13
Tableau II.1 : Propriétés usuelles des fibres végétales [19]. ....	23
Tableau II.2 : Composition chimique de quelques fibres végétales [20]. ....	23
Tableau II.3 : Principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales [19].....	24
Tableau. III.1 : Propriétés mécaniques de différents types de béton polymère et béton de ciment [24] .....	35
Tableau. V.1 : Différentes caractéristiques de la résine polyester [33].....	51
Tableau.V.2 : Différents avantages et les inconvénients de résine polyester insaturée [34] .....	52
Tableau.V.3 : Taux de chaque composante.....	61
Tableau.VI.1 : Différentes résistances en compression des bétons polymères testés.....	73
Tableau.VI.2 : La différence de faciès de rupture entre les fibres traitées et non traitées.....	76

## *Liste des figures*

Fig. I.1 : Représentation schématique d'un matériau composite.....	4
Fig. I.2 : Classification de différentes familles de matrice.....	5
Fig. I.3 : Différents types de renfort de base.....	10
Fig. I.4 : Fibre de verre (a) fibre courte, (b) tisse. ....	11
Fig. I.5 : Fibres de carbone.....	11
Fig. I.6 : Fibres d'aramide.....	11
Fig.I.7 : Fibres de polyéthylènes.....	12
Fig. I.8 : Fibres naturelles.....	12
Fig. I.9 : Différents assemblages de textures.....	14
Fig. I.10 : Composite stratifié.....	16
Fig. I.11 : Panneaux sandwichent. ....	17
Fig. II.1 : Classification des fibres naturelles selon à l'origine.....	20
Fig.II.2 : Classification des fibres végétales selon l'origine. ....	21
Fig. II.3 : Différents constituants d'une fibre végétale.....	22
Fig. II.4 : Plante de chanvre et les fibres de chanvre. ....	25
Fig. II.5 : Plante du lin et les fibres de lin.....	26
Fig.II.6 : Plante et fibres naturelles de coton. ....	26
Fig. II.7 : Plante de l'abaca et les fibres de l'abaca.....	27
Fig. II .8 : Plante de Kenaf avec ces fibres. ....	27
Fig. II.9 : Jute : (a) plante, (b) tisse, (c) fibres.....	28
Fig. II.10 : Fibres naturelles du Sisal.....	28
Fig. II.11 : plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie. ....	29
Fig. II.12 : Fibres naturelles de la plante du Coco. ....	29
Fig. II.13 : Palmier et les fibres de palmier dattier. ....	30
Fig. II.14 : Plante et les fibres d'Alfa.....	30
Fig. III.1 : Béton polymère. ....	32

Fig. III.2 : Mise en oeuvre d'une plaque de béton polymère [24].	33
Fig. III.3 : Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment.	36
Fig. III.4 : Caniveaux en béton polymère pour le drainage.	37
Fig. III.5 : Bacs de fleurs par béton polymère.	37
Fig.III.7 : Pont de Brooklyn à New York.	38
Fig. III.8 : Quelques applications de béton polymère (industrie).	38
Fig. III.9 : Quelques applications du béton polymère pour l'isolation.	39
Fig.IV.1 : Différents modes de rupture.	41
Fig.IV.2 : Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « 2a ».	42
Fig.IV.3 : Cas d'une éprouvette de flexion trois points (FTP).	43
Fig. IV.4 : Rupture d'un corps sous (a) déplacement imposé, (b) charge imposée.	46
Fig.IV.6. Cas d'une éprouvette fissurée en flexion trois points	47
Fig. V.1 : Cycle de polymérisation de résine polyester.	51
Fig.V.2 : Sable de silice.	52
Fig.V.3 : Courbe d'analyse granulométrique de la silice utilisée.	53
Fig.V.4 : Fibres de verre : (a) roving de fibre de verre, (b) fibres de verre coupées.	53
Fig. V.5 : Préparation des fibres Alfa : (a) immergées des tiges dans l'eau, (b) fibres d'Alfa.	54
Fig.V.6 : Plante de palmier Doum.	55
Fig. V.7 : Foliole de Doum : (a) immergées dans l'eau, (b) après l'extraction.	55
Fig. V.8 : Traitement de fibre Alfa par NaOH.	56
Fig.V.9: (a) Traitement d'Alfa par $H_2SO_4$ pour éliminer les traces de NaOH, (b) Fibre d'Alfa traitées.	56
Fig. V.10: (a) Folioles de Doum traitées par 2% NaOH, (b) folioles de Doum traitées par 2% $H_2SO_4$ .	57
Fig. V.11 : Fibres de Doum extraites par 2% NaOH.	57
Fig.V.12 : Etuve de séchage à 70°C.	57
Fig.V.13 : Mesure de la longueur des différentes fibres utilisées.	58
Fig.V.14 : Différentes fibres courtes utilisées.	58
Fig. V.15 : (a) Moule utilisé pour éprouvettes lisses (FTP), (b) Moule pour éprouvettes fissurées.	59
Fig.V.16 : Etapes de moulage de béton polymère par contact.	61

<b>Fig. V.17 : Eprouvettes lissés en BP, (a) et (b).</b> .....	<b>61</b>
<b>Fig. V.18 : Eprouvettes fissurés en BP : (a) BP non renforcé, (b) BP renforcé par Doum non traité.....</b>	<b>62</b>
<b>Fig.V.19 : Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BP.</b> .....	<b>63</b>
<b>Fig.V.20 : Essai de compression sur des éprouvettes lissées en BP.....</b>	<b>64</b>
<b>Fig.V.21 : a) Eprouvettes entaillées fissurées pour l'essai de rupture, b) L'appariel UTM.....</b>	<b>64</b>
<b>Fig.VI.1 : Principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points (FTP).</b> .....	<b>67</b>
<b>fig.VI.2 : Courbes d'evolution des contraintes en fonction de déformation des différents bétons polymères.</b> .....	<b>68</b>
<b>Fig.VI.3 : Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère renforcé et non renforcé par des fibres.</b> .....	<b>69</b>
<b>Fig.VI.4 : Effet de traitement chimique (2% NaOH) sur la contrainte du BP.</b> .....	<b>70</b>
<b>Fig.VI.5 : Paramètre de flexion des éprouvettes testés (Module de Young).</b> .....	<b>71</b>
<b>Fig.VI.6 : Effet de traitement chimique (2% NaOH) sur le module de flexion du BP.....</b>	<b>72</b>
<b>Fig.VI.8: Paramètre de rupture des éprouvettes en bétons polymères testés.</b> .....	<b>74</b>
<b>Fig.VI.9: Faciès de rupture :a) BP-DNT (Doum non traitée), b) BP-DT (Doum traitée).</b> .....	<b>75</b>
<b>Fig.VI.10: Faciès de rupture :a) BP-ANT (Alfa non traitée), b) BP-AT (Alfa traitée).</b> .....	<b>75</b>
<b>Fig.VI.11 : Faciès de la rupture :a) BP-FDV (fibres de verre), b) BP non renforcé.....</b>	<b>77</b>

## *Liste des symboles*

$M_v$	Masse volumique.
$E$	Module d'élasticité.
$G$	Module de cisaillement.
$A$	Allongement à la rupture.
$\alpha$	Coefficient de dilatation thermique.
$W_p$	L'énergie potentielle du solide.
$\nu$	Coefficient de poisson.
$\gamma_s$	L'énergie surfacique de rupture.
$W_s$	L'énergie de création d'une surface.
$\sigma$	Contrainte axiale.
$K_I$	L'intensité de contrainte.
$Y$	Facteur de correction de la géométrie.
$a$	Longueur de fissure.
$\gamma_p$	L'énergie plastique.
$\Phi$	L'énergie de déformation.
$G$	Taux de restitution d'énergie.
$W_F$	Travail externe effectué par la force.
$G_c$	Travail critique de rupture.
$\sigma_R$	Contrainte à la rupture.
$h$	Largeur de l'éprouvette.
$L$	Distance entre les appuis de flexion.
$P$	La charge maximale à la flexion.
$\sigma_f$	Contrainte à la flexion de trois points.
$E_f$	Module de flexion.
$R_c$	Résistance à la compression.
$K_R$	Facteur d'intensité de contrainte à la rupture.
$I$	Moment d'inertie.
$f$	La flèche du flexion.
$S$	Section de l'éprouvette.
$F$	Charge maximal à la compression.

## *Liste des abréviations*

CMO Composite à matrice organique.

CMC Composite à matrice céramique.

CMM Composite à matrice minérale.

TD Matrice thermodurcissable.

TP Matrice thermoplastique.

PA Polyamide.

PET Polytéréphalate éthylénique.

POM Polyoxyméthylène.

PC Polycarbonate.

PPS Polysulfure de phénylène.

PP Polypropylène.

HM Fibre haute module.

HR Fibre haute résistance.

HP Composite haute performance.

BP Béton polymère non renforcé.

BP-FDV Béton polymère renforcé par fibres de verre.

BP-DNT Béton polymère renforcé par fibres de Doum non traité.

BP-DT Béton polymère renforcé par fibres de doum traité 2% NaOH.

BP-ANT Béton polymère renforcé par fibres d'Alfa non traité.

BP-AT Béton polymère renforcé par fibres d'Alfa traité 2% NaOH.

FTP Essai de flexion trois points.



## *Introduction générale*

Dans le cadre du développement et la technologie, l'utilisation des matériaux innovants à crée une compétition dans tous les domaines de l'industrie tels que le transport aéronautique, l'industrie automobile et surtout dans la construction. Le béton polymère, fabriqué avec des matériaux composites consolidés par des renforts synthétiques, est caractérisé par un bon comportement mécanique par rapport au béton traditionnel. De plus, l'utilisation des fibres synthétiques provoque des effets néfastes sur l'environnement et la santé publique, donc pour limiter ces problèmes on cherche un caractère éco-environnemental. Pour remédier, on utilise des ressources naturelles et renouvelables comme renfort telles que les fibres cellulosiques. Ces fibres peuvent conduire à des produits ayant de bonnes performances ainsi de bonne aptitude à la mise en forme. Le nombre d'étude concernant ces nouveaux matériaux est en continuelle augmentation et leur développement représente un enjeu important. Les travaux antérieurs ont pu mettre en évidence leurs avantages et leurs limitations intrinsèques.

L'objectif ce travail consiste à apporter une contribution à la valorisation des ressources naturelles locales, qui sont le palmier Doum et fibre Alfa grâce à leur faible cout et leur disponibilité. Dans ce prétexte, nous avons pensé à l'utilisation des différents types des fibres à savoir le Doum et les fibres Alfa, disponibles dans notre région Hodna, comme renforts du béton polymère. Nous avons étudié particulièrement l'influence du traitement chimique de ces fibres sur le comportement mécanique du béton polymère. De plus, le comportement à la rupture de ce produit obtenu est aussi analysé pour déterminer la résistance et l'aptitude de tel matériau à la propagation de la fissure.

Notre mémoire comporte six chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les matériaux composites dans le cas général.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la classification et les propriétés essentielles des fibres végétales utilisés comme renforts.
- ❖ Le troisième chapitre présente une étude sur le béton polymère de point de vue caractéristique, utilisation ainsi qu'une comparaison avec les bétons ordinaires.
- ❖ Dans le quatrième chapitre, nous présentons quelques notions sur la théorie de la mécanique de rupture.

- ❖ Le cinquième chapitre est une étude expérimentale présentant la préparation et la procédure du traitement des fibres végétales. D'autre part, la formulation du béton polymère, les protocoles et ainsi que les conditions des tests sont établis.
- ❖ Le sixième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus avec des discussions.

Enfin une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futur.

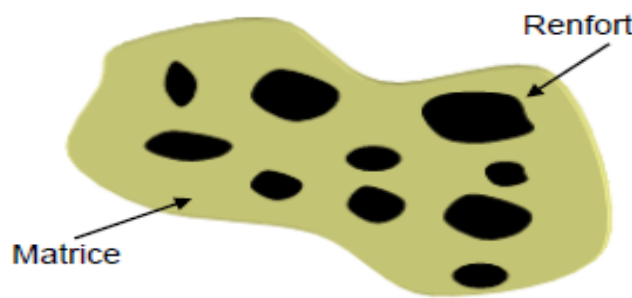
# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les matériaux composites**

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

### I.1. Introduction :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes (Fig.I.1), se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs parties discontinues réparties dans une partie continue. La partie discontinue, appelée renfort, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la partie continue, appelée matrice. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure [1].



**Fig. I.1 : Représentation schématique d'un matériau composite**

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qui peuvent être classés suivant différents critères. La nature de la matrice est un de ces critères qui permet de répartir les composites en trois grandes familles [2] :

- les Composites à Matrices Organiques (CMO), telles que les polymères organiques (résine thermodurcissable ou thermoplastique).
- les Composites à Matrices Céramiques (CMC) réservés aux applications à haute température.
- les Composites à Matrice Métallique (CMM).

Ces matériaux peuvent aussi être classés selon la nature du renfort, selon l'objectif recherché via leurs utilisations [2].

## I.2. Les constituants des matériaux composites :

### I.2.1. La matrice

La matrice (aussi appelé résine) a pour rôles d'enrober les renforts produisant le lien entre ceux-ci. Elle transmet les efforts aux fibres et les répartit dans les différentes directions. De plus, la matrice protège les fibres des agressions extérieures et permet l'obtention de la forme désirée par un procédé de moulage [3]. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la (Fig. I.2) [1].

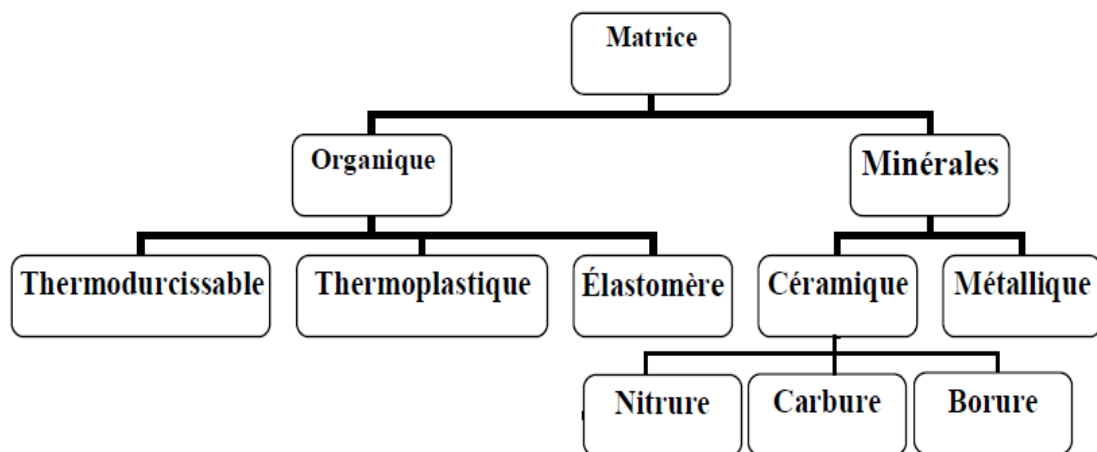


Fig. I.2 : Classification de différentes familles de matrice.

#### I.2.1.1. La matrice organique :

##### a) les matrices thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

Ces caractéristiques sont présentées dans le (Tableau.I.1) [1]. Les résines thermodurcissables principalement sont [4] :

- **Polyesters insaturés**

C'est la résine la plus utilisée dans l'application des composites de grande distribution. Cette résine contenant un monomère est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

- **Vinylester**

On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

- **Phénoliques**

Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

- **Epoxydes**

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- du durcissement à chaud ou à froid.
- de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

- **Polyuréthannes et polyurées**

Dans la fabrication de pièces composites, on utilise ce type surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule.

- **Polyimides**

Ces résines sont utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures ( $> 250\text{ °C}$ ). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.

- **Bismaléimides**

Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

Matrices Thermodurcissables	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Module D'élasticité (MPa)	Module De Cisaillement (MPa)	Coefficient De Poisson	Contrainte De rupture (MPa)	Allongement à rupture %	Coefficient de Dilatation Thermique °C <sup>-1</sup>
	M <sub>v</sub>	E	G	K	C <sub>r</sub>	A	α
<b>Epoxyde</b>	1200	4500	1600	0.4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
<b>Phénolique</b>	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1*10 <sup>-5</sup>
<b>Polyester</b>	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8*10 <sup>-5</sup>
<b>Polycarbonate</b>	1200	2400		0.35	60		6*10 <sup>-5</sup>
<b>Vinylester</b>	1150	3300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>
<b>Silicone</b>	1100	2200		0.5	35		
<b>Uréthane</b>	1100	700 à 7000			30	100	
<b>Polyimide</b>	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1	8*10 <sup>-5</sup>

Tableau. I.1 : Caractéristiques principales des matrices thermodurcissables (TD) [4].

**b) les matrices thermoplastiques (TP)**

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques (Tableau.I.2). Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle, sont des matrices réversibles [4].

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C) sont les suivantes [4] :

- **Polyamide (PA)** : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- **Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT)** : bonne rigidité, bonne ténacité.
- **Polycarbonate (PC)** : tenue au choc.

- **Polysulfure de phénylène (PPS)** : résistance à l'hydrolyse.
- **Polyoxyméthylène (POM)** : bonne tenue à la fatigue.
- **Polysulfurés (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- **Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants [4] :

- Polyamide-imide (PAI).
- Polyéther-imide (PEI).
- Polyéther-sulfone (PES).
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Matrices Thermoplastiques	Masse volumique (kg /m <sup>3</sup> )	Module D'élasticité (MPa)	Coefficient De poisson	Contrainte à la Rupture (MPa)	Allongement A rupture%	Coefficient de Dilatation Thermique °C <sup>-1</sup>
	M <sub>v</sub>	E	K	C <sub>r</sub>	A	$\alpha$
<b>PP</b>	900	1200	0.4	30	20 à 400	$9 \times 10^{-5}$
<b>PPS</b>	1300	4000		65	100	$5 \times 10^{-5}$
<b>PA</b>	1100	2000	0.35	70	200	$8 \times 10^{-5}$
<b>PES</b>	1350	3000		85	60	$6 \times 10^{-5}$
<b>PEI</b>	1150	3300		105	60	$6 \times 10^{-5}$
<b>PEEK</b>	1300	4000		90	50	$5 \times 10^{-5}$

**Tableau. I.2 : Caractéristiques principales des matrices thermoplastiques (TP) [4].**

Il est important de bien situer les différences fondamentales (Tableau.I.3) de ces deux types de matrices [4].



<b>Matrices</b>	<b>Thermoplastiques TP</b>	<b>Thermodurcissables</b>
<b>Etat de base</b>	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
<b>Stockage</b>	Illimité	Réduit
<b>Mouillabilité renforts</b>	Difficile	Aisée
<b>Moulage</b>	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
<b>Cycle</b>	Court	Long
<b>Tenue au choc</b>	Assez bonne	Limitée
<b>Tenue thermique</b>	Réduite	Bonne
<b>Chutes et déchets</b>	Recyclables	Perdus ou recyclés en charges
<b>Conditions de travail</b>	Propreté	Emanation pour « méthode humide »

**Tableau. I.3 : Principales différences entre matrices TP et TD [4].**

### **I.2.1.2. La matrice minérale :**

#### **a) la matrice céramique**

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [5].

#### **b) la matrice métallique**

Les composites à matrice métallique (CMM) possèdent une bonne tenue en température ainsi que de bonnes propriétés électrique et thermique. Par rapport aux métaux, ils ont une meilleure stabilité dimensionnelle, ainsi qu'une meilleure résistance à l'usure [5].

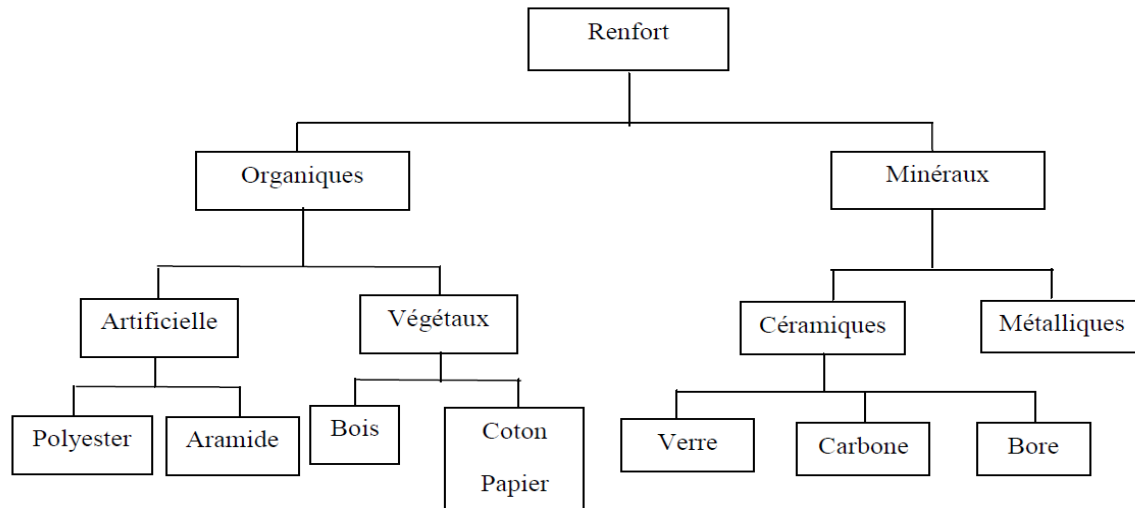
### **I.3. Les renforts :**

Les renforts sont les éléments qui contribuent majoritairement à la réponse mécanique du composite. Ils requièrent donc d'excellentes propriétés de résistance mécaniques (Tableau.I.4).

Mais aussi de bonnes propriétés thermiques, électriques ou encore chimiques suivant les applications [6].

Les renforts sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée [1].

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur (Fig.I.3) :



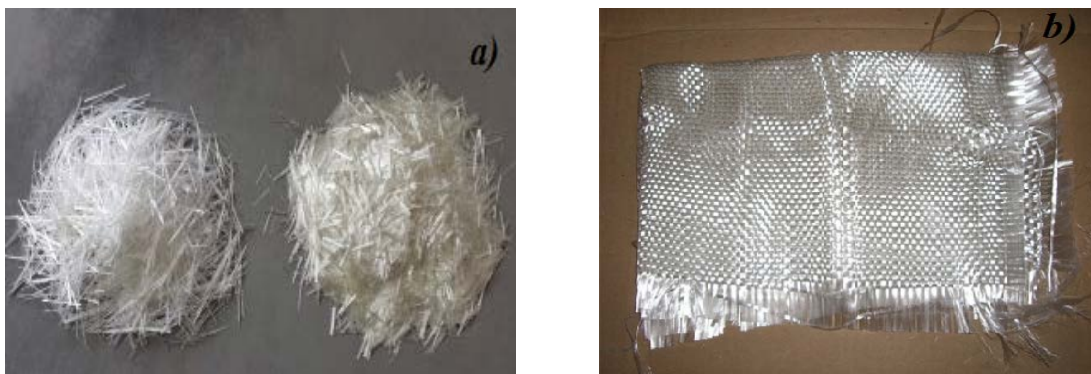
**Fig. I.3 : Différents types de renfort de base.**

### I.3.1. Les type des renforts :

#### a) Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion (Fig.I.4). Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore) [4]. On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.
- R : pour les composites hautes performances.
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



**Fig. I.4 : Fibre de verre (a) fibre courte et (b) tisse.**

**b) Fibre de carbone**

C'est la fibre la plus utilisée (Fig. I.5) dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile).



**Fig. I.5 : Fibres de carbone.**

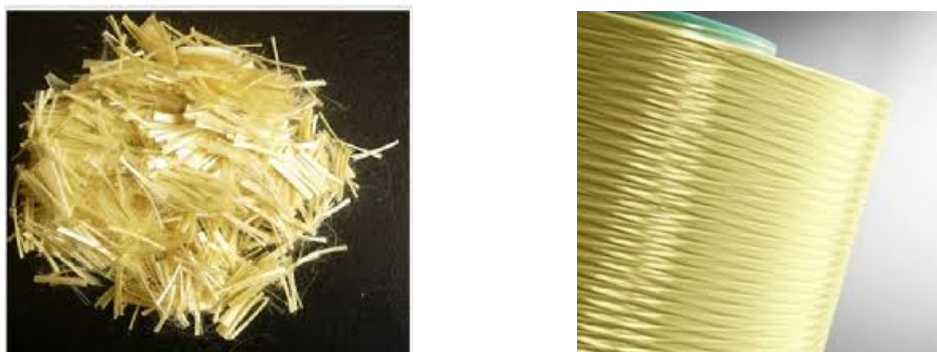
Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres [4] :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C.
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

**c) Fibre d'aramide**

La fibre d'aramide (Fig.I.6) est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes [4] :

- la fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- la fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



**Fig. I.6 : Fibres d'aramide.**

**d) Fibre de bore**

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène [4].

**e) Fibres de polyéthylène de haut module**

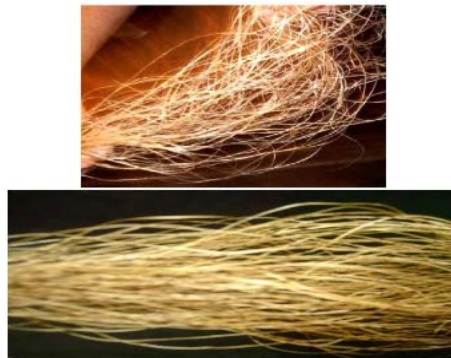
Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité (Fig.I.7). Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [4].



**Fig.I.7 : Fibres de polyéthylènes.**

**f) fibres naturelles**

Les fibres naturelles telles que le lin, le coton... etc, commencent à être utilisées de plus en plus souvent comme fibres de renfort dans les composites (Fig.I.8). C'est surtout dans le secteur automobile et la construction (profilés de portes et de fenêtres, bardages etc.), plus écologique et faible cout [6].



**Fig. I.8 : Fibres naturelles.**

Renforts	Diamètre Du Filament ( $\mu\text{m}$ )	Masse Volumique ( $\text{Kg/m}^3$ )	Module D'élasticité Longitudinal (MPa)	Module De Cisaillement (MPa)	Coefficient De poisson	Contrainte De Rupture (MPa)	Allongement à Rupture (%)	Coefficient De Dilatation Thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	D	Mv	E	G	K	$C_r$	A	$\alpha$
Verre E	16	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2500	86000		0.2	3200	4	$0.3 \cdot 10^{-5}$
CarboneHM	6.5	1800	390000	20000	0.35	2500	0.6	$0.08 \cdot 10^{-5}$
CarboneHR	7	1750	230000	50000	0.3	3200	1.3	$0.02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1450	130000	12000	0.4	2900	2.3	$-0.2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2600	400000			3400	0.8	$0.4 \cdot 10^{-5}$
Silicate D'alumine	10	2600	200000			3000	1.5	
Polyéthylène		960	100000			3000		

Tableau. I.4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [4].

### I.3.2. Architecture des renforts :

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée [4].

Il existe différentes géométries et textures de renforts [7] : les mats, les tissés, les unidirectionnels, les tricots et les multidirectionnels (Fig.I.9).

- **Les mats** : sont des nappes de filaments, de fibres discontinues, disposés sans orientations préférentielles et maintenus ensemble par un liant soluble. Ce sont des matériaux déformables dans leur plan et peu coûteux malgré des propriétés mécaniques moindres.

- **Les tissus** : sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires : chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures : la toile ou le taffetas, le sergé et le satin. L'armure contrôle la rigidité du tissu.
- **Les unidirectionnelles** : sont constituées de fils de chaînes maintenus par des fils de trame fins.
- **Les tricotés** : sont formés par bouclage d'un ou plusieurs fils et offrent de plus grandes possibilités de motifs que le tissage. Leur principale caractéristique est leur déformabilité.
- **Les multidirectionnels** : sont des structures 3D formées de fibres orientées dans plusieurs directions de l'espace. Les différentes couches sont liées entre elles, et dans l'objectif de mettre en forme les composites par estampage.

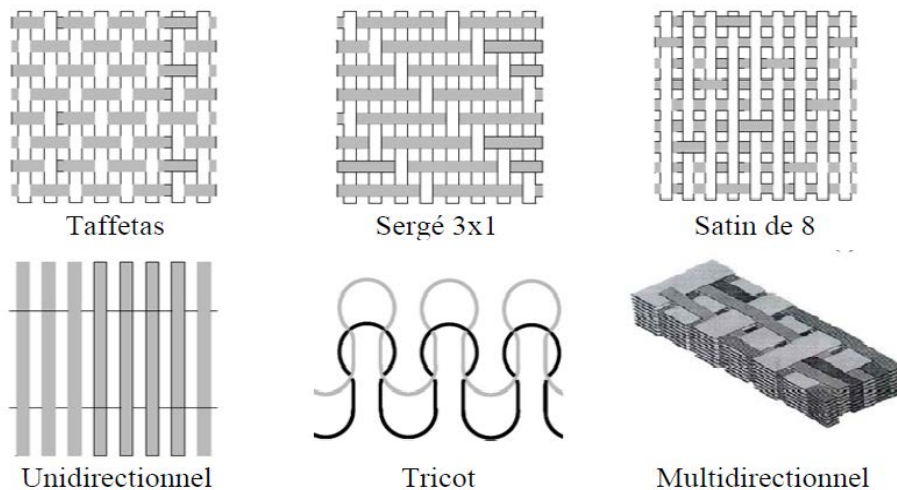


Fig. I.9 : Différents assemblages de textures.

#### I.4. Relation matrice – renfort :

Les performances d'un composite sont conditionnées par les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs et dépendent également très étroitement de l'adhésion, donc des interactions échangées entre le renfort et la matrice [8].

Les paramètres responsables de l'adhésion sont nombreux et ont des origines très différentes, ils se répartissent en trois classes [8]:

- ceux concernant le renfort (nature et composition du renfort, influence du taux et de la taille du renfort).
- ceux concernant la matrice.
- et enfin ceux relatifs à l'interface (épaisseur, forces interfaciales renfort – matrice)
- mouillabilité du renfort par la matrice, influence des impuretés).

## I.5. Charge et additifs :

### I.5.1. Les charge

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé [4].

Les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base.
- Mouillabilité et faible action abrasive.
- Uniformité de qualité et de granulométrie.
- **Les charges organiques** : utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables, Farines de bois, Fibres végétales, Amidons.
- **Les charges minérales** : Craies et carbonates, Les silices, Les talcs, Les argiles.
- **Oxydes et hydrates métalliques** : Alumine, Trioxyde d'antimoine, Les céramiques.
- **Le verre** : Poudres de verre, Billes de verres creuses.

### I.5.2. Les additifs

Les additifs améliorent l'apparence ou les propriétés du produit final. Les plus fréquemment utilisés sont les colorants, suivis des lubrifiants. Parmi les autres additifs, on retrouve les stabilisateurs de lumière, les agents de protection contre les rayons U.V., les agents antimicrobiens et les agents ignifuges [9].

## I.6. Les caractéristiques générales des matériaux composites :

Les principales caractéristiques des matériaux composites sont [10] :

- ❖ Le gain de masse.
- ❖ La bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée).
- ❖ L'absence de corrosion.
- ❖ L'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture).
- ❖ Le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur.
- ❖ L'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture...).
- ❖ Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne.

### I.7. Structure du composite :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types [11] :

#### I.7.1. 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, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

#### I.7.2. 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 (Fig.I.10). Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

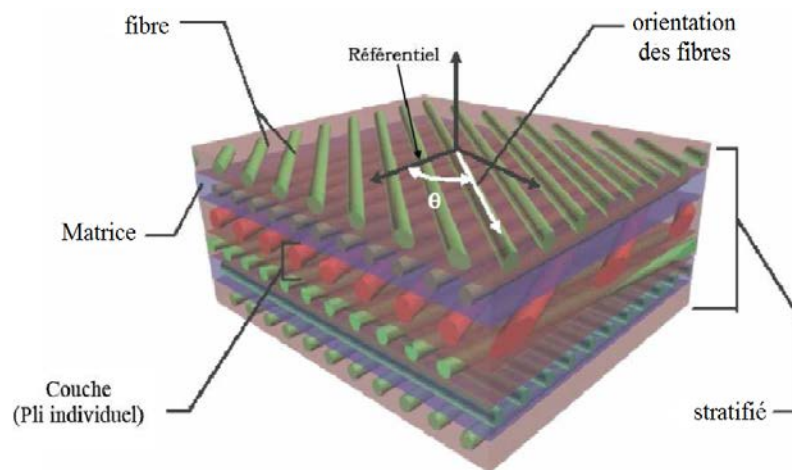


Fig. I.10 : Composite stratifié.

#### I.7.3. Les sandwichs

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau (Fig. I.11). 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, sont constituants par [11] :

- **Le noyau** : matériaux solide à faible densité, Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire, Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée.
- **La peau** : Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane,...etc.



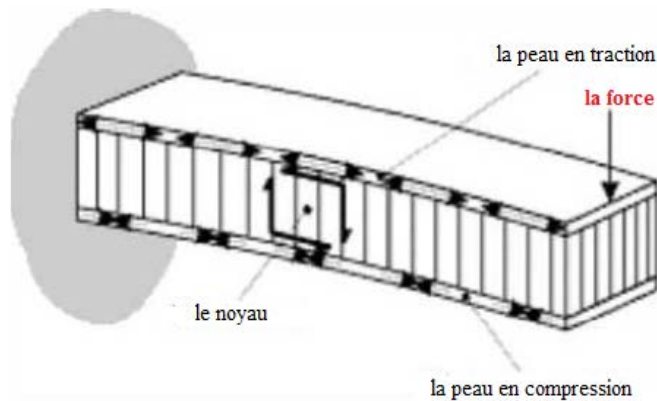


Fig. I.11 : Panneaux sandwichent.

## I.8. Avantages et inconvénients des composites :

### I.8.1. Avantages

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à [11]:

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

### I.8.2. Inconvénients

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion [11] :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

## I.9. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux innovants, caractérisés par un bon comportement mécanique, chimique et physique. Ces propriétés dépendent essentiellement de type et l'architecture de renfort avec des quelques charges et additifs, qui permettent d'utiliser ces matériaux dans tout les domaines.

# **Chapitre II :**

## **Généralités sur les fibres végétales**

## Chapitre II : Généralités sur les fibres végétales

### II.1. Introduction :

L'introduction des fibres naturelles dans des matrices polymères peut apporter des avantages notoires par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites (comme les fibres de verres). Les matériaux composites renforcés par des fibres végétales sont en cours de développement et leurs applications sont encore limitées mais ils sont amenés à jouer un rôle dans le domaine l'industrie future, notamment dans le domaine de la construction. Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Elles peuvent être classées selon plusieurs critères, leur nature chimique, leur longueur, leur origine.....etc [10].

### II.2. Définition des fibres naturelles :

C'est une matière que l'on trouve dans la nature et qui n'a pas besoin d'être transformée avant d'être travaillée [12]. Les fibres naturelles conduisent les composites biosourcée, peuvent aussi être classées selon leur origine, végétale et animale, minérale [13].

### II.3. Classification des fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont pour la plupart d'origine végétale et animale (Fig. II.1). Il y a :

- **Végétale** : Extraites de plantes, de fruits et d'arbres comme le coton, le lin, l'agave, le jute, le chanvre, etc [14].
- **Animale** : Extraites de poil d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, etc [14].
- **Minérale** : On trouve dans la nature des minéraux dont la texture fibreuse. Il s'agit d'une matière toxique, comme l'amiante [15].

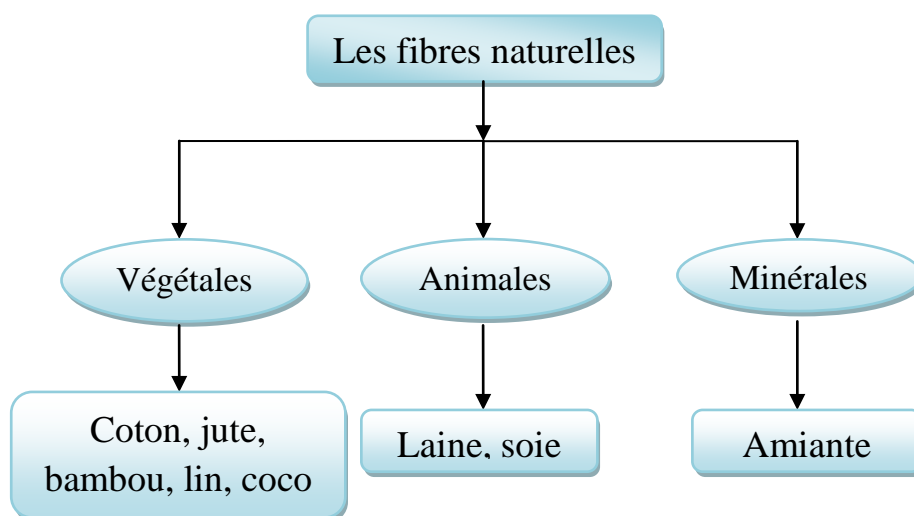


Fig. II.1 : Classification des fibres naturelles selon à l'origine.

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

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [16].

##### II.4.1. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (Fig.II.2) suivant leur provenance. A s'avoir [17] : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

- **Les fibres de feuilles**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides.

- **Les fibres de tiges**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité. Ces fibres sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Exemple : fibres de jute, de lin, de ramie, de kennaf, et de chanvre.

- **Les fibres de bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes.

- **Les fibres de surface**

Sont entourées en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Exemple : le Cotton et la noix de coco.

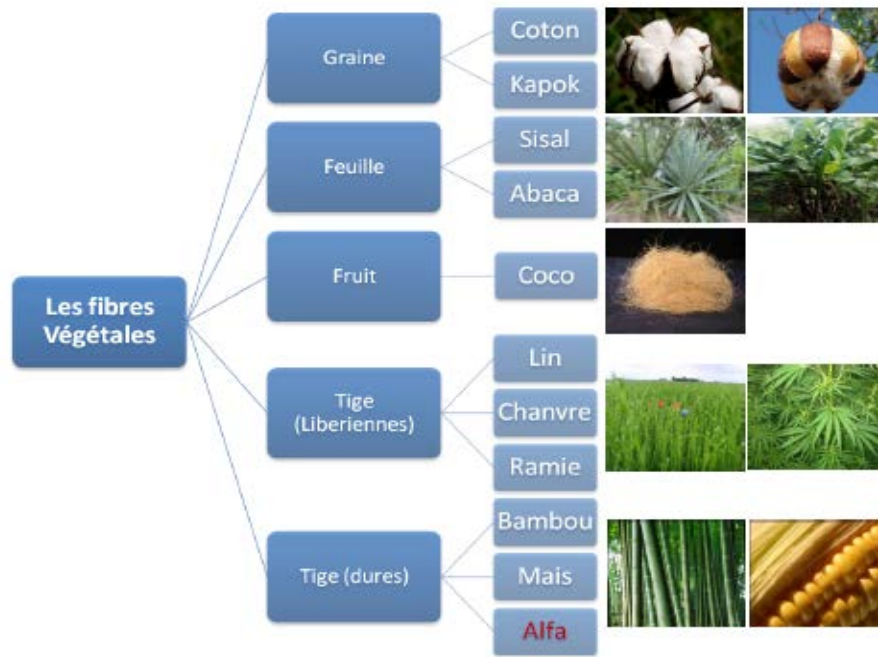


Fig.II.2 : Classification des fibres végétales selon l'origine.

#### II.4.2. La composition chimique d'une fibre végétale

La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée [18].

Les différents constituants des fibres végétales (Fig. II.3) sont [17] :

- **La Cellulose** : C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose.
- **Hémicellulose** : L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres.
- **Lignine** : La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel.

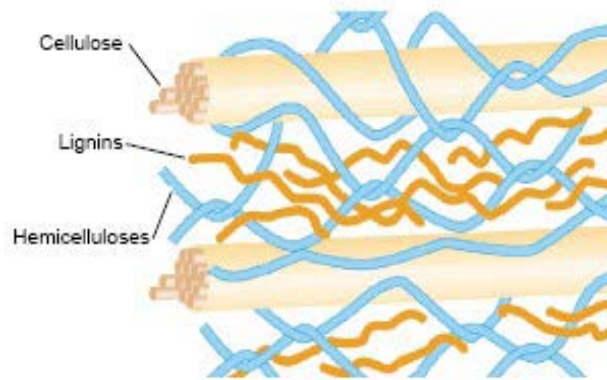


Fig. II.3 : Différents constituants d'une fibre végétale.

### II.4.3. Propriétés usuelles des fibres végétales

#### II.4.3.1. Propriétés physiques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée par son diamètre, sa densité, son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau [17].

#### II.4.3.2. Propriétés mécaniques des fibres végétales

Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [17]. Le (Tableau.II.1) présente les propriétés usuelles des fibres végétales.

Propriétés	Type de fibres							
	lin	chanvre	Jute	ramie	coco	sisal	abaca	Coton
<b>Densité</b>	1.4	1.48	1.46	1.5	1.25	1.33	1.5	1.51
<b>Résistance A la traction (MPa)</b>	800-1500	550-900	400-800	550	220	600-700	980	400
<b>Module D'élasticité (E) (GPa)</b>	60-80	70	10-30	44	6	38		12
<b>(E/densité) spécifique</b>	26-46	47	7-21	29	5	29		8
<b>Allongement A la rupture (%)</b>	1.2-1.6	1.6	1.8	2	15-25	2-3		3-10
<b>Absorption D'eau (%)</b>	7	8	12	12-17	10	11		8-25

Tableau II.1 : Propriétés usuelles des fibres végétales [19].

### II.4.3.3. Propriétés chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique (Tableau.II.2) qui influe énormément sur leur durabilité et spécialement dans les milieux alcalins [17].

Fibres naturelles	Cellulose %	Hémicellulose %	Lignine %	Pectine %	Graisses %	Eau %	Angle de Microfibrille (°)
<b>Chanvre</b>	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8	6.2-12	2-6.2
<b>Lin</b>	71	18.6-20.6	2.2	2.3	1.7	8-12	5-10
<b>Jute</b>	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	0.5	12.5-13.7	8
<b>Coton</b>	85-90	5.7	-	0-1	0.6	7.85-8.5	-
<b>Sisal</b>	66-78	10-14	10-14	10	2	10-22	10-22
<b>Ramie</b>	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	7.5-17	0.3	7.5
<b>Kenaf</b>	45-57	21.5	8-13	3-5	-	-	-
<b>Palmier Dattier</b>	41-45	6-10	30-40	-	1.2	-	-

Tableau II.2 : Composition chimique de quelques fibres végétales [20].

### II.4.3.4. Propriétés écologiques des fibres végétales [14]

- La fibre végétale sont naturel pas d'irritation pour la peau.
- Plus de confort pendant la manipulation et renouvelables.

### II.4.3.5. Autres propriétés spéciales sur les fibres végétales

La fibre végétale contient plusieurs propriétés fondamentales qui définie le comportement de la fibre, il aussi [20] :

- Bonne absorption des vibrations.
- Fibres moins abrasive.
- Bonne isolation acoustique et thermique.

#### II.4.4. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites

Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel qui est indiquées dans le (Tableau.II.3) ci-dessous [19]:

Avantages	Inconvénients
Faible cout	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO <sub>2</sub>	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique (200 à 230°C max)
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo.....
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité,...)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

**Tableau II.3 : Principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales [19].**

#### II.5. Les différents renforcements à base de fibres végétales :

Dans la nature il y a plusieurs de plantes végétales, qu'on peut utiliser comme des renforts au niveau de la matrice composite. On trouve :



### II.5.1. Le chanvre

Le chanvre est une fibre libérienne (Fig.II.4). Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. La France est le premier producteur de chanvre en Europe, sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et du remplissage. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique [19].



Fig. II.4 : Plante de chanvre et les fibres de chanvre.

### II.5.2. Le lin

Le lin est une plante annuelle (Fig.II.5), qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. Cette fibre est utilisée pour fabriquer des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible [19].

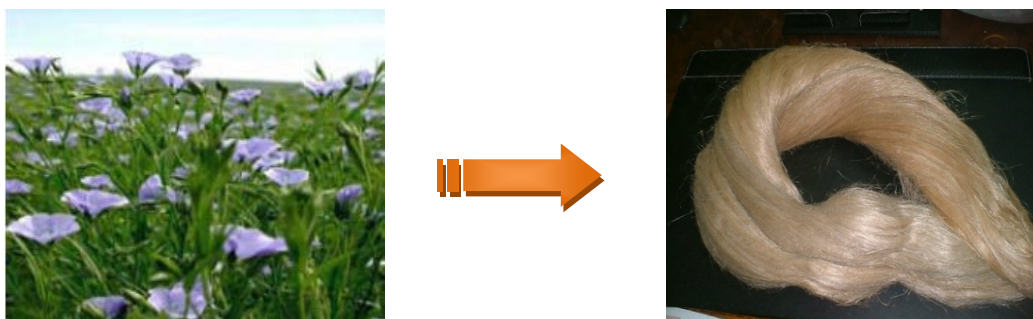
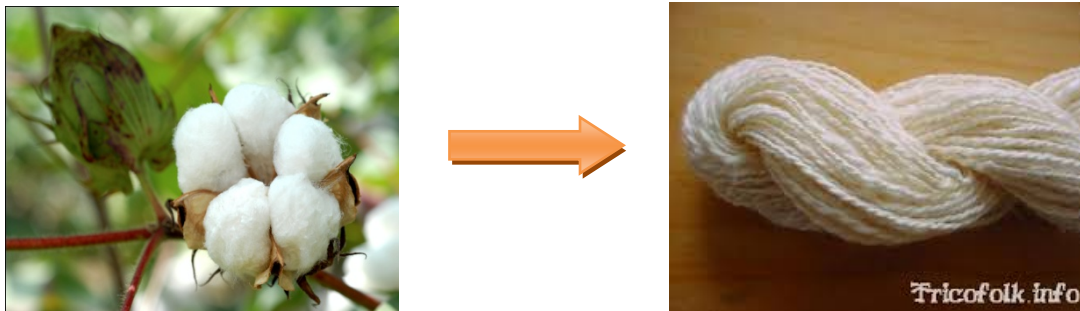


Fig. II.5 : Plante du lin et les fibres de lin.

### II.5.3. Le Coton

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie. Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Cette fibre (Fig.II.6) est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage [19].



**Fig.II.6 : Plante et fibres naturelles de coton.**

### II.5.4. L'Abaca

L'Abaca de Manille est un bananier textile qui pousse aux Philippines les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes. La fibre d'Abaca (Fig.II.7), a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22  $\mu\text{m}$ . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance [19].



**Fig. II.7 : Plante de l'abaca et les fibres de l'abaca.**

### II.5.5. Le Kenaf

Le kenaf est une plante herbacée (Fig.II.8), dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kenaf est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuilles [19].

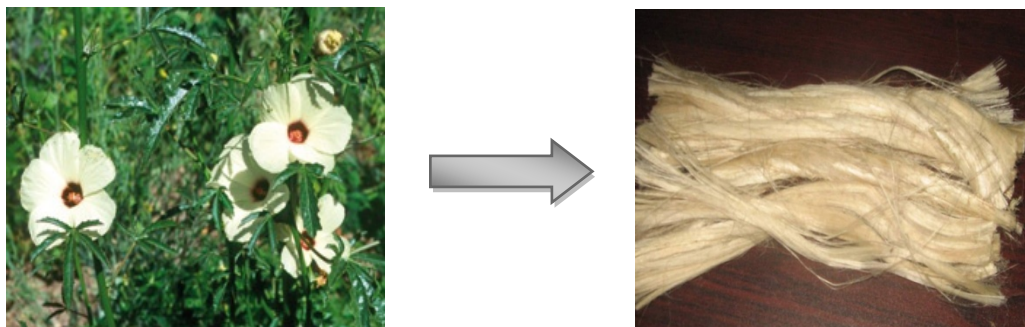


Fig. II .8 : Plante de Kenaf avec ces fibres.

### II.5.6. Le Jute

Le jute est une plante buissonnante (Fig.II.9), originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20  $\mu\text{m}$ . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf [19].

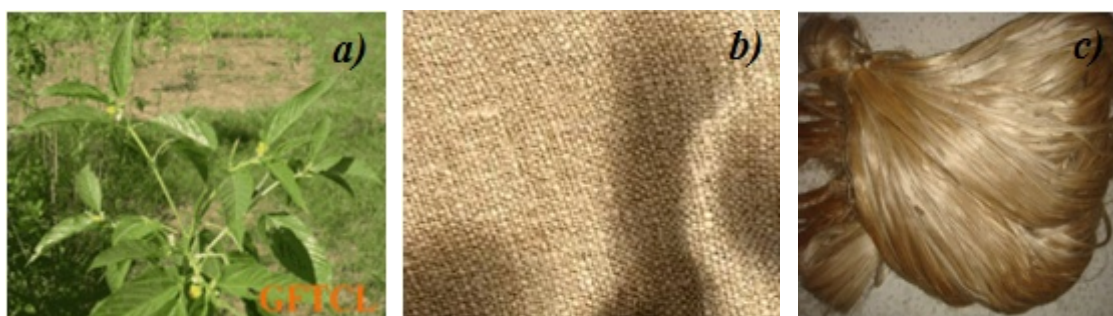
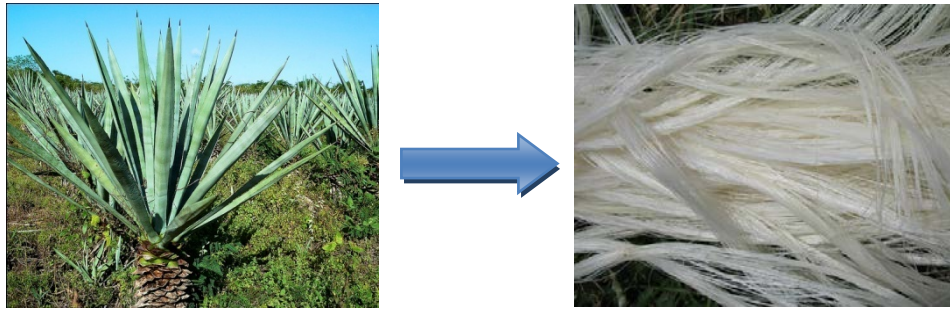


Fig. II.9 : Jute : (a) plante, (b) tisse, (c) fibres.

### II.5.7. Le Sisal

Le sisal est une plante vivace (Fig.II.10), 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 [19].





**Fig. II.10 : Fibres naturelles du Sisal.**

### **II.5.8. Le Ramie**

La Ramie est une plante arbustive (Fig.II.11). Originaires d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45  $\mu\text{m}$ . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides [19].



**Fig. II.11 : plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie.**

### **II.5.9. Le Coco**

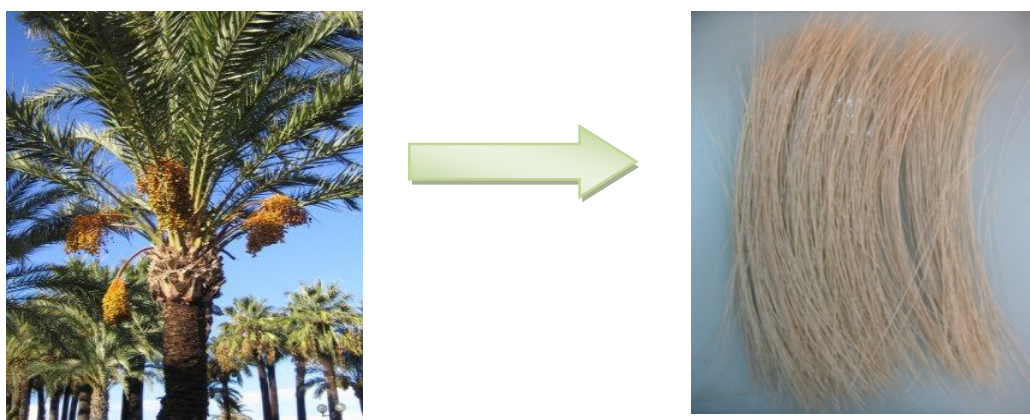
Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco (Fig.II.12). Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses [19].



**Fig. II.12 : Fibres naturelles de la plante du coco.**

#### **II.5.10. Palmier dattier**

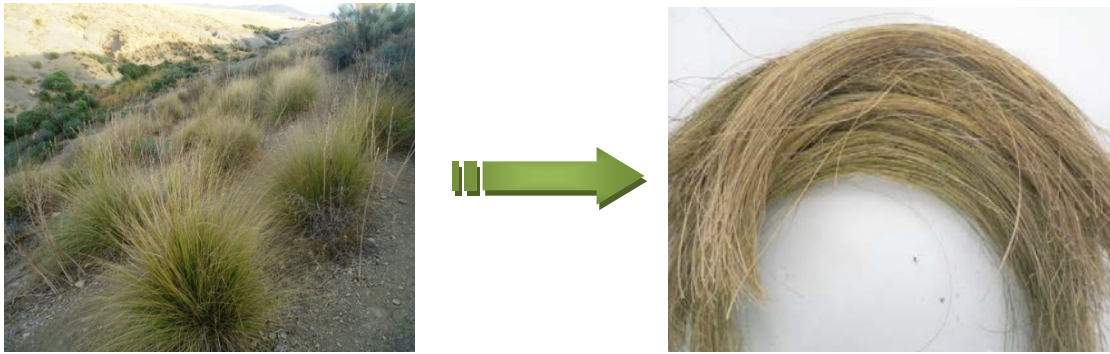
Le palmier dattier il a un stipe solitaire de couleur marron ou gris qui atteint jusqu'à 20 mètres de hauteur et 60 cm de diamètre à l'âge adulte (Fig.II.13). Leur couronne se compose de plus d'une centaine de feuilles pennées qui mesurent plus de 5 mètres de longueur. Le pétiole peut mesurer jusqu'à un mètre, et est recouvert d'épines sur ses bords. Les folioles sont de couleur verte. Elles sont étroites, rigides et disposées de manière irrégulière sur le rachis [21]. Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale) [22].



**Fig. II.13 : Palmier et les fibres de palmier dattier.**

#### **II.5.11. Alfa**

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes (Fig.II.14). Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence [22]. Elle est employée dans la fabrication de sparterie, des cordages, des espadrilles, des tissus grossiers, des papiers d'imprimerie.....etc [21].



**Fig. II.14 : Plante et les fibres d'Alfa.**

## **II.6. L'utilisation des fibres végétales dans le domaine de génie civil :**

L'application des fibres dans le domaine de construction c'est pour la fabrication des panneaux pour l'isolation et dans l'industrie du bâtiment, la fabrication des enduits et des peintures à base d'huile végétales pour renforcer la durabilité des éléments de construction renouvelables [23].

## **II.7. Conclusion :**

L'utilisation de fibres végétales dans le domaine de génie civil est expansée et prend un champ très large d'application, compte tenu des caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et écologiques, ainsi que grâce à leurs disponibilités dans la nature [23].

# **Chapitre III :**

## **Généralités sur le béton polymère**

## Chapitre III : Généralités sur le béton polymère

### III.1. Introduction :

Le béton polymère est constitué de charges minérales (granulat, sable,...) et d'un liant en polymère (Fig.III.1). On l'appelle aussi béton de résine synthétique ou béton de résine plastique. La légèreté de ce matériau facilite énormément sa mise en chantier et la présence de résine réduit l'absorption d'eau et garantit ainsi sa complète étanchéité. Ces matériaux résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel. En outre, comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment portland, ils permettent d'économiser jusqu'à 50% de matériau. Ainsi, pour certaines applications spécifiques, ils concurrencent le béton conventionnel. La résistance aux agents chimiques et les caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de la nature du polymère utilisé et de la quantité de charge [24].



Fig. III.1 : Béton polymère.

### III.2. La composition principale d'un béton polymère :

Le béton polymère ou le béton de résine est formé par un squelette granulaire (les agrégats) et un liant polymère (résine) (Fig.III.2) :

- **La résine (matrice)**

Les bétons polymères sont constitués d'un liant entièrement organique qui est appelé la résine, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable, il y a les époxydes et les polyesters insaturés qui sont caractérisés par un temps de durcissement très courts, donc le temps de malléabilité varie en fonction des résines, de la quantité de durcisseur et d'accélérateur. Les époxydes et les polyesters insaturés sont les thermodurcissables les plus utilisés pour la fabrication d'un béton polymère [23].



- **Les agrégats**

Les agrégats utilisés dans la plupart des cas sont des sables de quartz de granulométrie différente. Le gravier utilisé (0,2 à 16 mm) et en partie le sable (0,1 à 0,7 mm) sont considérés comme des agrégats à granulométrie supérieure tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites ( $< 0,1$  mm) sont considérées comme des agrégats fins. Le bon choix des agrégats entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance en flexion et en compression ainsi que de la dureté [22].

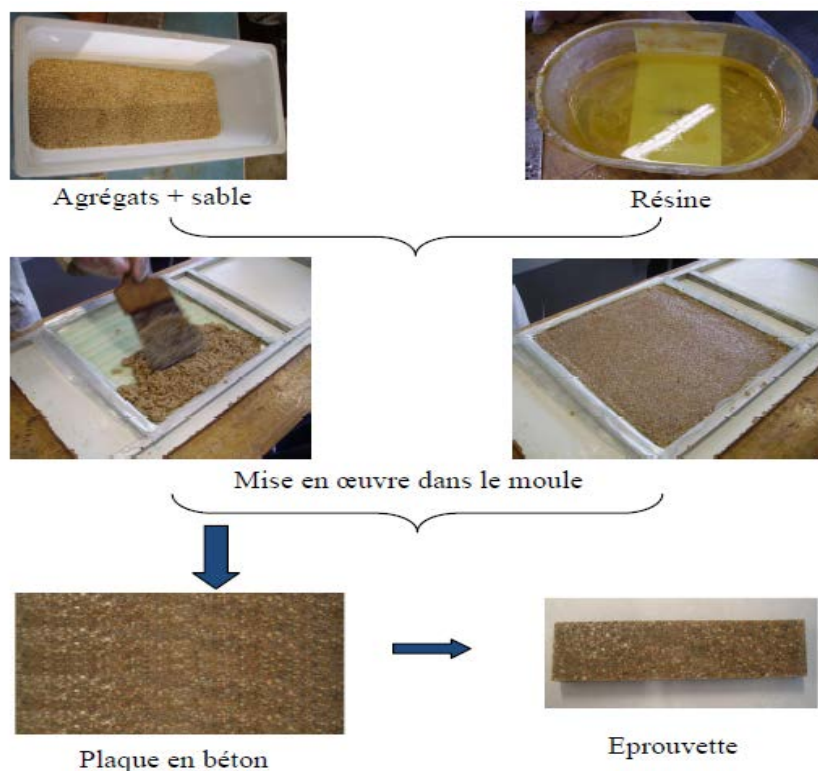


Fig. III.2 : Mise en œuvre d'une plaque de béton polymère [24].

### III.3. Les caractéristiques principales des bétons polymères :

#### III.3.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton polymère

Le béton polymère représenté les caractéristiques suivantes [25] :

- Valeur de compression d'un béton polymère: 80 – 90 MPa.
- Valeur de flexion par traction d'un béton polymère : 20 – 24 MPa.
- Module d'Young d'un béton polymère: 21 300 MPa.
- Abrasion : 1,15.

**III.3.2. Caractéristiques physiques d'un béton polymère**

Le béton polymère représentée des caractéristiques physiques suivantes [25] :

- Absorption d'eau : 0,2 %.
- Coefficient d'écoulement : 108 moyens.
- Résistance au gel : Inaltéré.
- Densité : 2,1.
- Micro porosité d'un béton polymère : 25  $\mu\text{m}$ .

**III.3.3. Caractéristiques chimiques d'un béton polymère [12]**

- Résistance aux agressions des effluents sans aucun traitement (PH 1 à 14).
- Résistance aux produits chimiques.
- Résistance aux hydrocarbures.

**III.3.4. Caractéristiques hydrauliques d'un béton polymère [12]**

- Excellent coefficient d'écoulement (offrant un matériau auto curant et augmentant le débit de l'ouvrage).
- Totale étanchéité dans la masse grâce à la très faible porosité de surface du béton polymère.
- Excellente tenue à l'abrasion.

**III.4. Les principaux avantages et les inconvénients du béton polymère :****III.4.1. Les avantages d'un béton polymère [26]**

- Le béton polymère présente certains avantages au cours de l'application.
- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs.
- Un faible coefficient de dilatation thermique et durcissement rapide.
- Une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens.
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques surtout en tension.
- Une bonne résistance à l'abrasion et excellente durabilité avec un cout raisonnable.

**III.4.2. Les inconvénients d'un béton polymère [26]**

- Le cout de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques.

- Ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en œuvre.

### III.5. La comparaison entre un béton polymère et un béton ordinaire :

A partir des matériaux utilisés pour la fabrication du béton soit polymère ou ordinaire, sa différence peut se résumer dans le (Tableau.III.1) :

Type de liant	Polyméthacrylate de méthyle	Polyester	Époxyde	Résine furanique	Béton de ciment
Absorption d'eau (%)	0,05-0,60	0,30-1,0	0,02-1,0	0,20	5-8
Résistance en compression (MPa)	70-210	50-150	50-150	48-64	13-35
Résistance en traction (MPa)	9-11	8-25	14-25	7-8	1,3-3,5
Résistance en flexion (MPa)	30-35	15-45	15-50	-	2-8
E (GPa)	35-40	20-40	20-40	-	20-30
$\nu$	0,22-0,33	0,16-0,30	0,30	-	0,15-0,20
Coefficient de dilatation thermique ( $10^{-6}C^{-1}$ )	10-19	10-30	10-35	38-61	10-12

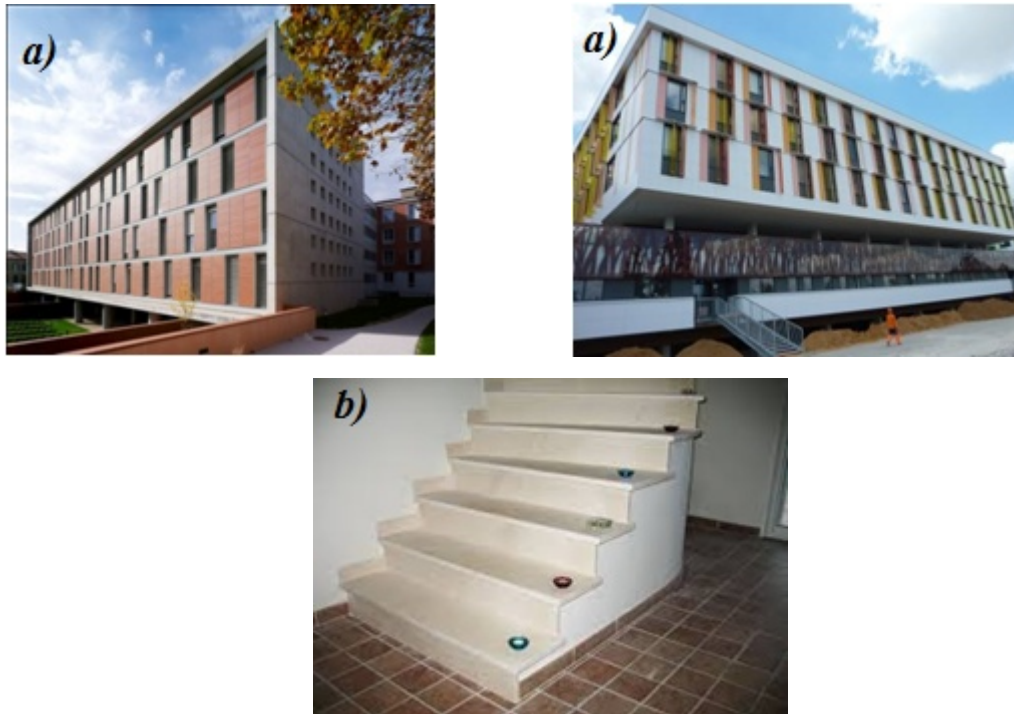
Tableau. III.1 : Propriétés mécanique de différents types de béton polymère et béton de ciment [24]

### III.6. Les différentes applications d'un béton polymère

#### III.6.1. L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil

Utilisé essentiellement dans la production du marbre artificiel, l'industrie de façades (Fig. III.3a), s'est enrichie avec l'utilisation du béton polymère comme matériau de revêtement avec des différentes formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus stricts.

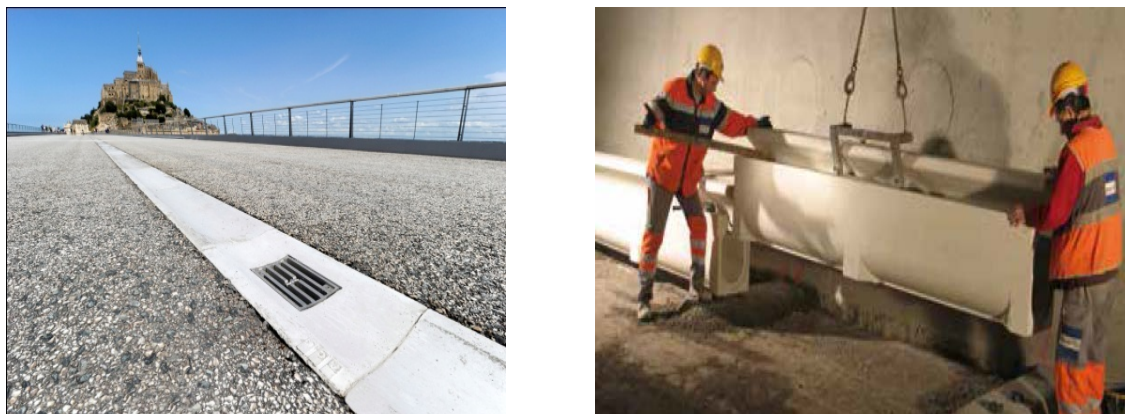
Le béton polymère utilisés aussi pour la fabrication des éléments tels que les panneaux, appuis de fenêtres, marches d'escalier (Fig.III.3b), table de travail, équipements techniques sanitaires,.....etc [27].



**Fig. III.3 : Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment.**

### III.6.2. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques

L'utilisation du béton polymère pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation (Fig.III.4), est très répandue comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en béton polymère peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire) [27].



**Fig. III.4 : Caniveaux en béton polymère pour le drainage.**

### III.6.3. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture

Le béton polymère est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants (Fig.III.5). Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de béton polymère plus léger et robuste [27].



**Fig. III.5 : Bacs de fleurs par béton polymère.**

### III.6.4. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussées et planchers

Les planchers qui sont réalisées par le béton polymère dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques (Fig.III.6). De même pour les chaussées, le mouvement intensifs des véhicules lourdes essentiellement réduit énormément le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton. Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie [27].

Un exemple de l'utilisation d'un béton polymère pour la protection des surfaces des chaussées et réparation c'est le pont de « Brooklyn à New York » (Fig.III.7).



**Fig.III.7 : Pont de Brooklyn à New York.**



**Fig. III.6 : Plancher en béton polymère.**



### III.6.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie

Le béton polymère est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements miniers (électrolytiques, réservoirs, puits, etc) (Fig.III.8) [27].



Fig. III.8 : Quelques applications de béton polymère (industrie).

### III.6.6. L'utilisation des bétons polymère comme isolation phonique

Par la fabrication des écrans phoniques (Fig.III.9), le produit doit avoir une bonne résistance mécanique surtout sous l'action des vents intenses et une résistance à l'humidité, aux gaz, aux huiles et antigels. Par des renforts comme le verre, le caoutchouc et des autres minéraux usuels [27].



Fig. III.9: Quelques applications du béton polymère pour l'isolation.

### III.7. Conclusion :

D'après les résultats établis dans ce chapitre on peut dire que le béton polymère ainsi confectionné est caractérisé par de bonnes propriétés mécaniques comme la flexion et compression ainsi que de bonnes propriétés physiques et chimiques contre les agents agressifs par rapport à un béton ordinaire. Ces propriétés permettent son introduction comme matériau de construction dans tous les domaines du génie civil.

## **Chapitre IV :**

# **Théorie de la mécanique de la rupture**

## Chapitre IV : Théorie de la mécanique de la rupture

### IV.1. Introduction

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties, sous l'action d'une contrainte. La rupture est fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts interne) et par la présence d'entailles (microfissures) résultant de défauts de fabrication. Pour caractériser la ténacité d'un matériau, il est nécessaire de déterminer les conditions de propagation des fissures dans un matériau en fonction des forces appliquées. Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la contrainte appliquée dépasse une valeur critique. Pour comprendre ce comportement, il faut analyser en détail les phénomènes se produisant à la pointe d'une fissure. L'étude du comportement d'une fissure sous contrainte constitue la base de la mécanique de la rupture [28].

### IV.2. L'endommagement et la rupture des matériaux

#### IV.2.1. L'endommagement des matériaux

L'endommagement propose de décrire continûment la dégradation progressive du matériau se traduit par la formation (phase d'amorçage) et le développement (phase de croissance et propagation) de discontinuités surfaciques (microfissures) ou volumiques (cavités) [29]. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale de la structure [24].

#### IV.2.2. Rupture des matériaux

La mécanique de la rupture, quant à elle, prend en compte des défauts majeurs préexistants ou induits dans le matériau. La rupture complète de la structure de l'échantillon est alors décrite en fonction du comportement de ces défauts qui est régi par des critères de propagation [30]. Deux approches sont généralement utilisées en mécanique de la rupture [30]:

- L'analyse du champ des contraintes en tête de fissure. C'est l'approche par les facteurs d'intensité de contraintes, dite théorie locale. Elle relie les facteurs d'intensité de contraintes au champ de contraintes en tête de fissure.
- L'approche globale énergétique due à [GRIFFITH] qui procède par le calcul de l'énergie disponible pour la propagation de fissures dans la structure considérée. Cette énergie dépend du potentiel total du système.



### IV.3. Fissure et modes de rupture :

La description analytique des champs de contraintes autour d'une fissure amène à distinguer trois modes fondamentaux de chargement (et de fissuration) qui peuvent éventuellement se superposer [29]. On distingue trois modes de rupture (Fig.IV.1) [31] :

- Le mode I appelé de manière évidente mode d'ouverture.
- Le mode II appelé mode de glissement plan.
- Le mode III appelé mode de glissement anti-plan ou mode de déchirure.

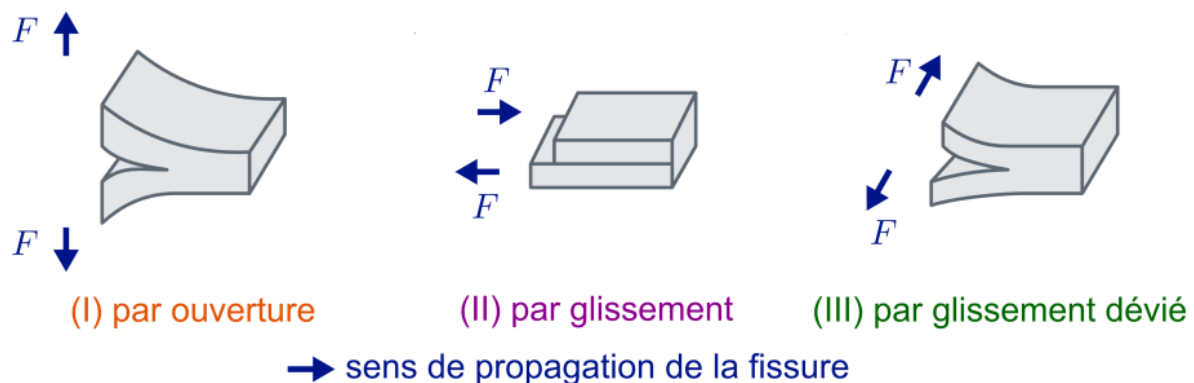


Fig.IV.1 : Différents modes de rupture.

### IV.4. Théorie de la mécanique de rupture

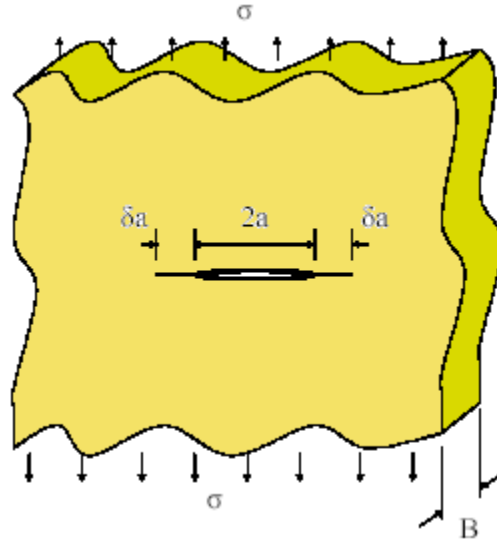
#### IV.4.1. Approche énergétique ou Approche de Griffith

En 1920, [A. A. Griffith] a introduit la théorie de mécanique de la rupture par des considérations énergétiques, en supposant que la rupture est un processus absorbant d'énergie. Griffith suppose que pour propager une fissure, il faut fournir au matériau une énergie nécessaire correspondant à l'augmentation de l'aire de fissure. Il s'ensuit que l'instabilité de fissure se produisant lorsque l'énergie emmagasinée au moment de la propagation dépassera l'énergie nécessaire pour la création de nouvelles surfaces [28].

Si on considère un solide purement élastique d'épaisseur uniforme B, contenant une fissure elliptique de longueur «2a» soumis à un champ de contrainte axiale « $\sigma$ », Selon Griffith, le changement net de l'énergie potentielle du solide [21].

$$W_p = \frac{\Pi a^2 \sigma^2 B}{E'} \quad (1)$$

Avec :  $E' = E/(1 - \nu^2)$  ou  $E' = E$  respectivement pour le cas de déformation Plane et contrainte plane. Ici, E est le module de Young et  $\nu$  le coefficient de poisson.



**Fig.IV.2 : Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « 2a ».**

L'énergie de création d'une nouvelle surface s'écrit (Fig.IV.2):

$$W_s = 4a B \gamma_s \quad (2)$$

Où  $\gamma_s$  est l'énergie surfacique de rupture par unité d'aire. L'énergie totale du système est alors donnée par :

$$U = W_p + W_s = \frac{\Pi a^2 \sigma^2 B}{E'} + 4a B \gamma_s \quad (3)$$

Griffith a noté que l'état critique pour le début de la progression de la fissure est :

$$\frac{dU}{dA} = \frac{dW_p}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = -\frac{\Pi a \sigma^2}{E'} + 2\gamma_s \quad (4)$$

Où  $A=2aB$  est la surface rompue et  $dA$  dénote l'incrément d'accroissement de la fissure. Notez que la superficie de deux surfaces rompues est  $2A$ . La contrainte critique pour le déclenchement de rupture est [21] :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E' \gamma_s}{\Pi a}} \quad (5)$$

#### IV.4.2. Approche en termes d'intensité de contrainte

La deuxième approche étudie l'état des contraintes dans une zone proche de l'extrémité de la fissure, pour un matériau soumis à un champ de contrainte axiale, est établie par [G. R. Irwin]. Il introduit un facteur qui permet de décrire les champs singuliers de contraintes où domine le terme en  $r^{-1/2}$  ( $r$  étant le rayon au fond de la fissure) [28]. Les contraintes sont de la forme suivante:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (6)$$

Avec :

- $f_{ij}(\theta)$  : fonction de l'angle polaire par rapport à l'extrémité de la fissure;
- $K_I$  : caractérise l'intensité de contrainte suivant le Mode I de rupture.

Pour le cas d'une fissure de longueur « $2a$ » continue dans un milieu infini, soumis à une contrainte de traction nominale  $\sigma$ ,  $K_I$  a la forme suivante :

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (7)$$

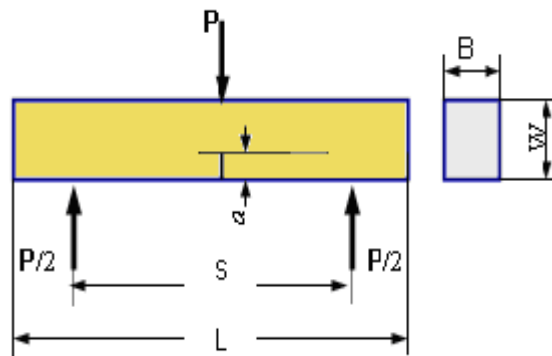


Fig.IV.3 : Cas d'une éprouvette de flexion trios points (FTP).

La relation principale du facteur  $K_{IC}$ , pour une éprouvette fissurée de dimensions finies et sollicité par une contrainte uni axiale en mode I, Le paramètre Y est un facteur de correction de la géométrie, représenté souvent en fonction du rapport  $a/W$ .

(Longueur de la fissure sur la largeur de l'éprouvette). Dans le cas des matériaux fragiles, lorsqu'on fait accroître la contrainte appliquée, la rupture brutale survient à l'instant.

Où  $K_I$  atteint une valeur critique  $K_{IC}$ . Donc au moment de la rupture, on a [21] :

$$K_I = \sigma_F \cdot Y \cdot \sqrt{a_c} \quad (8)$$

- $a_c$  : Est la taille de défaut critique.
- $\sigma_F$  : Est la valeur de la résistance à la rupture de l'éprouvette.

#### IV.4.3. Taux de restitution d'énergie G

Définie par G, solution du problème élastique linéaire, se détermine à partir de la géométrie et du chargement de la pièce et son expression analytique se calcule aisément pour fissure bidimensionnelle, le raisonnement portant sur une épaisseur bien définie [31].

Il est nécessaire de considérer le changement d'énergie du système dû à l'incrément de rupture de fissure surgissant des changements du travail externe et de l'énergie interne. Ceci est défini comme G, le taux de restitution d'énergie. Considérons un corps élastique de l'épaisseur uniforme B contenant une fissure de longueur soumise une force externe P liée à un déplacement u. L'énergie mécanique totale du corps rompu  $W_p$  est [21]:

$$W_p = \Phi - W_F \quad (9)$$

- Ici  $\Phi$  : est l'énergie de déformation élastique stockée.
- $W_F$  : est le travail externe effectué par les forces externes.

Ici  $\gamma_p$  est l'énergie plastique par unité d'aire de la surface créée. Notez que  $\gamma_p$  est beaucoup plus grand que  $\gamma_s$ . Le critère d'accroissement de la fissure peut être exprimé comme suit : le taux de restitution d'énergie G doit être plus grand que le travail critique  $G_c$  qui est exigée pour créer une nouvelle surface de rupture.

##### a) Mesure de G dans le cas d'un effort imposé

Pour le cas d'une charge P constante, le taux de restitution d'énergie est représenté par l'aire du triangle OAB (Fig.IV.4a). Sous charge constante, l'éprouvette s'allonge d'un incrément  $\delta u$ , ainsi le travail accompli par les forces extérieures durant l'accroissement infinitésimal de la fissure) [21] :

$$\Phi = \int_0^u P du = \frac{Pu}{2} \quad (10)$$

$$W_F = Pu \quad (11)$$

A partir des équations (9, 10 et 11) on conclut :

$$W_p = -\Phi = -\frac{Pu}{2} \quad (12)$$

Considérez un incrément de fissure de  $a$  à  $a + \delta a$ , ceci cause un déplacement par accroissement de  $\delta u$  sous la charge P.

Le taux de restitution d'énergie pour le corps s'écrit :

$$G = -\frac{1}{B} \left( \frac{dW_p}{da} \right)_p = \frac{P}{2B} \left( \frac{du}{da} \right)_p \quad (13)$$

Définissant la complaisance  $C$  comme l'inverse de la rigidité ( $C=u/P$ ), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = \frac{P}{2B} \cdot \left( \frac{du}{dC} \right)_p \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_p \quad (14)$$

• Or  $u = C P$ , Finalement :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_p \quad (15)$$

L'avance de la fissure d'un incrément  $\delta a$  d'incrément pour une charge fixe  $P$  mène à une augmentation de du taux d'énergie d'une quantité :

$$\delta \Phi|_P = -\frac{P \delta u}{2} + P \delta u = \frac{P \delta u}{2} \quad (16)$$

#### b) Mesure de $G$ dans le cas d'un déplacement imposé

Pour un déplacement imposé le taux de restitution d'énergie,  $G$ , est représenté par l'aire située dans le triangle  $OAC$  (Fig.IV.4b). Pour un déplacement constant,  $u$ , seule l'énergie élastique peut être enregistré ( $W_F$  est égale à zéro) [21].

A partir des équations (12 et 13) on conclut :

$$W_p = \Phi = \frac{Pu}{2} \quad (17)$$

Le taux de restitution d'énergie est donné, dans ce cas, par :

$$G = -\frac{1}{B} \left( \frac{dW_p}{da} \right)_u = -\frac{u}{2B} \left( \frac{dP}{da} \right)_u \quad (18)$$

Définissant la complaisance  $C$  comme l'inverse de la rigidité ( $C=u/P$ ), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = -\frac{u}{2B} \left( \frac{dP}{dC} \right)_u \left( \frac{dC}{da} \right)_u \quad (19)$$

Or  $P = u/C$ , Finalement :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right)_P \quad (20)$$

L'avance de la longueur de la fissure mène à une diminution nette du taux d'énergie de d'une quantité :

$$\delta\Phi|_u = -\frac{u\delta P}{2} \quad (21)$$

D'après ce qui précède, le taux de restitution d'énergie est indépendant du type de chargement. Ainsi dans un chargement à déplacement imposé ou à effort imposé, le taux de restitution d'énergie s'écrit :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left( \frac{dC}{da} \right) \quad (22)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\delta\Phi|_P = -\delta\Phi|_u \quad (23)$$

En outre, la définition de  $G$  reste valide pour la déformation élastique linéaire et non-linéaire du matériau.  $G$  est en fonction de la charge (ou de déplacement) et de la longueur de la fissure critique du matériau [21].

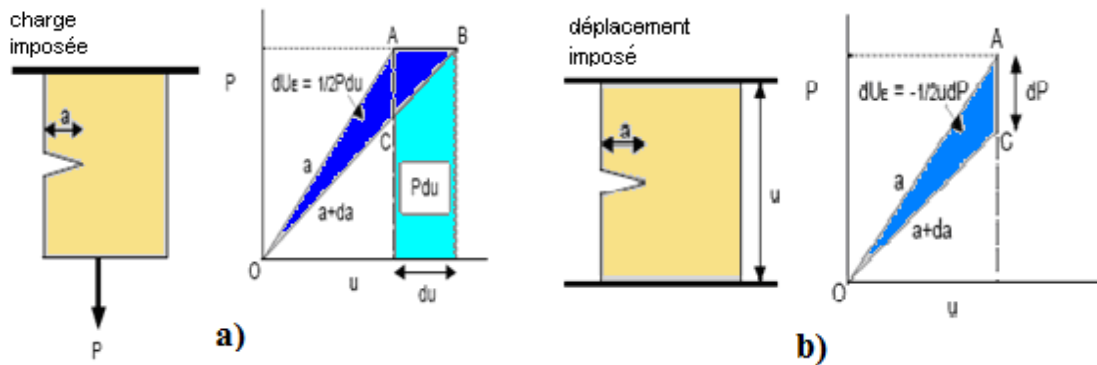


Fig. IV.4 : Rupture d'un corps sous (a) déplacement imposé (b) charge imposée.

Donc la relation c'est :

$$G = \frac{\Pi \sigma a}{E'} = 2\gamma_s \quad (24)$$

#### IV.4.4. L'équivalent entre les deux paramètres K et G

A partir de l'expression du facteur d'intensité de contrainte et dans le cas d'une fissure se propageant dans un milieu homogène [G. R. Irwin] a montré que K est relié à G [28]. Cette relation est donnée par [21] :

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (25)$$

Quand les paramètres  $K_I$  et  $G_I$  atteignent des valeurs critiques on a :

$$G_I = \frac{K_{IC}^2}{E'} \quad (26)$$

- En état de contrainte plane  $E' = E$ .
- En état de déformation plane  $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ .

#### IV.5. L'application de la mécanique de rupture des matériaux

Il existe deux branches de la mécanique de la rupture : la mécanique linéaire de la rupture et la mécanique non linéaire de la rupture. La deuxième branche se distingue de la première par l'intervention de comportements non linéaires lors de l'analyse des champs de contraintes et de déformations (comportements plastiques ou viscoplastiques en général). En ce qui concerne l'analyse non linéaire [32].

#### IV.6. Cas d'une éprouvette fissurée en flexion trois points

L'expression de la contrainte à rupture du matériau  $\ll \sigma_R \gg$  :

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \times P \times \frac{(L-L')}{B(w-a)^2} \quad (27)$$

- B, W sont respectivement l'épaisseur et la profondeur de l'éprouvette.
- L, L' sont respectivement les distances entre appuis inférieurs et supérieur.
- En flexion trois points ( $L'=0$ ).

D'où le facteur d'intensité de contrainte se calcule par :

$$k_R = \frac{3}{2} \times \frac{P \times L \sqrt{a}}{B \times (W - a_0)^2} \times Y \quad (28)$$

Le facteur Y est induit pour pallier au problème de la taille finie des éprouvettes. Il est dépendant du rapport ( $a_0/W$ ), de l'élancement ( $l/W$ ) de l'éprouvette [21].

#### IV.7. Conclusion :

Pour déterminer les paramètres mécaniques propres d'un matériau, on cherche à s'affranchir totalement de l'influence de paramètres externes comme l'épaisseur de l'éprouvette ou l'acuité d'entaille et la forme géométrique, pour calculer l'intensité de contrainte K et le Taux de restitution d'énergie G.



# **Chapitre V :**

## **Matériaux et technique expérimentales**

## Chapitre V : Matériaux et techniques expérimentales

### V.1. Introduction :

La partie expérimentale est une continuité de la partie théorique pour équilibrer le plan de travail et définir les différentes techniques expérimentales.

Ce chapitre présente les différentes méthodes de l'extraction des fibres végétales avec et sans traitement et ainsi que les caractéristiques des matériaux utilisés pour l'élaboration du béton polymère de différentes dimensions prismatiques renforcé et non renforcé par ces fibres, de plus les principaux essais mécaniques (flexion trois points, compression et l'essai de rupture) exécutés au niveau de Maghreb-pipe M'sila et l'université de Sétif.

Les matériaux utilisés pour ce travail sont :

- La résine polyester insaturée.
- La silice (sable de quartz).
- les différents types de fibres choisies (les renforts) :
  - ❖ fibres de verre (Roving de verre).
  - ❖ fibres d'Alfa (non traité/ traité par 2% NaOH).
  - ❖ fibres de Doum (non traité/traité par 2% NaOH).

### V.2. Caractéristiques principales pour chaque matériau utilisé :

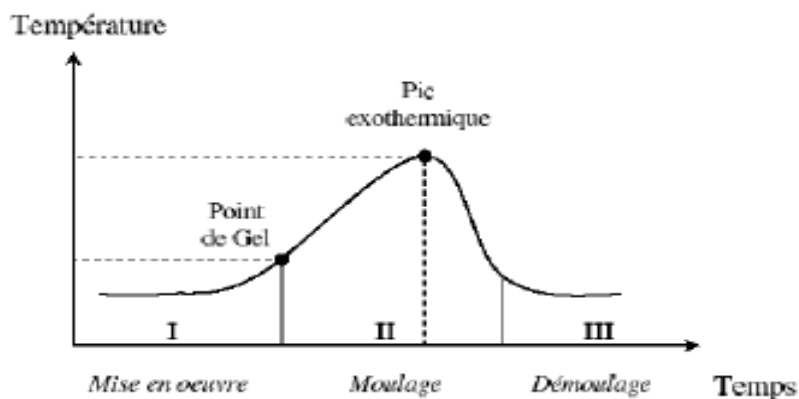
#### V.2.1. Résine polyester

C'est une résine thermodurcissable la plus utilisée et la moins chère, d'environ 95% des composites thermo-durcis renforcés utilisent ce type de résine [27]. Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en termes de rigidité (module d'Young). En revanche, leurs contraintes et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde et vinylester. Au niveau macroscopique [22], Il est spécialement conçu pour la stratification et le moulage en contact [27].

##### V.2.1.1. Caractéristiques des résines polyester

La résine polyester polymérise par adjonction de catalyseur (durcisseur) (Fig.V.1) dans les proportions suivantes, le pourcentage est adapté en fonction des besoins [33]:

- 0.8% minimum (temps de travail moyen).
- 2% maximum (temps de travail court).



**Fig. V.1 : Cycle de polymérisation de résine polyester.**

Les caractéristiques de la résine polyester sont indiquées dans le (Tableau.V.1) suivant :

Les caractéristiques	Polyester
Densité ( $\text{g/cm}^3$ )	1.2
Module de Young (GPa)	2.8-3.5
Résistance à la traction (GPa)	0.05-0.08
La température de polymérisation ( $^{\circ}\text{C}$ )	60-100

**Tableau. V.1 : Différentes caractéristiques de la résine polyester [33].**

#### V.2.1.2. Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester

La résine polyester peut présenter des avantages et des inconvénients au cours de l'utilisation. Ces dernières sont représentées dans le (Tableau.V.2) [34].

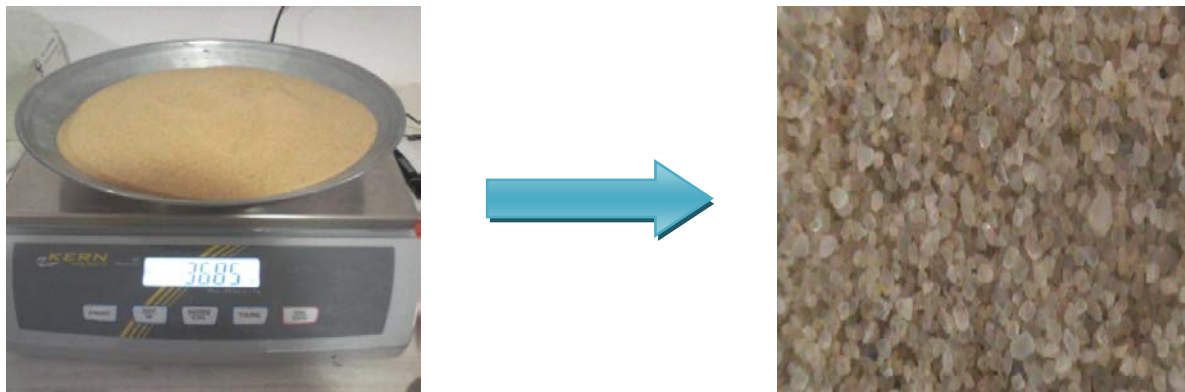
Avantages de résine polyester	Inconvénients de résine polyester
Stabilités dimensionnelles	Fragile au choc et faibles propriétés à partir de $120^{\circ}\text{C}$
Bonne mouillabilité des fibres et des tissus renforts	Retrait important de 8% à 10%
Bonne tenue chimique	Très fort réactivité
Bonne rigidité	Odeur nauséabonde
Etuvage non indispensable	Difficulté des mélanges en faible quantité

**Tableau.V.2 : Différents avantages et les inconvénients de résine polyester insaturée [34]**

### V.2.2. Silice

Le sable de silice est obtenu à partir de traitement par lavage, et est caractérisé essentiellement par une granulométrie entre  $200\mu\text{m}$  et  $500\mu\text{m}$  (Fig.V.2), un équivalent de sable supérieure à 90% (sable très propre), il est disponible dans la région de l'ouest d'Algérie. Pour une bonne qualité du sable, on utilise les étapes suivantes [22] :

- Extraction mécanisée sélective.
- Homogénéisation.
- Criblage.
- Lavage et classification granulométrique.
- Attrition.
- Essorage.
- Réduction et stabilisation finale de l'humidité.
- Séchage lorsque la définition du produit le nécessite.



**Fig.V.2 : Sable de silice.**

La (Fig.V.3) représenté la courbe d'analyse granulométrique de sable de silice. Avec un module de finesse de 5,8.

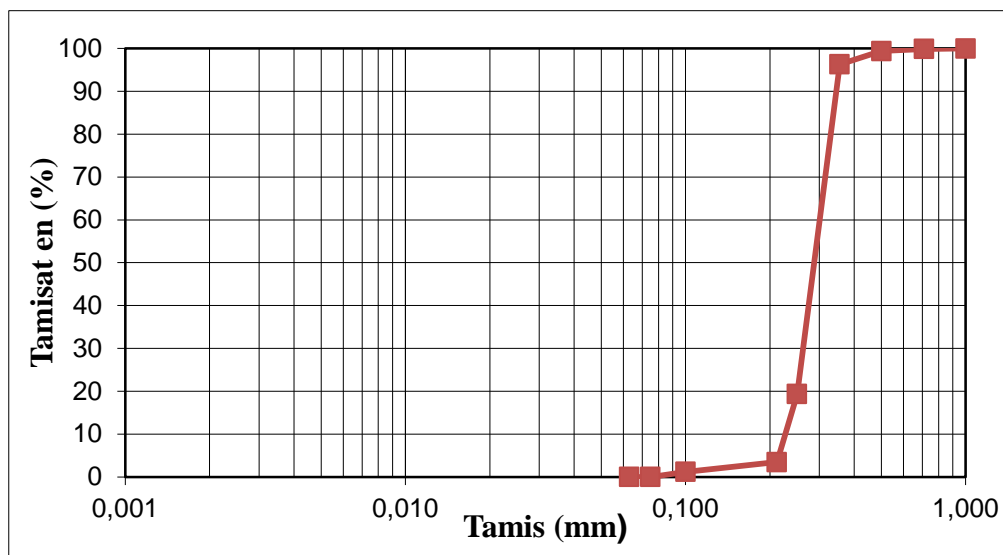


Fig.V.3 : Courbe d'analyse granulométrique de la silice utilisée.

### V.2.3. Techniques de préparation et d'extraction des fibres utilisées

#### a) Fibres de verre

Dans ce travail, les fibres de verre de type E (Fig.V.4b) sous forme roving sont utilisées (Fig.V.4a). Ce type de fibres est le plus disponible et le plus utilisé au niveau de l'industrie. Ceux sont des fibres blanches et lisses.



Fig.V.4 : Fibres de verre : (a) roving de fibre de verre, (b) fibres de verre coupées.

#### V.2.3.1. Préparation des fibres d'Alfa

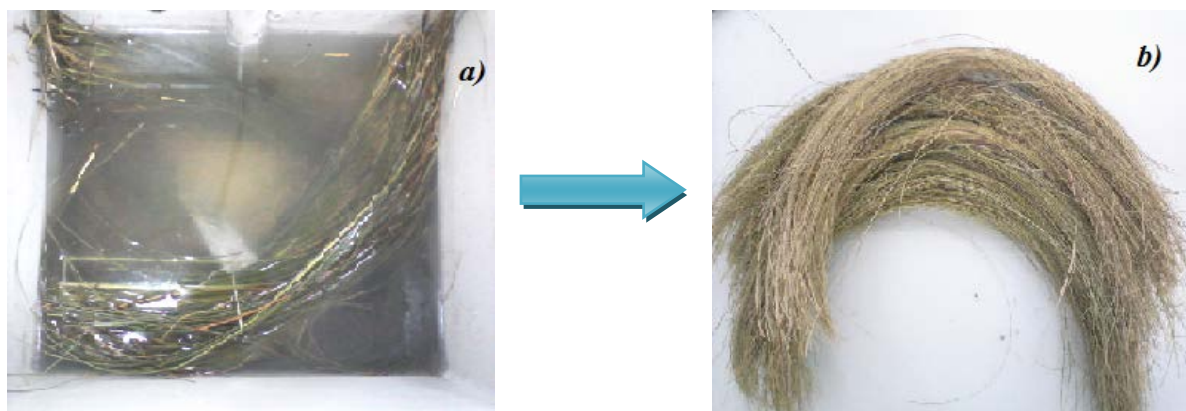
##### a) Fibres d'Alfa

Les fibres Alfa, sont récoltées de la région de Bou-Saadâ (Algérie). Elles sont une touffe d'herbe, constituée de tiges de forme cylindrique d'une hauteur maximale d'environ 1m avec une surface spécifique de  $3\text{m}^2/\text{g}$ . Les fibres Alfa sont principalement composées de 45% de cellulose, 24% d'hémicellulose, 24% de lignine, 2% de cendres et de 5% de cire.

Les faisceaux de fibres Alfa sont caractérisés par un diamètre moyen de  $113\ \mu\text{m}$  ( $90\text{-}120\mu\text{m}$ ) et une densité de  $0,89\ \text{g.cm}^{-3}$  [35].

### b) Extraction des fibres Alfa

En premier lieu on coupe les extrémités de la tige d'Alfa en longueur 35 à 40 cm. Les tiges obtenues sont lavées plusieurs fois pour éliminer les contaminants et les saletés adhérentes. Ensuite, ces tiges sont immergées dans l'eau pendant un mois (Fig.V.5a). Après cela on effectue l'extraction mécanique par brossage des tiges pour obtenir des fibres longues. Les fibres obtenues sont désignées fibres non traitées (Fig.V.5b).



**Fig .V.5 : Préparation des fibres Alfa : (a) immergée des tiges dans l'eau, (b) fibres d'Alfa.**

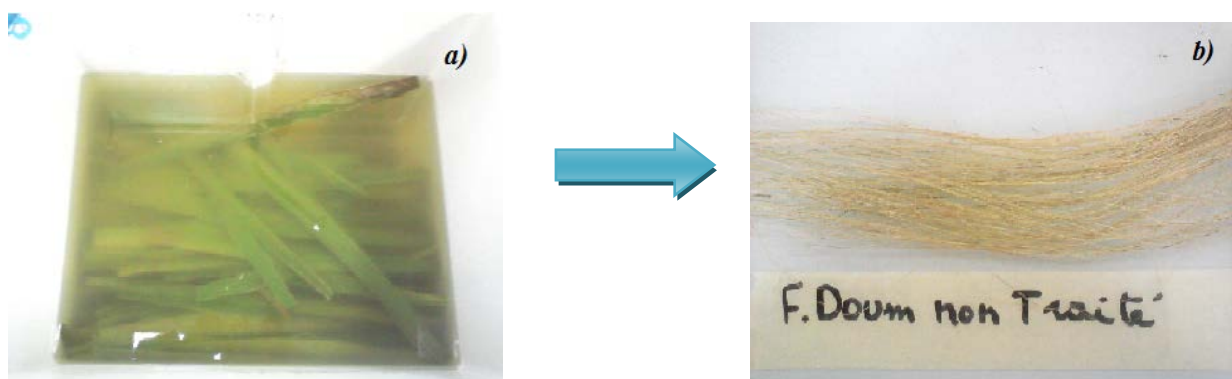
### V.2.3.2. Préparation des fibres de palmier Doum

Le Doum (Fig.V.6), est un palmier de 12 à 15 m de haut à stipe ramifié, relativement lisse d'environ 25 cm de diamètre. Il est caractérisé par un stipe annelé, plus ou moins garni des restes de pétioles. Les feuilles sont en éventail, longuement pétiolées de 1 m à 1,5 m de long disposées en touffes terminales. Le limbe est vert glauque, découpé au moins jusqu'à mi longueur en plus de 20 segments accumulés pliés en « v » et à nervures principales très épaisses. Le pétiole à base engainante et à section triangulaire, et à section plane et convexe dessous avec les bords munis d'épine mince et arquée de 2 à 5 mm de long. Les pays de doum sont : Arabie saoudite, Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Egypte, Mali, Algérie, Nigeria [36]. Et elle est disponible dans la région de M'sila et utilisée pour la décoration des routes.



**Fig.V.6 : Plante de palmier Doum.**

Dans cette partie, on a utilisé les folioles de Doum (fig.V.7a), qui ont été immergée dans l'eau pendant un mois et quelque jours pour éliminer les impuretés restées sur la surface , ensuite on a coupé les folioles de longueurs 35 à 50 cm et maintenue en immersion jusqu'à l'extraction pour obtenir des fibres longues, avec une densité de  $1.15\text{g/cm}^3$  [37].

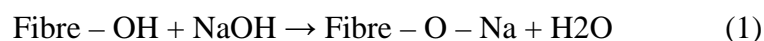


**Fig. V.7 : Foliole de Doum :(a) immergées dans l'eau, (b) après l'extraction.**

### V.2.3.3. Traitement chimique des fibres

#### a) Traitement des fibres Alfa

Les fibres Alfa sont traitées avec une solution de NaOH (milieu alcalin) à concentration de 2% durant une 24h (Fig.V.8). Le but de ce traitement est l'élimination de certaine quantité de lignine, de cire et d'impuretés qui recouvrent la surface externe des fibres [35]. Le traitement par l'hydroxyde de sodium (NaOH) de la fibre favorise l'ionisation du groupe hydroxyle de l'alcoolate :





Ainsi, le traitement alcalin influe directement sur les fibrilles et le degré de polymérisation de la cellulose. Il favorise aussi l'extraction de la lignine et l'hémicellulose [35]. Après traitement, les fibres sont rincées à l'eau distillée. Les traces de NaOH sont neutralisées par une solution d'eau distillée à 2% d'acide sulfurique durant 10 min.



Fig. V.8 : Traitement de fibre Alfa par NaOH.

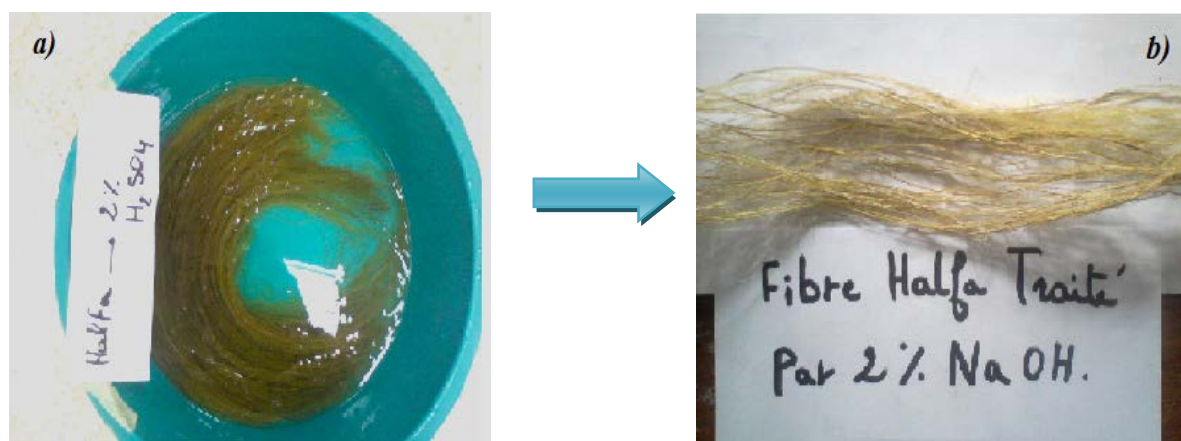
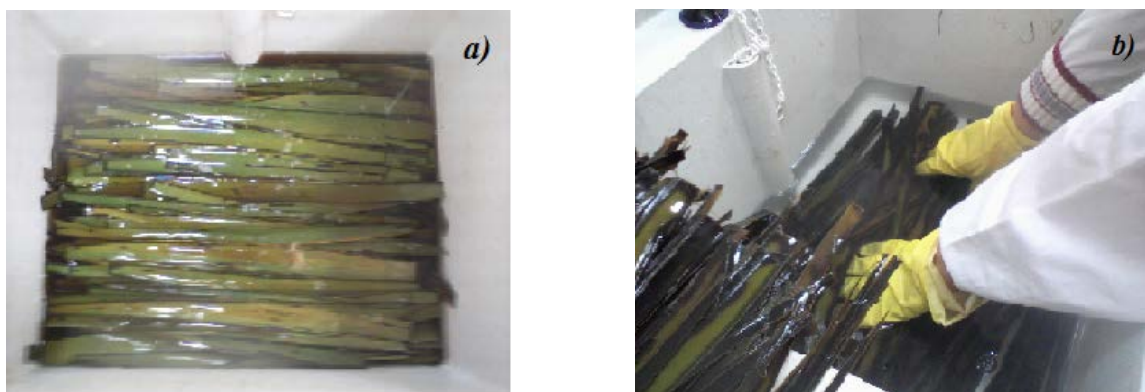


Fig.V.9: (a) Traitement d'Alfa par  $H_2SO_4$  pour éliminer les traces de NaOH, (b) Fibre d'Alfa traitées.

#### b) Traitement des fibres de Doum

On utilise le même principe pour le Doum, on immerge les folioles dans un milieu chimique NaOH avec concentration 2% pendant 24h pour dégrader la surface de la foliole, puis on lave par la solution 2% d'acide sulfurique  $H_2SO_4$  durant 10min (Fig.V.10) pour la neutralisation.





**Fig. V.10: (a) Foliolles de Doum traité par 2% NaOH, (b) foliolles de Doum traité par 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Les fibres de Doum obtenues sont représentées par la (figure V.11).



**Fig. V.11 : Fibres de Doum extrait par 2% NaOH.**

#### **V.2.3.4. Traitement thermique des fibres végétales**

Après toutes les étapes de préparation et l'extraction des différents types de fibres végétales, on place les fibres obtenues dans une étuve de séchage à température 70°C (Fig.V.12) durant 5h pour améliorer leurs propriétés mécaniques.



**Fig.V.12 : Etuve de séchage à 70°C.**

### V.2.3.5. Longueur choisi pour fibres

Après le traitement thermique chaque type de fibres sont coupées en longueur de 6 cm (fig.V.13).



**Fig.V.13 : Mesure de la longueur des différentes fibres utilisées.**

Les fibres sont ensuite découpées (Fig.V.14) en différentes longueurs (entre 0.5 à 6cm) pour assurer leur distribution et leur homogénéité lors de l'élaboration du béton polymère.



**Fig.V.14 : Différentes fibres courtes utilisées.**

## V.3. Technique de moulage

### V.3.1. Préparation des moules utilisés

Afin de caractériser les différents bétons polymère en flexion trois points, nous avons utilisé un moule métallique prismatique (trois éprouvettes), disponible au niveau de notre laboratoire, est qui a les dimensions 40mm × 40mm × 160mm pour chaque des trois éprouvettes (Fig.V.15). Pour les essais de rupture, nous avons utilisé un moule de dimensions 30mm × 60mm × 280mm pour chaque éprouvette. Ce moule est conçu spécialement pour l'élaboration de ce type d'éprouvette. Concernant le test de compression, nous avons utilisé les mêmes éprouvettes de flexion après rupture.

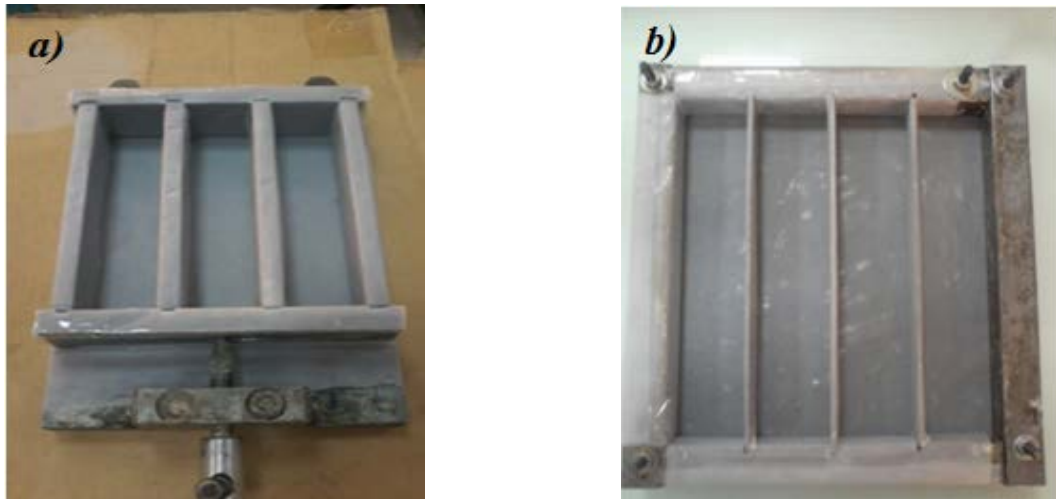


Fig. V.15 :(a) Moule utilisé pour éprouvettes lisses (FTP), (b) Moule pour éprouvettes fissurés.

### V.3.2. Elaboration des éprouvettes en béton polymères :

Dans ce travail on a choisi la technique de moulage par contact, Le principe de ce procédé est de réaliser les différents bétons polymère manuellement à température ambiante.

- Un taux de 1% de chaque type de fibres (Alfa non traité, Alfa traité, Doum non traité, Doum traité, fibres de verre) est pesé.
- Un taux de 80% de silice (de la masse totale) est pesé.
- Un taux de 20% de résine (de la masse totale) est pesé.

- **Technique**

On verse d'abord la quantité de silice dans un bac en plastique, puis on ajoute simultanément et progressivement les fibres voulus avec la résine. Il est important de signaler que le durcisseur (d'environ 1,2%). Est ajouté à la résine pour assurer la polymérisation de cette dernière. Pour le béton polymère non renforcé, on mélange directement la résine avec la silice.

Enfin, on le mélange (silice + résine + fibres) est versé le moule métallique, ensuite ce mélange est pressé par un cylindre en bois, on fait le moulage par contact pour obtenir des éprouvettes uniformes (Fig. V.16).

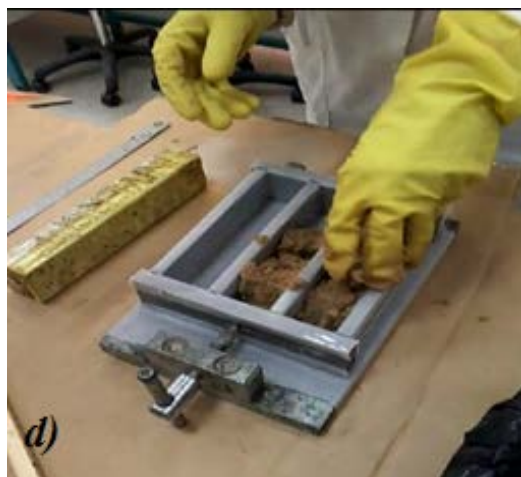


Fig.V.16 : Etapes de moulage de béton polymère par contact.



- Le (Tableau.V.3) résumé représente la formulation suivie pour les éprouvettes en béton polymère :

Les matériaux utilisés	Pourcentages des matériaux (%)
La silice	80%
La résine polyester	20%
Les fibres	1%
Durcisseur	1.2%

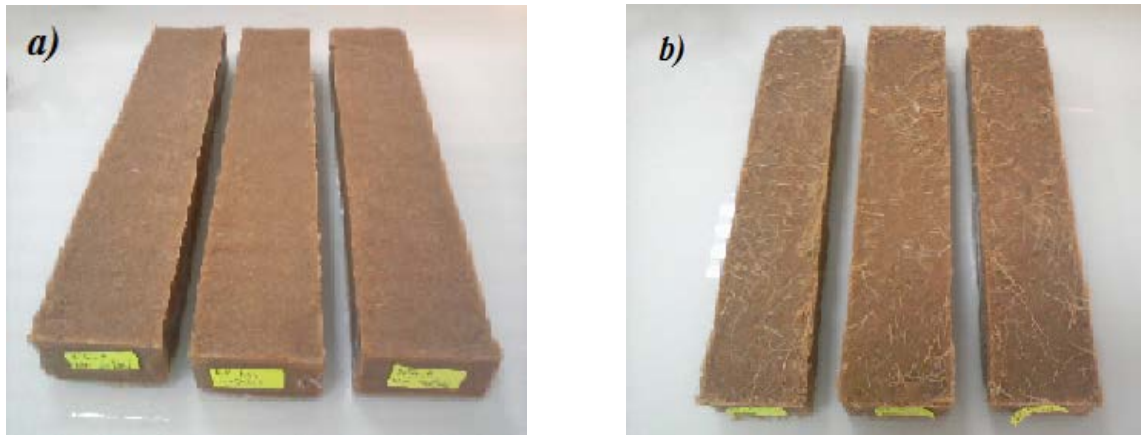
Tableau.V.3 : Taux de chaque composante.

### V.3.3. Le traitement thermique du béton polymère élaboré :

Le béton a besoin de 3 à 4h pour le durcissement qui dépend du dosage du durcisseur, puis on démoule les éprouvettes. Une fois les différents bétons polymères élaborés, ces derniers sont mis dans une étuve à 70 C° durant 24h pour assurer une polymérisation totale des PB obtenus (Fig.V.17) et (Fig.V.18).



Fig. V.17 : Epreuves lissés en BP, (a) et (b).



**Fig. V.18 : Eprouvettes fissurés en BP : (a) BP non renforcé, (b) BP renforcé par Doum non traité.**

#### **V.4. Essais mécaniques appliqués sur le béton polymère renforcé et non renforcé**

##### **V.4.1. Essai de flexion trois points (FTP)**

C'est un essai mécanique statique, indépendant du temps, il est très facile à mettre en œuvre sans fixation d'éprouvette.

Notre éprouvettes lisses de  $(40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3)$  pour l'essai de FTP, on a appliquée une charge à mi-distance des appuis, et la distance entre appuis est de 100mm par une vitesse constante de 1mm/min (Fig.V.19). Les essais appliquées au niveau de laboratoire de Sétif et le principe de FTP consiste à déterminer la charge maximale et étudier le comportement mécanique jusqu' à la rupture d'une éprouvette en BP.



**Fig.V.19 : Essai de FTP sur des éprouvettes lissés en BP.**

- **Les paramètres d'étude**

Dans cet essai nous avons étudié la contrainte à la flexion et le module de flexion en utilisant les deux relations suivantes [22] :

- ❖ **La contrainte :**

$$\sigma_f = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \quad (1)$$

Avec :

- P : la charge appliquée sur l'éprouvette en (N).
- L : la distance entre les appuis en (mm).
- b : largeur de l'éprouvette en (mm).
- h : l'épaisseur de l'éprouvette en (mm).

- ❖ **Module de Young de flexion :**

$$Ef = \frac{P.L^3}{6.f.I} \quad (2)$$

Avec :

- P : la charge maximale à la flexion en (N).
- L : la distance entre appuis en (mm).
- f : la flèche en (mm).
- I : le moment d'inertie =  $bh^3/12$ .

#### V.4.2. Essai de compression

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette en BP de  $(40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3)$ , placée entre les plateaux d'une presse avec une vitesse de 0.5 MPa/s, a deux forces axiales opposées sur une machine au niveau de laboratoire de G.civil (Fig.V.20). Pour déterminer la résistance à la rupture et pour contrôler la qualité de béton.

- **Paramètre d'étude**

La résistance à la compression définie par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (2)$$

- $F$  : la force maximale en (N).
- $S$  : la section de l'éprouvette en ( $\text{mm}^2$ ).

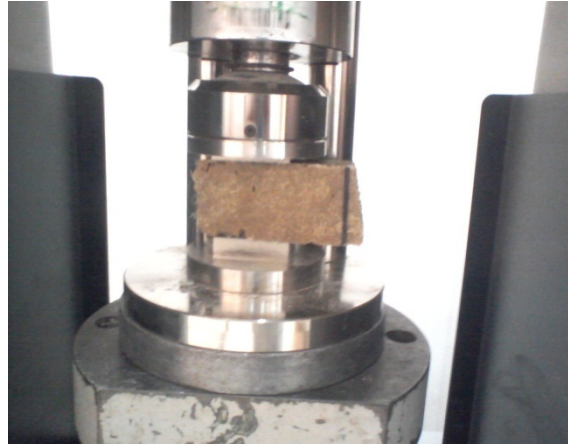


Fig.V.20 : Essai de compression sur des éprouvettes lissées en BP.

#### V.4.3. Essai de la rupture

Cet essai permet de déterminer le paramètre de l'intensité de contrainte  $K_I$  et la propagation des fissures. Effectués sur des éprouvettes en BP de ( $30 \times 60 \times 280 \text{ mm}^3$ ) (Fig.V.21a) par une vitesse constante de  $1 \text{ mm/min}$ , la distance entre appuis est de  $240 \text{ mm}$  et on a utilisée la machine (YL Universal Testing Machines /20KN) au niveau de Maghreb Pipe (Fig.V.21b).

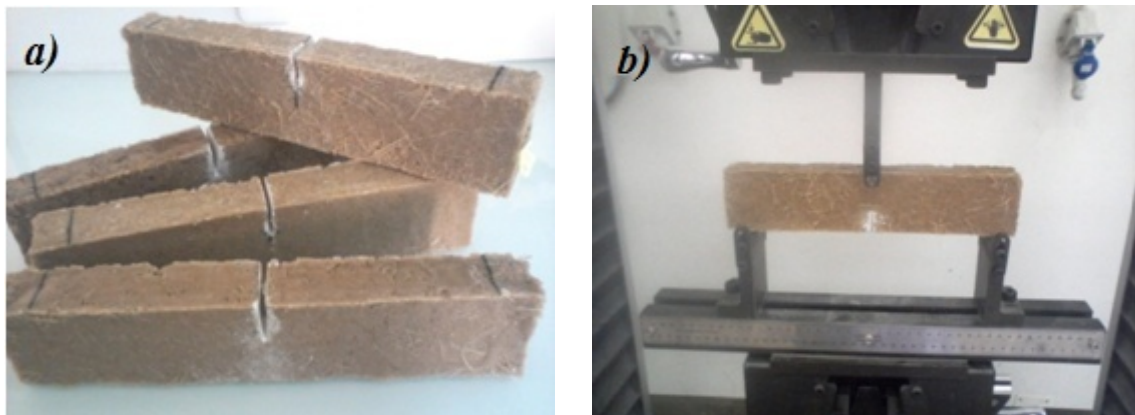


Fig.V.21 : a) Eprouvettes entaillés fissurés pour l'essai de rupture, b) Appareil d'UTM.

- **Paramètre d'étude :**

La relation de  $K_R$  facteur d'intensité de contrainte en [ $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ ] [21] :

$$K_R = \sigma_R \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad (3)$$



Et l'expression de la contrainte à rupture du matériau  $\sigma_R$  [MPa] [21] :

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{L - L'}{B \cdot W^2} \quad (4)$$

- B, W sont respectivement l'épaisseur et la profondeur de l'éprouvette.
- L, L' sont respectivement les distances entre appuis inférieurs et supérieur en flexion trois points (L' = 0).

D'où le facteur d'intensité de contrainte se calcule par :

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{L \cdot \sqrt{a}}{B \cdot W^2} \cdot Y \quad (5)$$

Le facteur Y est induit pour pallier au problème de la taille finie des éprouvettes. Il est dépendant du rapport (a/W).

### V.5. Conclusion :

La technique de préparation des fibres végétales, utilisées dans notre étude, ainsi que le protocole de leur traitement chimique sont présentée. De plus, l'élaboration et les méthodes de caractérisations (flexion trois points, compression et rupture) sont données en détaille.

# **Chapitre VI :**

## **Résultats et discussion**

## Chapitre VI : Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des essais mécaniques réalisés sur le béton polymère renforcé et non renforcé par des différents type de fibres. Nous débuterons par une analyse de l'évolution des courbes contraintes-déformation ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) des éprouvettes lisses sollicitées en flexion trois points, puis l'analyse de la résistance à la compression des Bétons Polymères testés. Enfin, une comparaison des facteurs d'intensité de contraintes des différents Bétons Polymères fissurés, en fonction du type de fibres et du traitement chimique est établie.

### VI.1. Propriétés mécanique des Bétons Polymères en flexion trois points

#### VI.1.1 Analyse des courbes contrainte-déformation des bétons polymères

Les résultats des tests en flexion trois points indiquent le comportement mécanique des éprouvettes en **BP** renforcés et non renforcés par des fibres. La figure VI.1 représente le principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points (FTP).

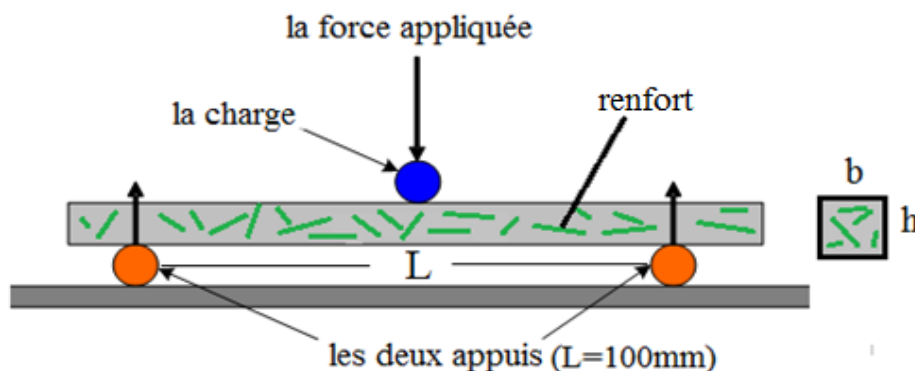


Fig.VI.1 : Principe de sollicitation de l'éprouvette en flexion trois points (FTP).

La figure VI.2 représente les évolutions des contraintes en fonction de déformation ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) des éprouvettes lisses en Béton Polymère sollicitées en flexion trois points (FTP).

Dans l'ensemble des courbes, on constate que les différents bétons polymères testés ont un comportement fragile. La contrainte augmente graduellement jusqu'à la valeur maximale puis chute brusquement provoquant la ruine de l'éprouvette. De plus, une reproductibilité des résultats est observée sur l'ensemble des Bétons Polymères testés. Cette reproductibilité est remarquable dans le cas : a) Béton polymère non renforcé, b) Béton polymère renforcé par fibres de verre, d) Béton polymère renforcé par Doum traité 2% NaOH, et f) Béton polymère renforcé par Alfa traité 2% NaOH.

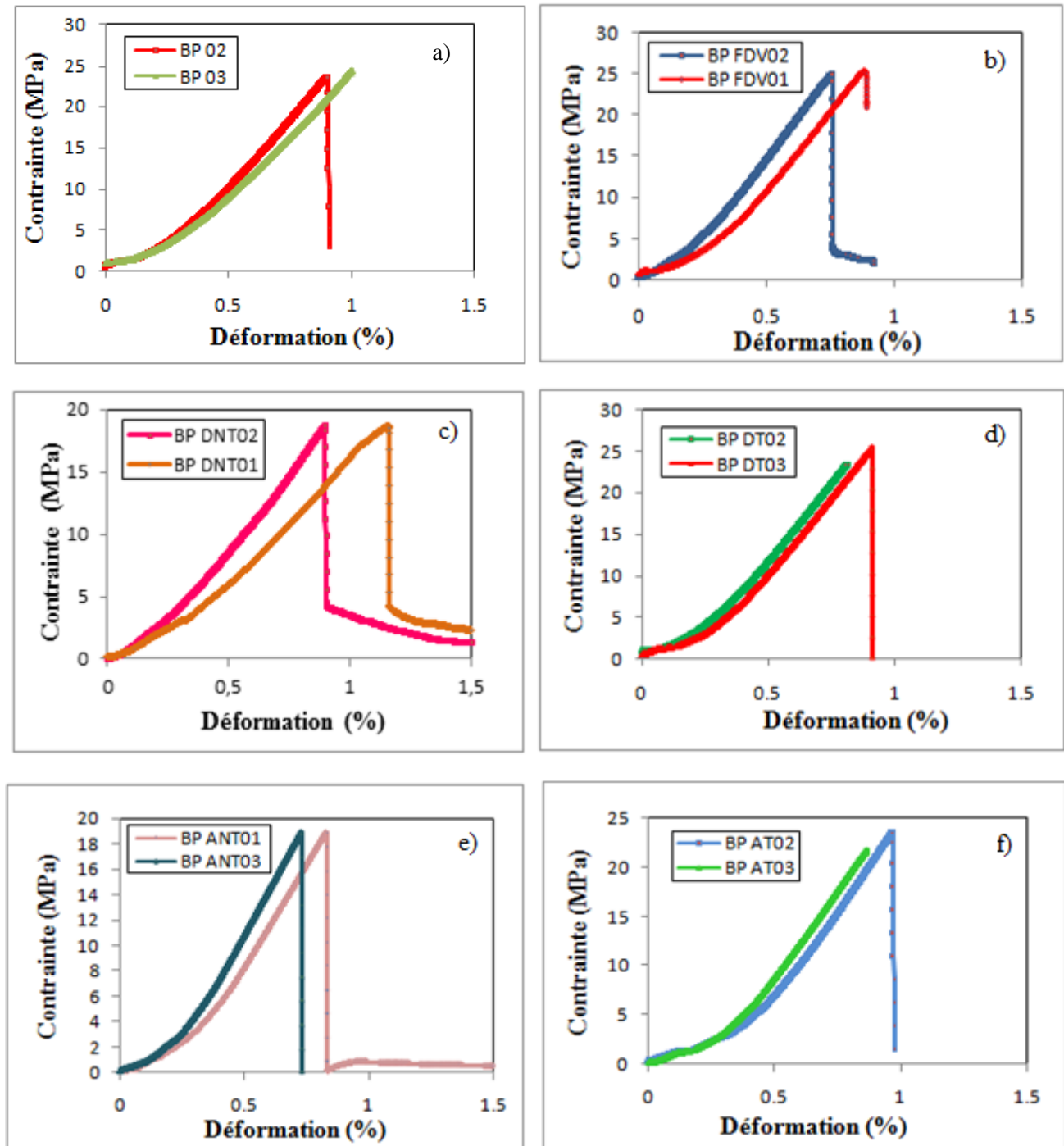


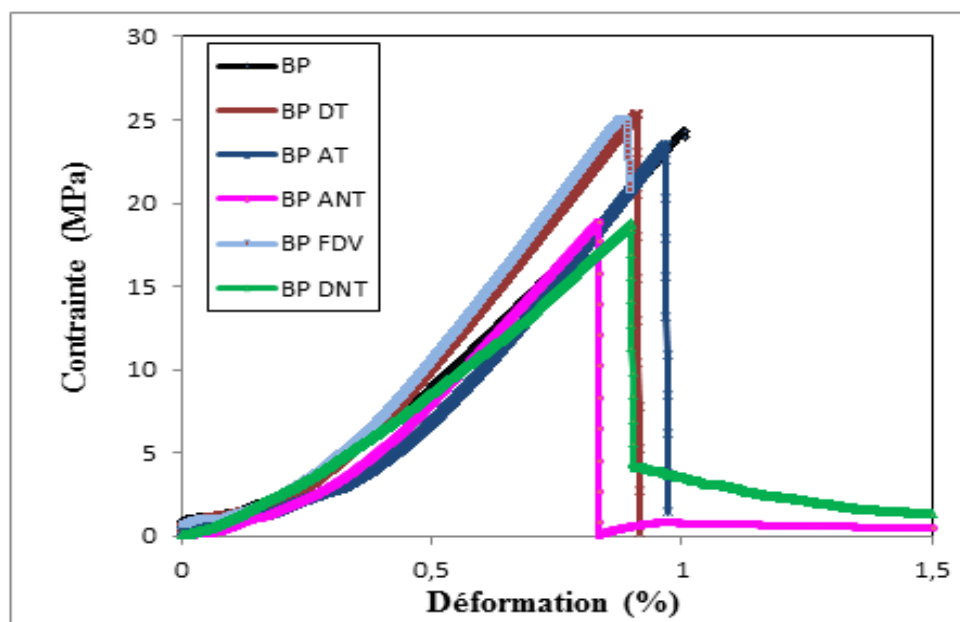
fig.VI.2 : Courbes d'évolution des contraintes en fonction de déformation des différents bétons polymères.

- a) Béton polymère non renforcé. b) Béton polymère renforcé par fibres de verre. c) Béton polymère renforcé par Doum non traité. d) Béton polymère renforcé par Doum traité 2% NaOH. e) Béton polymère renforcé par Alfa non traité. f) Béton polymère renforcé par Alfa traité 2% NaOH.

Alors, cette reproductibilité est moins importante dans le cas : c) Béton polymère Renforcé par Doum non traité et e) Béton polymère renforcé par Alfa non traité.

On remarque que cet écart touche principalement les Bétons Polymères renforcés par fibres non traitées (Alfa et Doum). Cela se traduit par la non-uniformité de la répartition des fibres non traitées dans le mélange (silice et résine), cette non-uniformité n'a pas touché le niveau de charge (contraintes) mais seulement a conduit à une dispersion au niveau de la déformation qui est de l'ordre de 22,6% et 12,7% pour le **BP** renforcé par Doum non traité et le **BP** renforcé par Alfa non traité respectivement. D'où la rigidité entre le même matériau change d'un ordre proche.

La figure **VI.3** représente la superposition des courbes contraintes et déformations des différents bétons polymères. Le matériau **BP-FDV** (fibres de verre) est ajouté ici à titre de comparaison. En vertu de cette figure, le matériau **BP-FDV** (fibres de verre) enregistre la contrainte la plus importante qui de  $25,6 \pm 0,5\text{MPa}$ . Comparé au béton polymère non renforcé, le matériau **BP-FDV** montre une amélioration à l'ordre 9,8%.



**Fig.VI.3 : Superposition des évolutions de la contrainte en fonction de déformation des types du Béton polymère renforcé et non renforcé par des fibres.**

Le matériau **BP-DT** (Doum traité) montre une contrainte de  $24,7 \pm 0,34\text{MPa}$ , et enregistre une amélioration de 6,6% et même pour **BP-AT** (Alfa traité) enregistre une amélioration par 2,6% comparé au matériau **BP** non renforcé. Ces améliorations se traduit par :

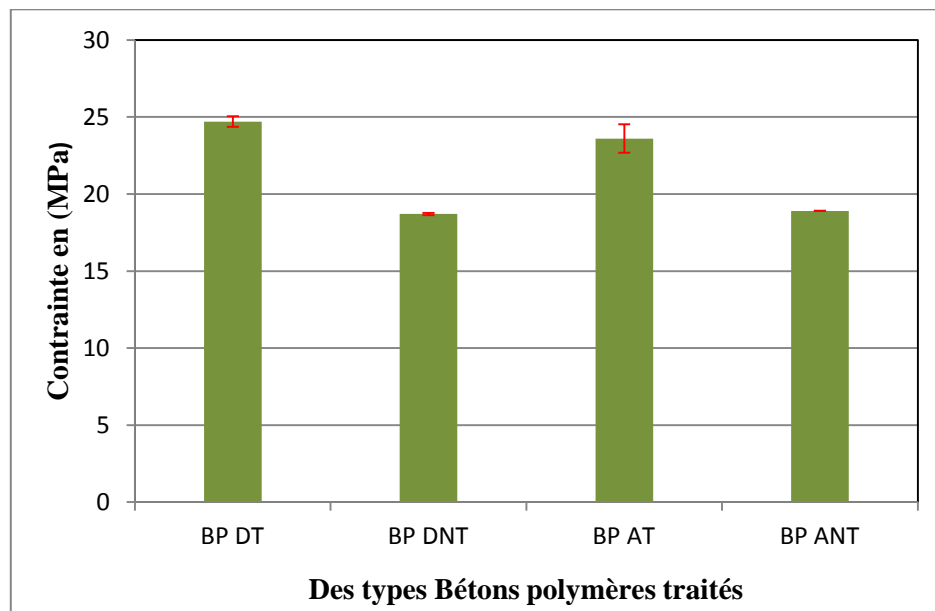
- Une bonne adhésion entre fibre/matrice.
- Une bonne répartition des fibres.

- La résistance des fibres.

Les autres matériaux **BP-DNT**, **BP-ANT** enregistre une réduction remarquable de la contrainte de rupture comparé à **BP** non renforcé. Cette réduction est de l'ordre de 18%. Cela semble s'expliquer par :

- La mauvaise adhésion fibre/matrice,
- Mauvaise répartition des fibres (homogénéité).

D'autre part, Il est important de signaler l'effet de traitement chimique sur le comportement mécanique en flexion du béton polymère renforcé par fibres végétales. Dans les deux cas des fibres traitées (Alfa ou Doum), la contrainte à la rupture du béton polymère s'améliore de l'ordre de 24% et de 20% respectivement pour le Doum et Alfa.



**Fig.VI.4 : Effet de traitement chimique (2% NaOH) sur la contrainte du BP.**

On constate aussi que la contrainte de rupture du Béton **BP-DT** (Doum traité) se caractérise par une valeur assez proche à celle du Béton **BP-FDV** (fibres de verre) (un écart seulement de 4% entre les deux matériaux) ce qui nous encourage à utiliser les fibres végétales généralement, et les fibres de Doum particulièrement comme renfort du béton polymère.

### VI.1.2. Analyse des modules en flexion

L'effet de l'ajoute de différentes fibres végétales traitées et celles non traitées dans le béton polymère est représenté par la figure **VI.5**. Le matériau **BP-FDV** (fibres de verre) est ajouté ici à titre de comparaison. Le matériau **BP-DT** (Doum traité) enregistre le module en

flexion le plus important  $21,07 \pm 0,73$  GPa. Comparé au matériau **BP** non renforcé, ce module augmente d'un ordre de 20%. Le module de Young pour le matériau **BP-AT** (Alfa Traitée) est de  $16,71 \pm 0,63$  GPa. Cette valeur montre une amélioration de 1,2% par rapport à **BP** non renforcé.

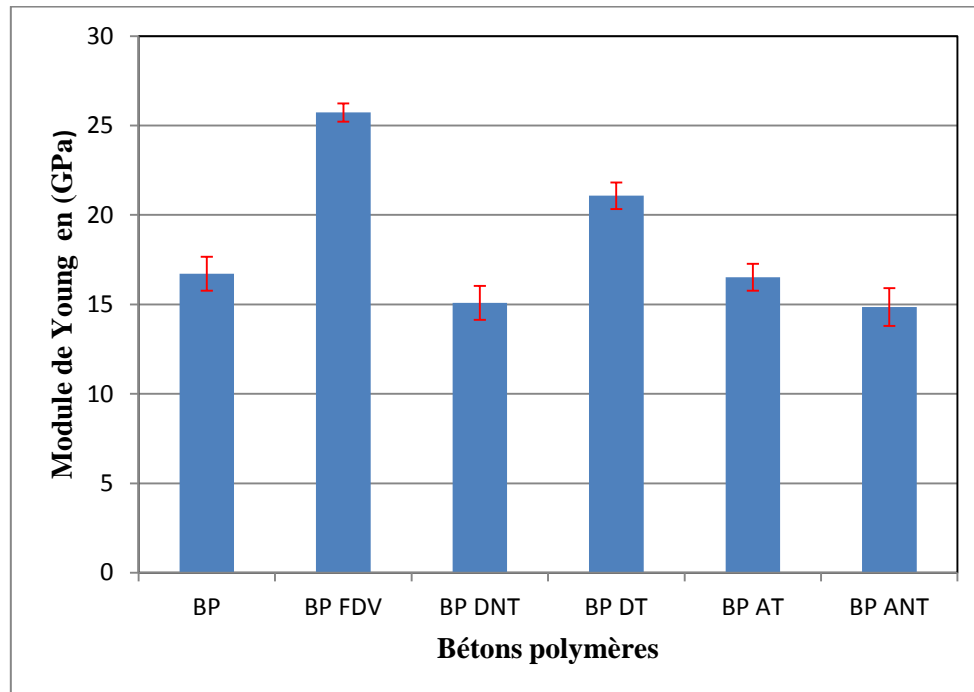


Fig.VI.5 : Paramètre de flexion des éprouvettes testés (Module de Young).

En revanche, pour les bétons polymères renforcés par les fibres non traitées (cas du matériau **BP-DNT** et **BP-ANT**), comparés au **BP** non renforcé, les résultats montrent une réduction du module de flexion de l'ordre de 9,7% et 11% pour Doum et Alfa respectivement. Cela se traduit par :

- Manque d'adhérence entre fibre végétale non traitée et matrice.
- Les fibres végétales sont considérées ici comme un défaut dans la structure.

A titre de comparaison, un taux de l'ordre 18% entre le module de Young du **BP-FDV** (fibre de verre) et béton polymère **BP-DT** (Doum traité). Cette différence est assez acceptable pour dire que les fibres de Doum traitées peuvent être utilisées comme renfort pour les bétons polymères. Les résultats des tests en flexion sur les éprouvettes lisses montrent que les propriétés mécaniques du module de flexion des bétons polymères renforcés par fibres végétales changent fortement avec le traitement chimique de ces fibres (Doum et Alfa). La figure **VI.6** montre clairement cette différence, et nous permet de refléter un écart de 28% et 10% par rapport des bétons renforcées par des fibres non traité de Doum et Alfa respectivement.

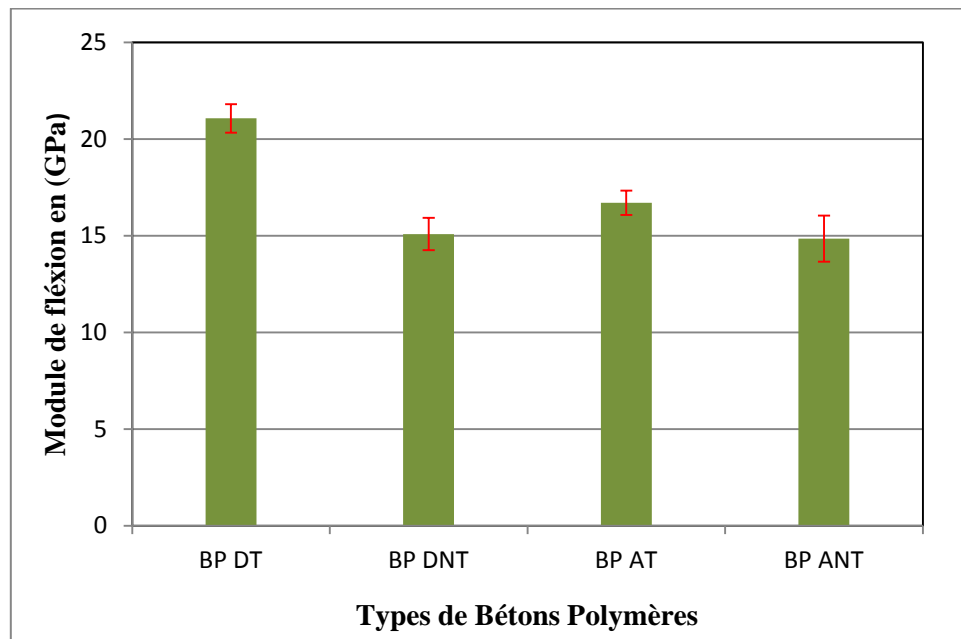


Fig.VI.6 : Effet de traitement chimique (2% NaOH) sur le module de flexion du BP.

## VI.2. Analyse de la résistance à la compression

La figure VI.7 représente la variation de la résistance à la compression des différents bétons polymères. On remarque que les bétons polymères **BP-FDV** (fibre de verre), **BP-DT** (Doux traité) et **BP-AT** (Alfa Traitée) marquent une augmentation de la résistance à la compression de l'ordre de 28%, 16% et 13% respectivement comparés au **BP** non renforcé.

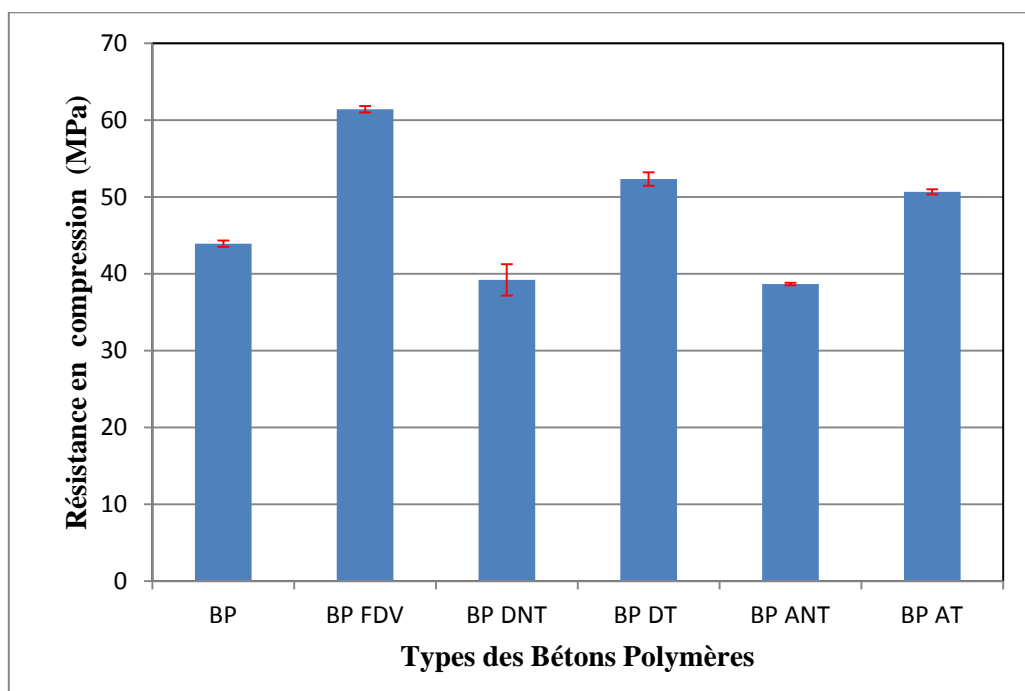


Fig.VI.7 : Variation de la résistance à la compression des différents BP renforcé et non renforcé.



Pour les deux autres bétons renforcés (renforcés par fibres végétales non traités) les valeurs de résistance à la compression sont réduites jusqu'à 10,6% pour **BP-DNT** et 11,9% pour **BP-ANT** par rapport à un béton polymère non renforcé.

D'autre part, l'effet de traitement chimique sur la résistance se apparents entre les matériaux **BP DNT/DT** et **BP ANT/AT** par une amélioration de 25% et 23% respectivement.

Le **Tableau.VI.1** résume les résultats obtenus pendant l'essai de compression des différents Bétons Polymères.

Béton polymère	Désignations	$R_C$ compression (MPa)
Béton non renforcé	BP	$43.93 \pm 0.41$
Béton par fibre de verre	BP FDV	$61.42 \pm 0.43$
Béton par Doum non traité	BP DNT	$39.23 \pm 2.03$
Béton par Doum traité 2%	BP DT	$52.34 \pm 0.9$
Béton par Alfa non traité	BP ANT	$38.7 \pm 0.15$
Béton par Alfa traité 2%	BP AT	$50.7 \pm 0.33$

**Tableau.VI.1 : Différentes résistance en compression des bétons polymères testés.**

### VI.3. Paramètre de rupture ( $K_R$ ):

La figure VI.8 représente l'histogramme des différentes valeurs du facteur d'intensité de de contraintes des différents bétons polymères fissurés. Cet histogramme montre que le béton polymère renforcé par les fibres de Doum non traitées (**BP-DNT**) enregistre la plus grande valeur qui est de  $2,1 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . En revanche, le matériau **BP-DT** (Doum traité) a une valeur moyenne réduite d'un ordre de 10,9%. Cette réduction peut être expliquée par la nature fragile de la fibre de Doum traité (à la présence de la fissure, les fibres de Doum traitées se rompent facilement sous l'effet de leur forte adhésion et l'avance du fond de fissure). D'autre part, dans le cas des deux matériaux **BP-ANT** et **BP-AT** (fibre Alfa non traitée et traitée) une augmentation d'un ordre proche de 8% est enregistrée pour ces deux matériaux une fois comparés au matériau **BP** non renforcé.

Pour comparaison, le facteur d'intensité de contrainte enregistré pour le béton polymère renforcé par des fibres de verre montre une amélioration de 31% comparé au **BP- DNT** (Doum non traité). Bien que cet écart est important (1/3 de la valeur  $K_R$  du celle de **BP-FDV** (fibre de verre), mais elle acceptable comparée au autres valeurs déjà déterminées dans la littérature :

Pour le matériau BP renforcé par fibre de Palmier Dattier la valeur de  $K_R$  égale  $1,73\text{MPa.m}^{1/2}$  [21].

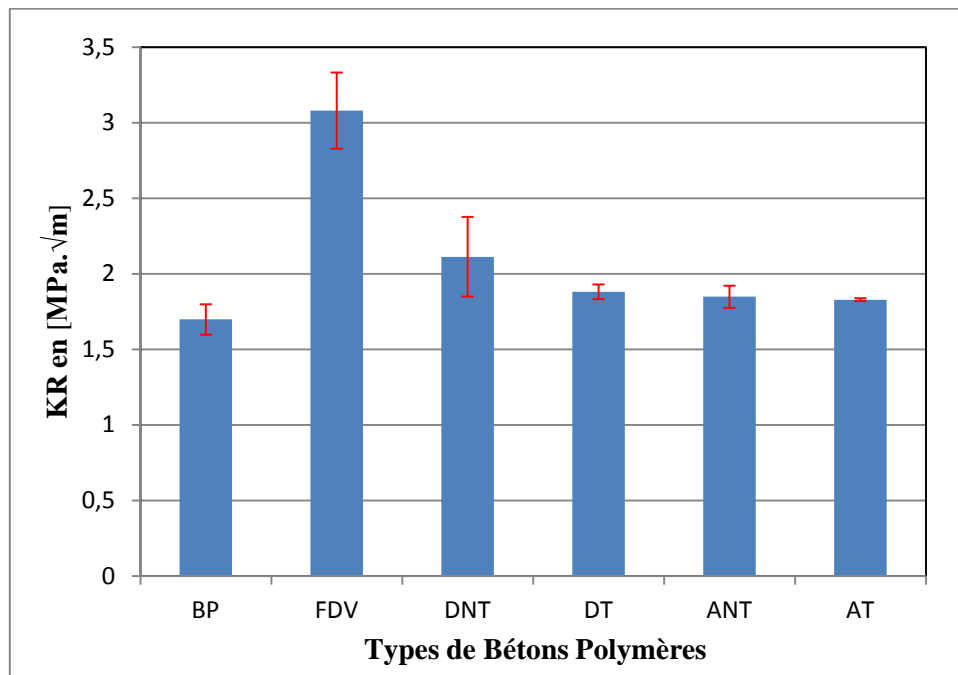
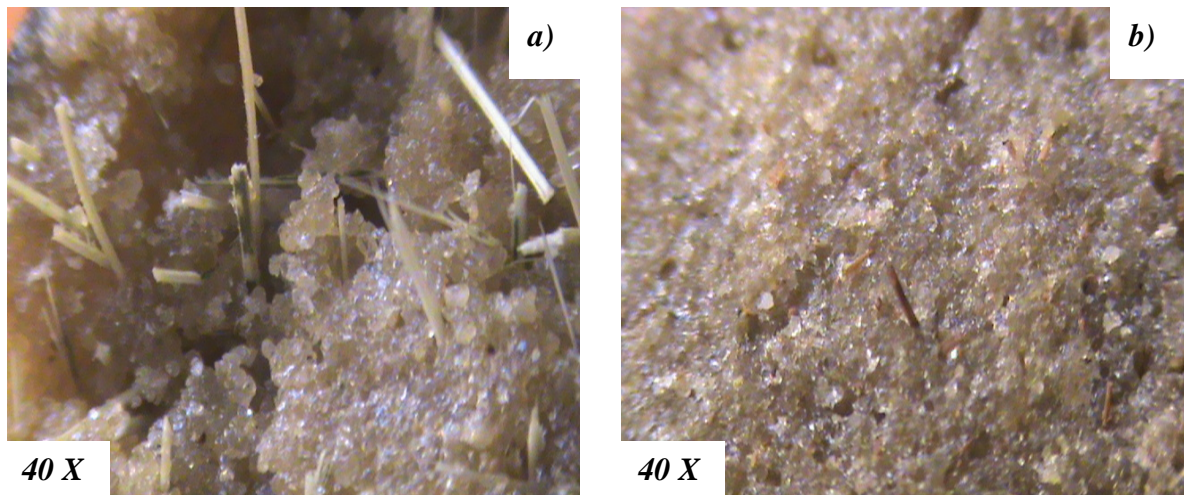


Fig.VI.8: Paramètre de rupture des éprouvettes en bétons polymères testés.

#### VI.4. Faciès de rupture des bétons polymères :

Les faciès de rupture des éprouvettes en flexion trois points des différents bétons polymères renforcés par fibres végétales et synthétiques et celle du béton polymère non renforcé sont représentées par les **figures** VI.9, VI.10 et VI.11.

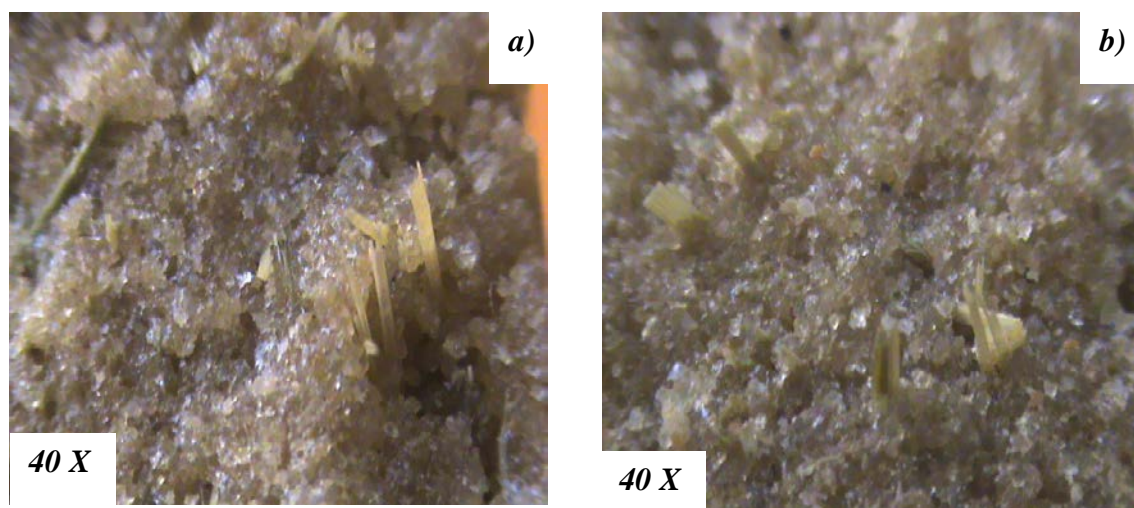
**La figure** VI.9 illustre la face rompue du béton polymère renforcé par les fibres de Doum traitées (Fig.VI.9b) et non traitées (Fig.VI.9a). Il est remarquable que le **BP-à fibres non traitées** se caractérise par un pull-Out important. Les fibres sont apparentes à diverses longueurs. Cela peut être expliqué la mauvaise adhésion entre la fibre non traitée et matrice.



**Fig.VI.9: Faciès de rupture :a) BP-DNT (Doum non traitée), b) BP-DT (Doum traitée).**

En revanche, la photographie des fibres de Doum traitée dans le **BP-DT** montre une bonne adhésion fibre/ matrice, ainsi, ces fibres sont rompues par cisaillement ce qui traduit l'effet du traitement chimique de la fibre de Doum.

De la même manière, nous avons examiné les faces rompues des deux bétons polymères **BP-ANT** et **BP-AT** (fibre Alfa non traitée et traitée) (Fig. VI.10). Cet examen nous a permis de conclure presque les mêmes remarques citées précédemment. Il est à signaler que le Pull-Out des fibres Alfa non traitées est moins important comparé à celui des fibres de Doum non traitées (Fig. VI.10a).



**Fig.VI.10: Faciès de rupture :a) BP-ANT (Alfa non traitée), b) BP-AT (Alfa traitée).**

En revanche, la photographie des fibres d'Alfa dans le **BP-à fibres traitées** montre une bonne adhésion fibre/ matrice, ainsi, ces fibres sont rompues par cisaillement ce qui traduit l'effet du traitement chimique de la fibre de Alfa (Fig. VI.10b).

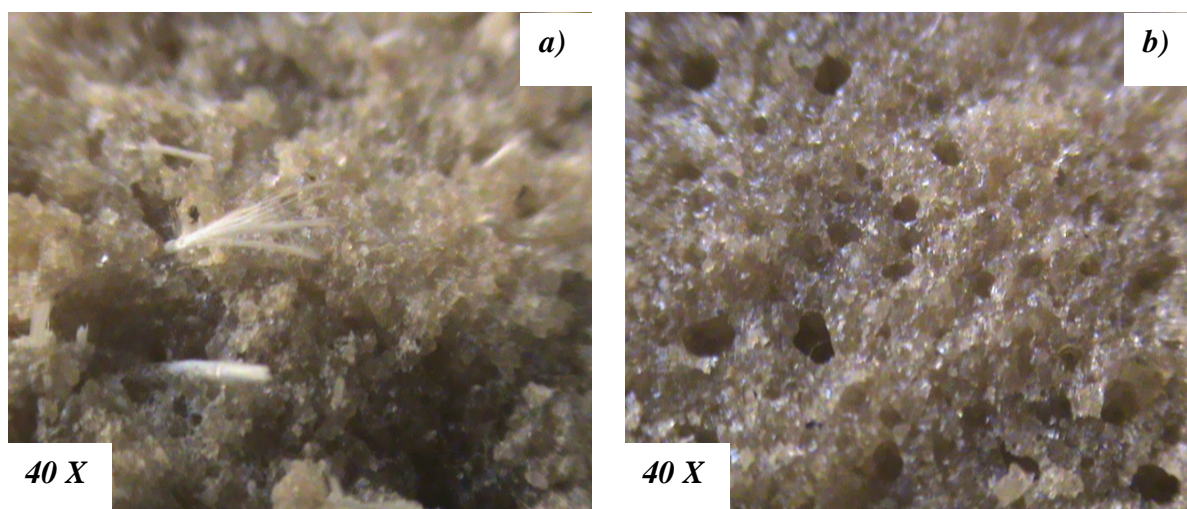
Pour résumer nos observations sur les photographies microscopiques, nous avons dressé le **tableau.VI.2**. En vertu de cette comparaison, on déduit que les fibres végétales non traitées sont adéquates pour le renforcement des bétons polymères.

Fibres non traitées	Fibres traitées
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité remarquable.</li> <li>• Pull out important.</li> <li>• Mauvaise répartition des fibres.</li> <li>• Rupture à la suite du Pull-Out des fibres (déchaussement des fibres).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité réduite.</li> <li>• Rupture des fibres par cisaillement.</li> <li>• Bonne répartition des fibres.</li> <li>• Rupture par cisaillement des fibres.</li> </ul>

**Tableau.VI.2 : La différence de faciès du rupture entre les fibres traitée et non traitée.**

Les fibres non traitées favorisent la naissance de la porosité du produit final. Et ne permet pas d'avoir un matériau homogène. En revanche, l'utilisation des fibres traitées (à 2% NaOH) peut réduire considérablement la porosité du béton obtenu, et augmenté sa résistance.

L'examen de faciès de rupture du béton polymère **BP-FDV** (fibre de verre) montre une bonne adhésion fibre/matrice (Fig. VI.11a). Les fibres sont rompues par cisaillement, autres par Pull-Out. La présence de Pull-Out semble être à la mauvaise imprégnation (mauvaise pénétration de résine dans le toron à fibres au cours de polymérisation). **La figure VI.10b** illustre la face rompue du béton polymère **BP** non renforcé. On constate que la porosité dans un tel matériau est importante. Cette porosité est présente à la suite du retrait de la résine polyester.



**Fig.VI.11 : Faciès de la rupture :a) BP-FDV (fibres de verre), b) BP non renforcé.**

## *Conclusion générale*

L'utilisation des fibres synthétique (fibres de verre) comme renforts dans un béton polymère à des impacts sur l'environnement et la vie de l'homme. Dans ce cas, nous avons choisi des fibres végétales pour réduire ces problèmes, grâce à leur comportement écologique.

D'après les résultats des tests sur les différentes éprouvettes en bétons polymères renforcés par différents types de fibres soient les fibres végétales (Doum et Alfa) ou fibre de verre à titre de comparaison de façon aléatoire, on peut dire que le traitement alcalin (NaOH) rend les fibres plus raides et conduit à des changements important dans la morphologie de la surface des fibres végétales. De plus, le traitement assure une bonne adhérence entre les fibres et la matrice polymère. L'ajout de ces fibres végétales a un effet significatif sur le comportement du matériau renforcé.

Les résultats montrent que le traitement chimique conduit à des améliorations de la contrainte, du module en flexion et de la résistance en compression de 6,6%, 20% et 16 % (cas du Doum) et respectivement comparés à celles du béton polymère non renforcé. Comparés à celles du béton polymère renforcé par fibres non traitées, ces améliorations sont de l'ordre de 24%, 28% et 25 % (cas du Doum) respectivement. Et dans le cas du béton renforcé par fibres d'Alfa traitée il y a une amélioration de 2,6%, 1,2% et 13% dans les caractéristiques précédant par rapport du béton polymère non renforcé.

Contrairement au cas de flexion, le béton polymère renforcé par les fibres de Doum non traitées résiste mieux à la propagation de fissure comparé à celui renforcé par des fibres traitées d'un ordre de 10,9%. Et même choise pour le béton renforcé par fibres d'Alfa soit traitée ou non enregistre une valeur de 8% une fois comparés au matériau **BP** non renforcé. Cette différence peut être expliqué par la nature fragile des fibres de Doum traité ou Alfa traitée (à la présence de la fissure, les fibres de Doum traitées se rompent facilement sous l'effet de leur forte adhésion et l'avance du fond de fissure).

L'analyse des photographies montre que les fibres non traitées favorisent la naissance de la porosité du produit final. De plus, l'incorporation de ces fibres dans le béton polymère ne permet pas d'avoir un matériau homogène. Dans ce cas la rupture de tel matériau favorisé principalement par le Pull Out des fibres. En revanche, l'utilisation des fibres traitées peut réduire considérablement la porosité du béton obtenu, et augmenter sa rigidité. Dans ce cas, les faciès de rupture montrent que la ruine du matériau est prédominée par le cisaillement des fibres. Ce qui explique la bonne adhérence fibre/matrice.

D'après les résultats, la contrainte, le module en flexion, la résistance en compression et le facteur d'intensité de contrainte du BP-FDV sont de l'ordre de 4%, 18% 14% et 31 % respectivement comparés à celles du béton polymère renforcé par les fibres de Doum. On peut dire que les caractéristiques de BP renforcé par les fibres de Doum sont comparables à celles du BP renforcé par des fibres de verre, donc on peut conclure que ces fibres végétales peuvent être utilisées comme renfort dans des bétons polymères.

### ***Perspectives***

En perspectives, nous envisageons les améliorations de la qualité de la fibre végétale pour avoir des caractéristiques du béton polymère plus performant. Les améliorations peuvent être obtenues par :

- Ajouté des différents pourcentages du traitement chimique ou chercher d'autres traitements chimiques.
- Ajouté des fibres végétales longues avec traitement et sans traitement chimique pour étudier l'influence de ces fibres sur le comportement du béton polymères.
- Modifié la méthode de l'extraction des fibres végétales et chercher un autre type de fibre renouvelable et naturelle utilisée comme renfort du béton polymère.



## *les références bibliographiques*

---

- [1] Laurent Gornet, « *généralité sur les matériaux composites* », école centrale Nantes, France, 2011.
- [2] Yahann Ledru, « *étude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautique* », doctorat de l'université de Toulouse, 14 décembre 2009.
- [3] Anh Dung Ngo, « *introduction sur les matériaux composites* », Ecole de technologie supérieure Montréal, Canada, 2013.
- [4] CARMA, « *Glossaire des matériaux composites* », centre d'animation régional en matériaux avances, Décembre 2006.
- [5] Marianne le Troedec, « *caractérisation des interactions physico-chimique dans un matériau composite à base phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques* », thèse doctorat école science et technologies, université de Limoges, décembre 2009.
- [6] Christophe Paris, « *étude et modalisation de la polymérisation dynamique de composites à matrice thermodurcissable* », thèse de doctorat de l'université de Toulouse, novembre 2011.
- [7] Jérémie Aucher, « *étude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable* », thèse doctorat, INSA de Rouen, France, 2009.
- [8] Zapata Massot Céline, « *synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux* », thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004.
- [9] Ministère des ressources naturelle, « *produite composite Bois-polymère* », centre de recherche industrielle du Québec, avril 2003.
- [10] Belkacemi Cherifa, « *étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renforts en matière végétale* », mémoire magister, université M'Hamed Bouguerra Boumerdes, 2006.
- [11] Haddadi Manel, « *étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère* », mémoire master, université Al Hadj Lakhdar, Batna, 2011.
- [12] Lakel Adel, « *Évaluation de la dégradation de propriétés et le comportement du béton polymère à renfort de fibres végétales et additifs minéraux* », mémoire master, université de M'sila, Juin 2012.
- [13] Bezato Tsaranofy Zita Fredo, « *les palmiers dattiers : étude de la filière, utilisation et diversité variétale* », mémoire DEA, université de Tolirara, domaine biologie végétales, juillet 2013.
- [14] Bates.J, « *les fibres naturelles pour les composites* », KU.LEUVEN, octobre 2014.

## *les références bibliographiques*

---

- [15] Aurélie Vissac, « *matière en fibre* », mémoire du diplôme de spécialisation et d'approfondissement architecture de terre, septembre 2014.
- [16] Yahiaoui Lamia, « *caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales Diss* », mémoire magister, option mécanique applique, université de Sétif, 2011.
- [17] Moktari Abdessamed, « *influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier* », université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [18] Mohamed Dallel, « *évaluation du potentiel textile des fibres halfa, caractéristique physico-chimique de la fibre au fil* », thèse doctorat, université de haute Alsace-Mulhouse, France, 2012.
- [19] CARMA, « *Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d'origine renouvelable* », centre d'animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.
- [20] Sofien Bouzouita, « *optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel* », thèse doctorat, école centrale de Lyon, France, janvier 2013.
- [21] Daghefel Azzedine, « *Étude du comportement à la rupture du béton polymère renforcé par des fibres végétales* », mémoire master, université de M'sila, juin 2012.
- [22] Baali Hafida, « *étude de l'effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur le comportement mécanique du béton polymère* », mémoire master, université de M'sila, juin 2014.
- [23] Rachedi Mokhtar, « *contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre base de sable de dune renforcé par des fibres de palmier dattier* », mémoire magister, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [24] Rachid Berbaoui, « *identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaire à base polymère* », thèse de doctorat, université du Maine option génie mécanique, janvier 2010.
- [25] cours connaissance du textile, « *la classification des fibres* », Institut provincial de Nursing du centre manage, janvier 2009.
- [26] [http : // W.W.W. designenbretagne.com/béton polymère /2010](http://W.W.W.designenbretagne.com/béton%20polymère/2010).
- [27] Oussama Elalaoui, « *optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde* », thèse doctorat, université de Tunis EL-Manar, février 2012.
- [28] Rokbi Mansour, « *comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-verre* », mémoire magister, centre universitaire Mohamed Boudiaf de M'sila, 2011.



## *les références bibliographiques*

---

- [29] A.Boulaouad, « *cours de la mécanique de rupture* », université de M'sila, 2014.
- [30] Kondo Djmédo, « *modalisation du comportement des roches par la mécanique linéaire* », thèse de doctorat l'université des sciences et technique de Lille.
- [31] ESPCI, « *élasticité-plasticité-rupture mécanique du solide et des matériaux* », laboratoire d'hydrodynamique et mécanique physique.
- [32] Boumediene Nedjar, « *mécanique de l'endommagement théorie du premier gradient et application au béton* », thèse doctorat école nationale des ponts et chaussées, France, octobre 2010.
- [33] Haidar Murhaf, « *optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde* », thèse doctorat université de Cergy-pontoise, spécialité génie civil, mars 2011.
- [34] Dr.Boubakar, Zaouachi, « *les résines* », cours matériaux composites, 2011.
- [35] Rokbi.M et Osmani.H, « *l'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécanique* », Vol 2, P1-P2, congrès français de mécanique, Septembre 2011.
- [36] Mahaman Ibrahim Hamidou, « *étude de faisabilité d'un marché autour du palmier doum et de ses sous produits* », mémoire d'ingénieur, université de Niger, faculté d'agronomie, 2004.
- [37] Salem Saghaier, Fayrouz Zbidi and Midi Zidi, « *characterization of Doum palm fibres after chemical treatment* », Vol 79, laboratory of mechanical engineering, Tunisa, textile journal 2009.

## Résumé

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des ressources naturelles telles que les fibres végétales en les utilisant comme renfort du béton polymère. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, compression et rupture.

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de l'introduction des fibres de Doum et fibres d'Alfa dans un béton polymère. Ainsi que l'influence du traitement chimique par 2% de NaOH. Les résultats des tests sur les différentes éprouvettes en bétons polymères renforcés par ces fibres, montrent que la solution NaOH a un effet significatif surtout sur le comportement à la flexion trois points, compression et la rupture. Les résultats de ce travail suggèrent que les fibres de Doum sont comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort dans des matrices polymériques. Elles sont complètement aptes à l'utilisation comme renfort dans les bétons polymères.

**Mots clés :** renforcement, fibres végétales, traitement chimique, béton polymère, fibres de Doum, fibres d'Alfa.

## Abstract

The objective of this work is the valorisation of natural resources such as vegetable fibres using them as reinforcement of the polymer concrete. For reduced environmental impact and improve the mechanical behavior of concrete in bending, compression and rupture.

In this work, we studied the effect of the introduction of Doum fibres and fibres of Stipa Tenacissima in a polymer concrete. Thus the influence of chemical treatment with 2% NaOH. The results of tests on different test specimens concrete these fibre-reinforced polymers show that the NaOH solution at a significant impact especially on bending behaviour three points, compression and the rupture. The results of this work suggest that the fibers of Doum are comparable with other natural fibres used as reinforcement in polymeric matrices. They are completely suitable for the use as reinforcement in concrete polymers.

**Keywords:** reinforcement, vegetales fibers, chemical treatment, concrete polymer, Doum fibers, Stipa Tenacissima fibers.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو استغلال الموارد الطبيعية مثل الألياف النباتية باستخدامها كتعزيزات ملموسة في الخرسانة البوليميرية. لتقليل الأثر البيئي، وتحسين السلوك الميكانيكية للخرسانة في الانحناء وضغط وتمزق

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير إدخال ألياف الدوم والحلفاء على الخرسانة البوليميرية. بالإضافة إلى ذلك تأثير المعالجة كيميائية بـ 2% من هيدروكسيد الصوديوم. وأظهرت نتائج الاختبارات على عينات مختلفة من الخرسانة البوليميرية المدعمة بالألياف إن محلول هيدروكسيد الصوديوم له تأثير كبير على سلوك هذه المواد في تجربة الانحناء الثلاثي، الضغط وتمزق أيضا. نتائج هذه الدراسة تشير إلى أن ألياف الدوم يمكن مقارنتهم مع الألياف الطبيعية الأخرى المستخدمة كتعزيز في الخرسانة البوليميرية. فهي مناسبة تماما لاستخدامها كتعزيز في الخرسانة البوليميرية.

**المفاتيح :** التدعيم، ألياف نباتية، معالجة الكيماوية، الخرسانة البوليميرية، ألياف الدوم، ألياف الحلفاء