



Université Amar Telidji Laghouat

Faculté de Génie Civil et Architecture

Département de Génie civil



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Guesmia Amel Kenza

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème :

Etude des propriétés physico-mécaniques d'un composite en plâtre renforcé par les fibres végétales de sisal

Jury de soutenance

Nom et prénom	Grade	Qualité
Mr. Bouziani Tayeb	Pr	Président
Mr. Ferhat Ahmida	M.A.A	Examineur
Melle. Djoudi Amina	M.C.B	Encadreur
Mr.Krobba Benharzallah	M.C.B	Co- Encadreur

2019-2020

Dédicaces

A l'âme de mon père Mohamed Guesmia qui m'a toujours fait confiance et qui crue à moi et à mes études.

A ma perle des yeux, ma fierté et ma vie ma mère.

A celle qui me soutien toujours ma sœur Sara.

A qui m'a toujours aidé et encourager mon frère Aissa.

A mon ange Feriel.

A ma chère grande mère.

A mes tantes et mes oncles.

A mes amis : Tarek, Fatna, Rafiqua, Houda, Imane , Kouther.

A tous les enseignants du département de Génie Civil.

AMEL KENZA

Remerciements

***Je** remercie avant tout Allah de m'avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.*

***Je** tiens à remercier ma promotrice, Melle **Djouidi Amina**, pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité durant l'élaboration de ce travail.*

***Je** tiens à remercier mon co-promoteur **Monsieur Benharzallah Krobba** pour ses conseils et sa disponibilité durant l'élaboration de ce travail.*

***Je** tiens également à adresser mes vifs remerciements à **Monsieur. Bouziani Tayeb**, pour le grand honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de soutenance.*

***Mes** vifs grands remerciements et notre sincère gratitude à Monsieur **Ferhat Ahmida** pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse*

***Mes** remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil en et à toute l'équipe de laboratoire de génie civil pour tous les efforts qui ont fait à bien mener notre formation et notre projet de fin d'étude.*

Amel Kenza.

Résumé

Le travail entre dans le cadre de l'utilisation des matériaux locaux et des ressources renouvelables. Le but est d'améliorer les propriétés physico-mécaniques d'un composite à base de plâtre. Les matériaux utilisés sont : sable de dune, fibres de sisal.

L'analyse des résultats montre que l'incorporation des fibres de sisal augmente la densité et la résistance à la compression du composite à base de plâtre mais décroît la résistance à la flexion pour certains pourcentages et longueurs élevés.

Mot clés : plâtre, sable de dune, fibre de sisal, densité, résistance à la compression, résistance à la flexion.

Abstract

The present work enters in the frame of the use of local materials and renewable resources. It aims to improve the physical-mechanical properties of composite based plaster. The used materials are dune sand, sisal fibers. The analyses of results shows that the incorporation of sisal fibers increase the density and the compressive strength of composite based plaster but decrease the flexural strength for elevated percentage and length.

Key words: Dune sand, plaster, sisal fiber, density, compressive strength, flexural strength.

المخلص

يدخل هذا العمل في إطار استغلال المواد المحلية والثروات المتجددة التي تهدف إلى تحسين الخصائص الفيزيوميكانيكية لمركب للجص. المواد المستخدمة هي:

رمل الكثبان وألياف السيزال.

تحليل النتائج يبين أن إدخال ألياف السيزال في مركبات الجص يزيد في كثافته وكذا مقاومة ضغطه لكن ينقص في مقاومة الانحناء. قد سجلت هذه الدراسة لبعض النسب والأطوال المرتفعة لألياف السيزال.

الكلمات المفتاحية: الجص، رمل الكثبان، الياف السيزال، الكتلة الحجمية، مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء.

Table de matière

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	
Partie A : généralités sur le plâtre	
I.1. Introduction	2
I.2. Plâtre	2
I.2.1. Matière première.....	2
I.2.2. Différentes Origines de plâtre	3
I.2.3. Principe de fabrication	5
I.2.4. Les différents types de plâtre	8
I.2.5. Forme de plâtre et son utilisation	8
I.2.6. Recyclage du plâtre.....	9
I.2.7. Valorisation du plâtre.....	10
I.2.8. Domaines d'utilisation de plâtre	12
I.2.9. Domaine de construction et urbanisme.....	13
I.2.10. Eléments préfabriqués à base de plâtre	14
I.2.11. Caractéristiques du plâtre.....	15
I.2.12. Propriétés physiques et mécaniques du plâtre	16
I.2.13. Résistance mécanique	18
PARTIE B : GENERALITES SUR LES COMPOSITES ET SUR LES BETONS DE FIBRES	
I.3. Matériaux composites	20
I.3.1. Définition des matériaux composites.....	20
I.3.2. Classification des matériaux composites.....	21
I.4. Les fibres	24
I.4.1. Définition d'une fibre végétale.....	25
I.4.2. Composition chimique de la fibre naturelle	26
I.4.3. Morphologie de la fibre végétale.....	29
I.4.4. Structure de la fibre végétale	29
I.4.5. Les fibre sisal	31

Table De Matière

I.4.6. La plante de sisal.....	31
I.4.7. Propriété de fibre de sisal.....	32
I.4.8. Extraction de la fibre de sisal.....	32
I.4.9. Avantages de la plante pour l'environnement.....	32
I.5. Béton ou mortier fibre	33
I.5.1. Définition	33
I.5.2. Le rôle des fibres	33
I.5.3. Propriétés des bétons fibrés	34
I.5.4. Caractéristiques des composites cimentaires incorporant des fibres végétales	35
I.5.5. Propriétés à l'état frais	35
I.5.6. Propriétés à l'état durci.....	37
I.5.7. Comportement mécanique d'un composite cimentaire bio fibré	37
I.5.8. Durabilités des composites cimentaires a fibres végétales	40
I.6. Conclusion.....	41

CHAPITRE II : CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction	42
II.2. Matériaux utilisés	42
II.2.1. Plâtre	42
II.2.1.1. Analyse chimique du plâtre	42
II.2.1.2. Analyse minéralogique par diffraction par rayon x.....	43
II.2.1.4. Masse volumique apparente (NFP 18-555).....	45
II.2.1.5. Compacité et porosité (NFP 18-555).....	46
II.2.1.6 .finesse de mouture (NF B 12.401).....	47
II.2.1.7.Détermination du taux de gâchage a saturation du plâtre (NFB 12-401)	48
II.2.1.7. Détermination de temps de début et fin de prise (NF B 12.401)	49
II.2.1.9. Détermination de la résistance mécanique d'un matériau.....	50
II.2.2. Sable de dune	51
II.2.2.1. Masse volumique apparente (NFP 18-555).....	51
II.2.2.2. Masse volumique absolue par la méthode d'éprouvette graduée (NFP 18- 555)	52

Table De Matière

II.2.2.3. Coefficient d'absorption	52
II.2.2.4. Compacité et porosité (NFP 18-555)	52
II.2.5.1.Compacité	52
II.2.2.5. Equivalent de sable (NFP 18-598)	52
II.2.2.6. Morphologique des grains de sable de dune	53
II.2.2.7. Analyse granulométrique (EN 933-1).	53
II.2.2.8. Module de finesse de sable (EN 933-1).	54
II.2.3. La chaux.....	55
II.2.3.1Analyse chimique de la chaux utilisée.....	55
II.2.4. Eau de gâchage	56
II.2.5. Les fibres de sisal.....	56
II.2.5.1. Propriété physico-mécaniques des fibres de sisal	57
II.3. Formulation des composite en plâtre	57
III.3.1. Le processus de malaxage.....	58
III.3.2. Conservation des éprouvettes.....	58
II.4. Caractérisation physique	59
II.5. Caractérisation mécanique	59
II.5.1. Résistance à la flexion (EN 196-1)	59
II.5.2. Résistance à la compression (EN 196-1)	59
II.6. Conclusion.....	60

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Introduction	61
III.2. Etude des propriétés physiques.....	61
III.2.1. Masse volumique apparente	61
III.2.1.1. Masse volumique de composite plâtre +fibre.....	61
III.2.1.2. Masse volumique de mortier de plâtre +fibre.....	63
III.3. Etude des propriétés mécaniques.....	64
III.3.1. Résistance à la flexion	64
III.3.2. Résistance à la compression	67
III.4. Conclusion.....	70
Conclusion générale	71

Liste Des Figures

CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Figure I.1: Organigramme de cycle du plâtre.....	3
Figure I.2: Différents systèmes de cristallisation de gypse.....	4
Figure I.3 : Principe de fabrication du plâtre.....	6
Figure I.4: Procédé de fabrication de plâtre.....	8
Figure I.5 : Déchet de plâtre récupéré	10
Figure I.6: Recyclage de plâtre	10
Figure I.7 : cycle de valorisation des déchets de plâtre.....	12
Figure I.8 :Carreau de Plâtre.....	14
Figure I.9 : Elément plafond	14
Figure I.10 : Elément décoratif	15
Figure I.11 : L'influence de rapport E/P sur la densité de plâtre.....	18
Figure I.12 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques	18
Figure I.13: Matériau composite	20
Figure I.14 : Fibre de verre	22
Figure I.15 : Fibre de carbone	22
Figure I.16 : Fibre de kevlar	23
Figure I.17 : fibre de polyamide	23
Figure I.18 : Le bore	23
Figure I.19 : Fibre d'aluminium	23
Figure I.20 :Particules de Nitrures.....	24
Figure I.21 : Particules de carbures	24
Figure I.22 : classification des fibres naturelles	25
Figure I.23 : Classification des fibres naturelles d'origines végétale.....	26
Figure I.24 : Structure de la cellulose.....	27
Figure I.25 : Structure de l'hémicellulose	27
Figure I.26 : Structure de la lignine	28
Figure I.27 : Structure d'une fibre	29
Figure I.28 : Schéma de la microstructure d'une fibre végétale.....	30
Figure I.29: Plante d'agave sisalana.....	31
Figure I.30: Extraction de la fibre de sisal : (a) plante de sisal, (b) décorticage, (c) séchage, (d) fibre brute	32

Liste Des Figures

Figure I.31 : Courbes force-déplacement typiques en flexion d'un matériau cimentaire non-fibré et de matrices cimentaires renforcés par des fibres	35
Figure I.32 : Temps d'écoulement de mortiers renforcés de fibres de lin.....	36
Figure I.33 : Comportement d'un échantillon de pâte de ciment et d'un composite ciment / fibres végétales en flexion.....	38
Figure I.34 : Influence du dosage et de la longueur des fibres de lin sur la résistance en flexion.....	39
Figure I.35 : Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur la résistance en compression du composite cimentaire).....	39
Figure I.36: Influence du taux de fibres de lin sur la résistance en compression du mortier	40

CHAPITRE II : CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Figure II.1 : Plâtre utilisé.	42
Figure II.2: Diffractogramme du plâtre utilisé	43
Figure II.3 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue.	44
Figure II.4 : Protocole de l'essai.....	45
Figure II.5: Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.....	45
Figure II.6: Équipements nécessaires.....	49
Figure II.7 : Morphologie des grains de sable de dune.....	53
Figure II.8: Courbe granulométrique de sable de dune.	54
Figure II.9 : la chaux utilisée.....	55
Figure II.10 : Fibres de sisal en état de vente.	56
Figure II.11 Les fibres de sisal coupées en différents longueurs.....	56

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure III.1: Variation de la masse volumique pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre	62
Figure III.2: Variation de la masse volumique pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	63
Figure III.3: Variation de la résistance à la flexion pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.	65
Figure III.4 : Variation de la résistance à la flexion pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre	66

Liste Des Figures

Figure III.5 : Variation de la résistance à la compression pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	68
Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	69

CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Tableau I.1: Classification de la pierre à plâtre.....	5
Tableau I.2 : caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate.....	16
Tableau I.3 : composition chimique des fibres végétales.....	28
Tableau I.4 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.....	29
Tableau I.5: propriété de fibre de sisal.....	32

CHAPITRE II : CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Tableau II.1: Analyse chimique du plâtre.	42
Tableau II.2 :Finesse des plâtres de construction.....	47
Tableau II.3: Résultats de finesse de plâtre.	47
Tableau II.4 : Détermination de début et de fin de prise pour un plâtre de construction.....	50
Tableau II.5 : propriétés mécaniques du plâtre.	51
Tableau II.6: Résultats obtenus de l'équivalent de sable.....	53
Tableau II.7: analyse chimique de la chaux utilisée.....	55
Tableau II.8 : Caractéristiques physico-mécaniques des fibres utilisées.....	57
Tableau II.9 : Formulation des composite en plâtre.....	58

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau III.1: Variation de la masse volumique pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	61
Tableau III.2: Variation de la masse volumique pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	63
Tableau III.3: Variation de la résistance à la flexion pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.....	64
Tableau III.4: Variation de la résistance à la flexion pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.	66
Tableau III.5: Variation de la résistance à la compression pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.	67
Tableau III.6: Variation de la résistance à la compression pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.	69
Tableau IV.1: Annalyse granulométrique pour sable de dune.....	82
Tableau IV.2: Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E. Laghouat]	83

PGC : Plâtre gros de construction.

PFC : Plâtre fins de construction.

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

ρ_{abs} : Masse volumique absolue.

C: Compacité.

P : Porosité (%).

F : Finesse de mouture.

Mf: Module de finesse.

ESV: Equivalent de sable Visuel.

ESP: Equivalent de sable au piston.

Abs : Coefficient d'absorption (%).

Rf: Résistance à la flexion.

Rc: Résistance à la compression .

PT: Plâtre Témoin.

PF: Plâtre avec fibre de sisal .

MP: Mortier de plâtre.

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des matériaux de construction pour améliorer certaines propriétés, c'est la technologie la plus utilisée actuellement, l'Algérie dispose de sources énormes de fibres végétales (palmier, alfa abaca...), mais leur utilisation dans le domaine de la construction est limitée.

La recherche actuelle sur les matériaux s'intéresse au développement de nouveaux composites et matériaux de construction, dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques. Parmi ces matériaux, qui peuvent être exploités, notamment le plâtre, les fibres de sisal et le sable de dune qui occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie, l'exploitation de ces matériaux est bénéfique non seulement de point de vue économique mais également environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux.

Dans l'objectif de mettre en œuvre un composite en plâtre pouvant acquérir des performances thermomécaniques appréciables et qui peut être utilisé comme blocs ou panneaux préfabriqués, on a divisé notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur le plâtre, mortier et béton de plâtre aussi que des généralités sur les composites et le béton de fibres.

Le deuxième chapitre étudie la caractérisation physico-chimique et mécanique des matières premières utilisées pour la préparation des composites étudiés et techniques expérimentales.

Le troisième chapitre englobe les interprétations des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique de la pâte pure et le mortier de plâtre à base des fibres de sisal.

Enfin une conclusion générale sur l'étude élaborée, des recommandations ensuit des perspectives à les prendre en considération dans les futures recherches dans le domaine de construction.

Chapitre I : Recherches bibliographiques

Chapitre I : Recherches bibliographiques

Partie A : généralités sur le plâtre

I.1. Introduction

Le plâtre est connu depuis la plus haute antiquité, les égyptiens en utilisaient déjà pour la construction de la pyramide de khéops vers l'an 2800 avant Jésus-Christ, il est utilisé comme joints des blocs de pyramides, dans l'ornement des palais et mosquées moyenâgeux.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons).

C'est un matériau de grande disponibilité et très connu pour ses qualités : il est favorable à la protection de l'environnement, Ce matériau il est assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie),

C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu. La conductivité thermique de plâtre est de l'ordre de $0.50 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Contre 1.15 pour le ciment ou 50 pour l'acier. Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité des matériaux (l'air est un excellent isolant) et par la présence d'eau de structure (environ 20 %). Le plâtre dégage de l'eau en présence de chaleur, sans aucun dégagement de gaz toxique ou de fumées [1].

I.2. Plâtre

I.2.1. Matière première

Le gypse est une roche cristalline existant dans la nature sous forme stable. Par sa composition chimique de formule $\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ il est désigné par l'appellation Sulfate de Calcium dihydraté. Il représente la matière première essentielle utilisée pour la fabrication du plâtre. Le gypse naturel peut se présenter sous différentes formes plus ou moins pures macro cristallisée, micro cristallisée ou granulaire. Le gypse exploité dans l'industrie plâtrière se présente essentiellement sous l'aspect d'une roche parfois assez compacte. Il est rarement pur et se trouve mélangé à des impuretés en proportions variables, d'une carrière à l'autre. Il s'agit essentiellement de calcaire, d'argile de silice, de dolomie, d'anhydrite naturelle etc...

Le plâtre est obtenu à partir du gypse, une roche calcaire qui, une fois réduite en poudre, un procédé de chauffage va déshydrater la structure ionique du gypse. Le broyage donnera un résultat sableux mais fin.

La déshydratation se fait selon la figure suivante :

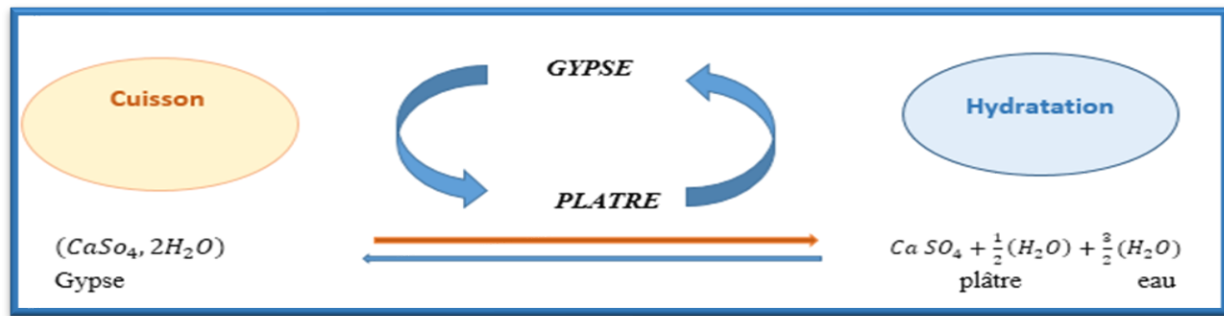


Figure I.1: Organigramme de cycle du plâtre [2].

I.2.2. Différentes Origines de plâtre

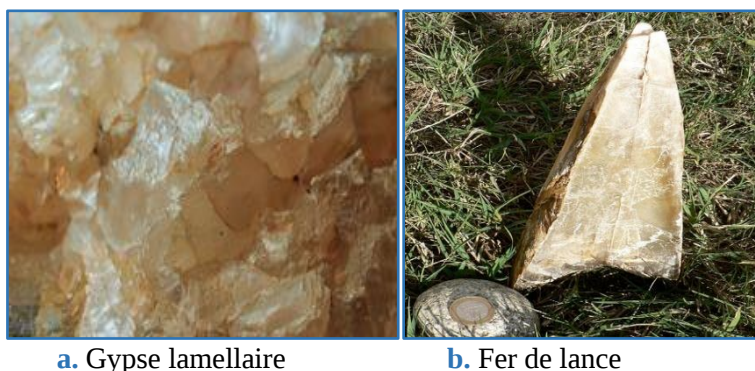
Le gypse est un sulfate de calcium di-hydraté de formule chimique $CaSO_4, 2H_2O$ est considéré comme le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. Il existe deux grandes catégories de gypses : les gypses naturels et les gypses synthétiques.

I.2.2.1. Origine naturelle

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire ou tertiaire. Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature. Il existe de nombreux gisements dans le monde,

Le gypse se cristallise dans le système monoclinique. À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature comme le montre la figure suivante sont :

- Sous forme macro cristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire, rose de sable



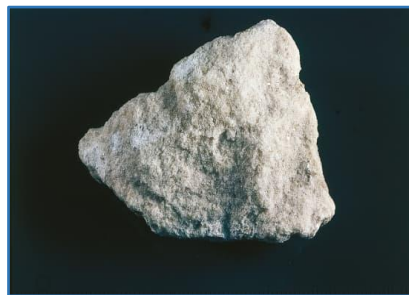
a. Gypse lamellaire

b. Fer de lance



c. Rose de sable.

- Sous forme micro cristallisée, l'albâtre le gypse fibreux, le gypse saccharoïde le gypse éolien.



d. le gypse saccharoïde

Figure I.2: Différents systèmes de cristallisation de gypse.

Le gypse exploité dans l'industrie plâtre est une roche cristallisée à grains généralement fin. Il est rarement pur et se trouve mélangé à des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre : argile, calcaire, silice, dolomite, anhydrite, etc...

a. Anhydrite

Assez rare, ou sulfate de calcium anhydre répondant à la forme chimique (CaSO_4).

b. Gypse

Sulfate de calcium di-hydrate a deux molécules d'eau, très abondant, qui répond à la formule chimique : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ce qui correspond à 79.07% de Sulfate de calcium (CaSO_4) associé à 20.93% d'eau (H_2O). C'est un fragment pur que l'on retrouve dans la nature. Il est inorganique c'est à dire qu'il ne s'est pas formé à partir de la vie. Il est formé d'éléments chimiques qui se sont mis ensemble mais qui donnent un minéral pur. Les minéraux se regroupent ensemble ensuite pour former une roche sédimentaire appelée pierre à plâtre présente des propriétés cristallographiques, chimiques et physiques

La classification de la pierre à plâtre se fait selon sa composition minéralogique (teneur en gypse **Tg**) et chimique (teneur en eau de cristallisation **Tc**) [3].

Tableau I.1: Classification de la pierre à plâtre [3].

Classe	Composition minéralogique	Composition chimique
	Tg $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ %	Tc en eau de cristallisation %
I	$\text{Tg} \geq 90$	$\text{Tc} \geq 18.83$
II	$80 \leq \text{Tg} \leq 90$	$16.74 \leq \text{Tc} \leq 18.33$
III	$70 \leq \text{Tg} \leq 80$	$14.65 \leq \text{Tc} \leq 16.74$
IV	$50 \leq \text{Tg} \leq 70$	$11.51 \leq \text{Tc} \leq 14.65$

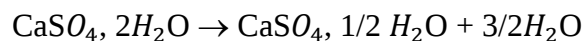
I.2.2.2. Origine synthétique

Le gypse de synthétique est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

- La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) par attaque du phosphate naturel.
- La fabrication d'autres acides minéraux (acide borique : brogypse, acide fluorhydrique : fluor gypse) ou organique : organo-gypse (acide citrique, tartrique, etc...)
- La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydrite sulfureux SO_2 (anhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydrite sulfureux SO_2 (anhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux, produit un gypse appelé désulfogyps [2].

I.2.3. Principe de fabrication

Les plâtres industriels résultent de la déshydratation du gypse par un procédé de cuisson suivant la réaction :



Suivant les conditions dans lesquelles s'opère cette déshydratation, les caractéristiques des plâtres obtenus seront différentes. On distingue deux principes de cuisson, par voie sèche et par voie humide.

- La cuisson par voie sèche conduit à la fabrication soit de l'hémi hydrate β , soit de l'anhydrite ou surcuit selon que la température de cuisson est de 200°C ou supérieure à 350°C , La cuisson s'opère sous pression atmosphérique ou sous une faible pression de vapeur d'eau.

- La cuisson par voie humide s'opère sous pression de vapeur d'eau saturante dans des autoclaves ou à pression atmosphérique mais dans des solutions salines. Ce système de cuisson conduit à la fabrication de l'hémi hydrate α .

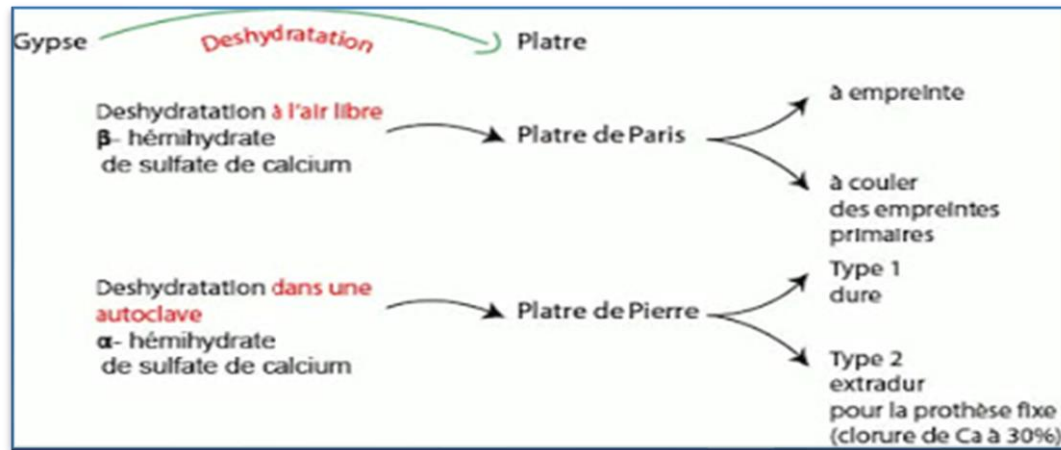


Figure I.3 : Principe de fabrication du plâtre [4].

Le plâtre est fabriqué à partir de gypse naturel (roche sédimentaire extraite de mines ou de carrières souterraines), de gypse de synthèse (produit par le traitement des fumées des centrales thermiques ou à partir de déchets industriels). La fabrication du plâtre à partir de gypse naturel est réalisée par concassage et broyage du gypse, puis cuisson à 150 °C.

La pierre est généralement extraite de mines ou de carrières souterraines puis cuite et ensuite cassée, broyée et moulue pour donner la poudre blanche du plâtre. Sa fabrication, nécessite plusieurs étapes comme suit :

I.2.3.1. L'extraction

Le plâtre provient du gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine.

I.2.3.2. La réception du gypse et criblage :

- Le gypse est transporté à l'aide d'un tapis vers le criblage. Cette opération consiste à sélectionner que les grains de diamètre inférieur à 40 mm ;
- Le gypse ainsi sélectionné est stocké en tas dans un local couvert avant d'être homogénéisé, car le gypse extrait n'est pur qu'à 90 %. Aussi il sera mélangé à l'aide d'une machine composée de râtelier qui va mélanger les couches de gypse ;

I.2.3.3. La cuisson

Les modes de cuisson ne sont pas les mêmes, selon que l'on souhaite obtenir du plâtre Bêta ou du plâtre Alpha. On distingue :

- La cuisson du plâtre Bêta Après un premier broyage, la poudre fine calibrée est cuite dans des fours qui opèrent une cuisson indirecte du gypse placé dans une virole en rotation au-dessus de brûleurs à fioul.
- La cuisson du plâtre Alpha On dépose les pierres de gypse, précédemment triées, dans des paniers que l'on descend ensuite dans des autoclaves (sorte de "Cocotte-Minute"). La cuisson s'effectue à une pression pouvant aller jusqu'à 10 bars. Les caractéristiques du plâtre ainsi obtenu permettent un gâchage avec peu d'eau (5 à 6 fois moins qu'avec du plâtre Bêta) pour un matériau offrant alors des résistances mécaniques beaucoup plus élevées.

I.2.3.4. Le broyage

Après la cuisson, les pierres sont broyées selon 2 principes :

1 - Le broyage standard:

Le plâtre est réduit en particules de $200\ \mu^*$ grâce à un système de marteaux en rotation à l'intérieur d'un tamis (garantie d'une granulométrie maximale).

2 - Le broyage/sélectage:

Comme dans le broyage standard, le plâtre est broyé par des marteaux en rotation puis aspiré à travers une « cage d'écureuil » en rotation. Selon son poids (donc sa taille), le grain de plâtre, soumis à 2 forces opposées (centrifuge et aspiration), traverse ou non la cage d'écureuil.

I.2.3.5. Mélange et adjuvants

Le plâtre est ensuite mélangé dans un malaxeur avec différents ajouts tels que des adjuvants pour améliorer certaines propriétés, des retardateurs pour modifier les temps de prise du plâtre.

I.2.3.6. Le contrôle et la validation du produit

En amont (à l'extraction), l'humidité et la pureté du gypse font l'objet de contrôles périodiques. Ensuite, des échantillons sont prélevés tout au long du processus de fabrication et contrôlés par le laboratoire qualité de l'usine qui se consacre totalement à ce travail. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite des procédés de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité des plâtres mis en vente.

I.2.3.7. Le conditionnement et la logistique

L'usine dispose de plusieurs silos répartis sur différents postes de chargement en vrac qui permettent une logistique en flux tendu. Les expéditions en vrac et en sacs.

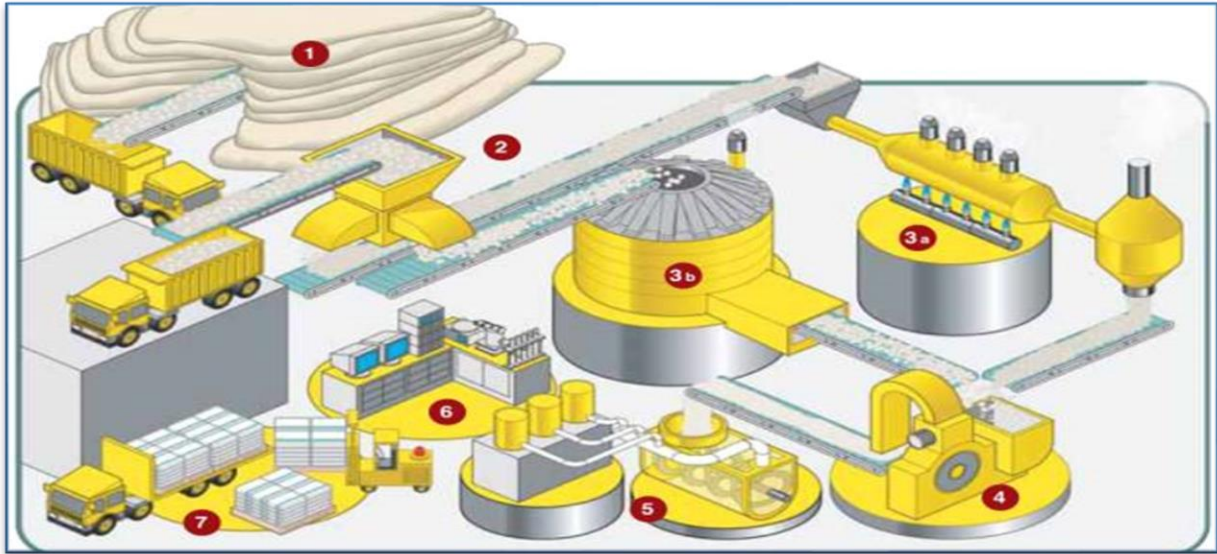


Figure I.4: Procédé de fabrication de plâtre [5].

I.2.4. Les différents types de plâtre

Selon le gypse utilisé et le processus de fabrication, on obtient des plâtres très différents, destinés à des travaux spécifiques. On distingue :

I.2.4.1. Les plâtres de construction

Gros ou fins, utilisés pour tous les travaux de scellement, pour l'assemblage des briques plâtrières et pour le lissage des revêtements ;

I.2.4.2. Les plâtres à projeter

Utilisés pour réaliser les enduits intérieurs à la main ou à la machine ;

I.2.4.3. Les plâtres à modeler

Pour les réparations, les décors, les moulages de précision, Les plâtres à modeler de haut de gamme permettent d'obtenir des moulages d'une finesse extrême (l'empreinte d'un doigt, par exemple).

I.2.5. Forme de plâtre et son utilisation

C'est un matériau qui s'utilise principalement en intérieur. Le plâtre, sous forme de poudre, peut être utilisé comme enduit. Certains l'utilisent comme mortier. Dans tous les cas, son adhérence permet une application rapide et solide sur des murs en ciment ou en bois. Ce lissage permet d'uniformiser murs et plafonds.

Il peut aussi être utilisé pour réaliser des pièces d'ornement. Les artisans l'utilisent pour confectionner des corniches en relief. Ces dernières existent d'ailleurs en préfabriquées, en

plaques et carreaux de plâtre. Une fois transformé en Placoplatre, le plâtre est suffisamment solide pour être monté en mur de séparation, les différentes formes de plâtre et leurs usages :

I.2.5.1. Les plaques de plâtre

Utilisées pour réaliser des travaux d'aménagement ou de rénovation, les plaques de plâtre sont faciles à manipuler et à poser. Polyvalentes, elles peuvent être installées au mur, au plafond, pour monter des cloisons (mettre le lien de l'article monter une cloison en plaques de plâtre) ou encore réaliser un ouvrage isolant.

I.2.5.2. Les carreaux de plâtre

Les carreaux sont employés pour réaliser des cloisons en rénovation ou bien pour des travaux d'aménagement intérieurs, bars de cuisine ou des tabliers de baignoire (ainsi que par les professionnels pour la réalisation de gaines techniques. Il existe différents types de carreaux de plâtre, qui correspondent à différents besoins : l'isolation, la régulation hygrométrique et la résistance au feu.

I.2.5.3. Les enduits

Il existe différents types d'enduits, que l'on utilise à différentes étapes des travaux ;

I.2.5.3.1. Les enduits pelliculaires

S'appliquent pour préparer la surface avant décoration finale. Parmi les enduits pelliculaires, on trouve différents enduits :

- **les enduits de rebouchage** : Servent à reboucher les trous et fissures en rénovation
- **les enduits de dégrossissage** : Généralement utilisés en rénovation, s'appliquent sur les surfaces irrégulières ou abîmées pour les égaliser.
- **les enduits de lissage** : Servent à l'enduisage en plein de plaques de plâtre, de béton ou de ciment. Ils permettent de lisser la surface pour la préparer à recevoir la décoration finale.
- **Les enduits à joints** : Qui peuvent être à prise ou à séchage, servent à remplir les creux entre les bords amincis des plaques de plâtre. Ils assurent la planéité de la surface, mais leur rôle n'est pas seulement esthétique. Utilisés avec les bandes à joint Placoplatre, ils garantissent également la solidité et les performances de l'ouvrage [6]

I.2.6. Recyclage du plâtre

L'industrie du plâtre utilise du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et en fait du plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Le

plâtre se retrouve davantage dans la construction, sous forme aussi de blocs ou de plaques de plâtre. Le fait d'ajouter des éléments traités dans les différents matériaux n'a aucune influence sur le processus de production des plaques de plâtre. Dans certains pays, on retrouve déjà 30% de matériaux en plâtre recyclés dans la production des plaques, Sans aucune incidence sur la qualité de celles-ci. L'industrie du plâtre utilise du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et en fait du plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Le plâtre se retrouve davantage dans la construction, sous forme aussi de blocs ou de plaques de plâtre. Le fait d'ajouter des éléments traités dans les différents matériaux n'a aucune influence sur le processus de production des plaques de plâtre



Figure I.5 : Déchet de plâtre récupéré [7]

Les figure suivant représente les différentes étapes de recyclage du plâtre



Figure I.6: Recyclage de plâtre [7].

I.2.7. Valorisation du plâtre

Chaque année, le volume de déchets de plâtre recyclé ne cesse de progresser. En effet, ce matériau aux qualités naturelles dispose d'un cycle de vie illimité : il peut être réutilisé

indéfiniment, à condition d'être correctement collecté et trié.

Les déchets de plâtre ne sont pas des déchets inertes, ils entrent dans la catégorie des déchets non dangereux.

Les divers déchets de plâtre de chantiers, les produits à base de plâtre admis pour le recyclage sont relativement nombreux. Ils sont collectés directement sur les chantiers ou bien auprès des déchetteries. En principe, des bennes dédiées servent à optimiser le tri avant l'enlèvement et l'envoi vers le centre de traitement.

Le plâtre se commercialise sous deux formes :

- **Déjà transformé**, Directement en plaques de plâtres par exemple. Pour la fabrication, la poudre de plâtre est mélangée avec de l'eau : c'est l'étape du gâchage. Ensuite, chaque produit dispose d'un processus spécifique selon ses objectifs d'utilisation.
- **À transformer**, Il se présente sous forme de poudre vendue en sac. Mélangée avec de l'eau, cette poudre de plâtre s'utilise pour réaliser des enduits ou du mortier. 100 % recyclable, La filière du plâtre ne cesse de progresser dans l'organisation de son économie circulaire pour optimiser toujours plus sa réutilisation.

Un nouveau tri est ensuite assuré avant de débiter la phase de transformation :

- **1^{ère} étape** : Le broyage. Il consiste à séparer les résidus de cartons et autres matières qui peuvent contenir les plaques de plâtre. Cette opération permet d'obtenir une nouvelle poudre de gypse et d'économiser les ressources naturelles. Le carton et le papier sont quant à eux recyclés via leurs filières respectives.
- **2^{ème} étape** : La poudre de gypse recyclée est vendue aux industries pour servir de matière première. Elle est mélangée à du gypse « neuf » avant de réintégrer les chaînes de production.
- **3^{ème} étape** : De nouveaux produits sont fabriqués, comme les plaques de plâtre ou le plâtre en poudre, puis commercialisés [8].

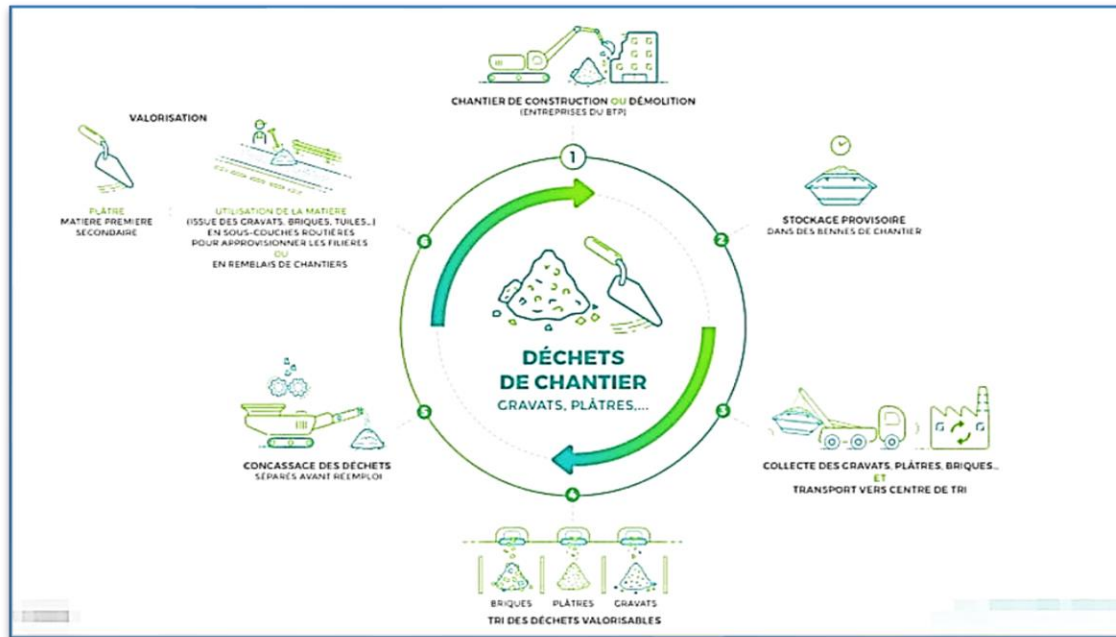


Figure I.7 : cycle de valorisation des déchets de plâtre [8].

I.2.8. Domaines d'utilisation de plâtre

I.2.8.1. En cimenterie

Les sulfates de calcium mélangés au clinker ont une action régulatrice sur la prise de ciment et augmentent sa résistance, dans la limite d'une teneur minimale de 2%

I.2.8.2. En industries chimiques

Les sulfates de calcium naturels ou artificiels sont utilisés comme matière première pour la fabrication de nombreux produits chimique d'application industriels.

Les épandages de gypse broyé sur terrains agricoles peuvent présenter plusieurs avantages sur le plan agronomique.

En effet le gypse apporte une correction des sols salins ou alcalins qui se trouvent en région arides ou semi arides et en bordure de mer ,le chlorure de sodium ayant une action inhibitrice ou asphyxiante sur la croissance des plants et créant des sols dur et grossiers par défloculation des argiles ,le gypse en solution permet une remplacement des cation Na^+ par Ca^{++} ,ce qui fait flocculer les argiles et rend le sol plus aéré et léger , par ailleurs l'alcalinité est réduite et la teneur en calcium assimilable augmente . Sur sols acides, le gypse semble neutraliser l'acidité en libérant Ca^{++} , tandis que SO_4^{--} serait absorbé par les plantes [9].

I.2.8.3. Industries alimentaires

Le gypse est utilisé pour la purification des eaux de brasserie grâce à son pouvoir floculant. Il peut également être employé pour réduire la teneur en tartre et contrôler la clarté des

vins. Dans l'alimentation animale, le gypse broyé sert dans la préparation de nourritures pour bétail, il pallie le manque de soufre et évite l'utilisation de matières azotées pour améliorer les fourrages de qualité médiocre.

I.2.9. Domaine de construction et urbanisme

Actuellement, Le plâtre a des utilisations assez diversifiées, soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués.

I.2.9.1.Enduits

Le plâtre mélange à la chaux grasse (10 à 15%) et au sable donne un mortier très utilisé comme enduit extérieur et intérieur. On emploie le plâtre gros pour la première couche d'application sur les plafonds et les murs, pour les travaux de remplissage et pour les planchers. On utilise le plâtre fin pour la dernière couche de finition.

I.2.9.2.Matériaux de construction préfabriqués

Le plâtre sert à la fabrication de carreaux et plaques (sandwich de plâtre compris entre deux feuillets de carton), la réalisation des cloisons de distribution ou de séparation entre les logements, comme plafonds ou doublage des murs, outre cela le plâtre peut être armé de fibres pour constituer du plâtre armé. Le staff est du plâtre armé de filasse de chanvre, il est très utilisé dans la décoration intérieure grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes et à se prêter à tout type de finition. C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu.

I.2.9.3. Autres utilisations

Le caractère neutre et inerte de gypse, sa faible abrasivité a être finement broyé, ainsi que sa blancheur qui peut être élevée, en font un bon produit de charge dans les secteurs Industriels suivant :

- Peintures et colles, pates à moduler.
- Papiers, tissus.
- Verrerie.
- Insecticides en poudre.
- Pharmacie, Prothèse dentaire, chirurgie.

L'anhydrite broyée peut également s'employer en charge, dans les peintures et papiers, les cartons bitumés et les bitumes pour revêtements routiers [9].

I.2.10. Éléments préfabriqués à base de plâtre

Les éléments les plus utilisés dans le bâtiment, sont comme suit :

- Éléments à faces lisses pour parois verticales (Carreau de plâtre et Plaque de plâtre) Le plâtre sert à la fabrication de carreaux et plaques (sandwich plâtre compris entre deux feuillets de carton) utilisés souvent pour cloisonner.

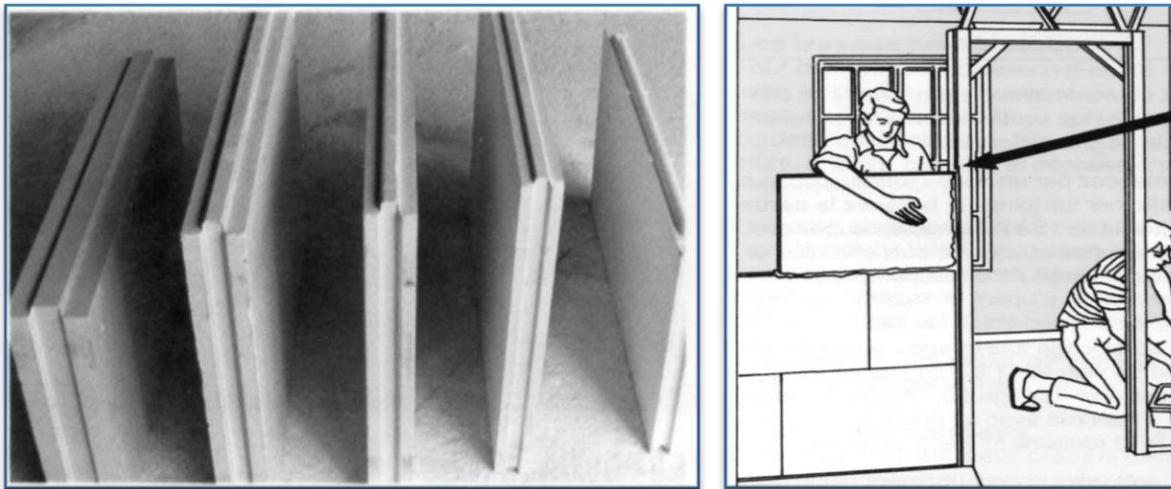


Figure I.8 : Carreau de Plâtre [10].

- Éléments de plafond.



Figure I.9 : Élément plafond [11]

- Éléments à enduire.
- Éléments de décoration



Figure I.10 : Élément décoratif [11]

I.2.11. Caractéristiques du plâtre

Les qualités naturelles du plâtre sont des facteurs de confort, de santé et de sécurité pour nos espaces de vie. Ses multiples avantages l'ont érigé en tant que matériau naturel incontournable en construction comme en rénovation :

I.2.11.1. Grande résistance au feu

Incombustible, le plâtre assure une excellente protection incendie de tous les ouvrages. Sous l'action de la chaleur, le plâtre ne dégage que de la vapeur d'eau.

I.2.11.2. Rôle de régulateur hygrométrique

La porosité du plâtre lui permet de tempérer l'humidité ambiante. Le plâtre absorbe ainsi l'humidité de l'air lorsqu'elle est excessive et la restitue lorsqu'il est trop sec.

I.2.11.3. Isolation thermique

En raison de son faible coefficient de conductivité thermique, les solutions constructives associant le plâtre à un isolant thermique (comme de la laine minérale ou du polystyrène) permettent de répondre aux plus hautes exigences thermiques.

I.2.11.4. Isolation et confort acoustique

Avec ou sans isolant, les produits plaques et plafonds offrent des performances acoustiques élevées, pour l'habitat et les bâtiments les plus exigeants tels que les auditoriums ou les salles de spectacles. Les nouvelles générations, notamment, et les plafonds acoustiques et décoratifs, sont les solutions phares en matière d'acoustique.

I.2.12. Propriétés physiques et mécaniques du plâtre

I.2.12.1. Prise

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact avec l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre [12]. Son temps de prise est court avec un durcissement rapide accompagné d'une forte élévation de température. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives :

- Reprise de l'eau pour reformer le déshydrate.
 - Cristallisation (qui constitue la prise proprement dite).
 - Durcissement.
- La prise est la réaction inverse de la cuisson.
(Prise) $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$(I-1)
(Cuisson) $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O}$(I-2)

Durcissement

Le processus de durcissement comporte trois phases [13]

- Dissolution des produits du semi-hydrate de Ca ;
- Hydratation du semi-hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de Ca;
- La cristallisation d'hydrate

Tableau I.2 : caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate[12]

Propriété	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique (kg/m ³)	2,76. 10 ³	2,63. 10 ³
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion (mm/m)	2,8	1,6
Résistance à la traction (MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (MPa)	5,6	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 C° (en g de CaSO ₄ pour 100 cm ³)	0,63	0,74

I.2.12.2. Facteurs influents sur la prise et le durcissement

Les temps de prise et de durcissement varient évidemment avec la nature du plâtre (présence en plus du semi-hydraté d'incuits, de surcuits ...), et avec sa finesse. Les autres paramètres importants sont les suivants :

- Quantité et nature de l'eau : plus la quantité d'eau est importante plus la prise est lente. Les impuretés contenues dans l'eau peuvent modifier beaucoup les temps de prise.
- Mode et durée de malaxage.
- Température ; l'eau chaude agit comme retardateur de prise.

I.2.12.3. Adjuvants

- **Les accélérateurs de prise :**

a) Le sulfate hydraté $CaSO_4, H_2O$.

b) La pluparts des acides courants (HCl , H_2SO_4 , HNO_3).

c) Le sulfate d'alumine et de Potasse ($[Al_2(SO_4)_3]$, $[K_2SO_4]$).

d) Les Aluns

e) Le chlorure de Sodium ($NaCl$).

- **Les retardateurs de prise :**

a) Les phosphates.

b) Acides organiques, et leurs sels solubles (acide citrique et citrates).

c) La gélatine, la colle, la caséine.

d) Les Borax.

e) Les déchets résultants de la dégradation de protéines animales ou végétales.

f) La chaux.

I.2.12.4. Variation de volume

Le plâtre augmente de volume surtout aux premières heures (18% au début de la prise puis 19% après un jour), mais il peut après plusieurs jours ou plusieurs semaines de séchage, prendre un léger retrait par rapport au gonflement maximum atteint [7].

I.2.12.5. Densité

Elle varie en fonction des facteurs suivants :

- la granulométrie du plâtre et le rapport E/P.

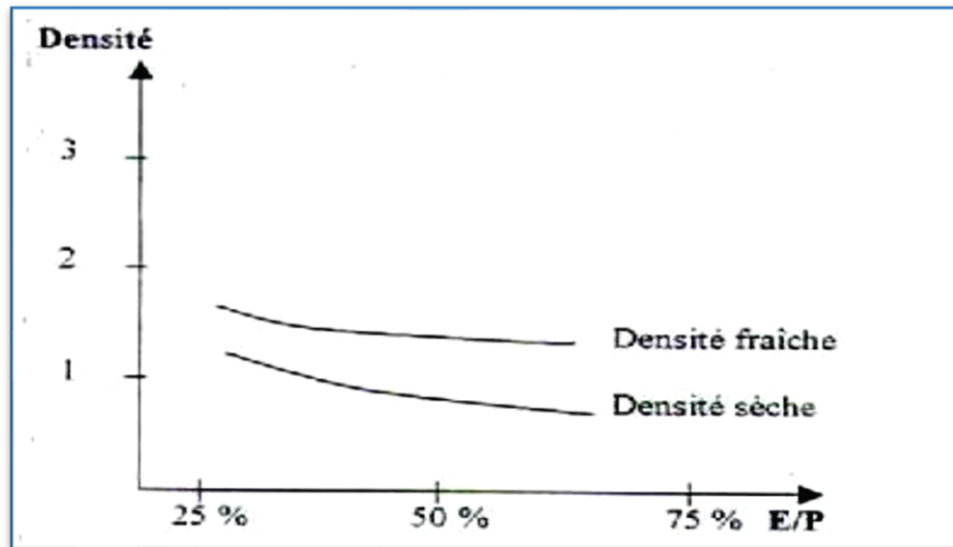


Figure I.11 : L'influence de rapport E/P sur la densité de plâtre [3].

I.2.13. Résistance mécanique

Les facteurs qui influent sur la résistance mécaniques sont les suivants :

I.2.13.1. Effet du rapport E/P

La courbe ci-dessous donne l'influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques

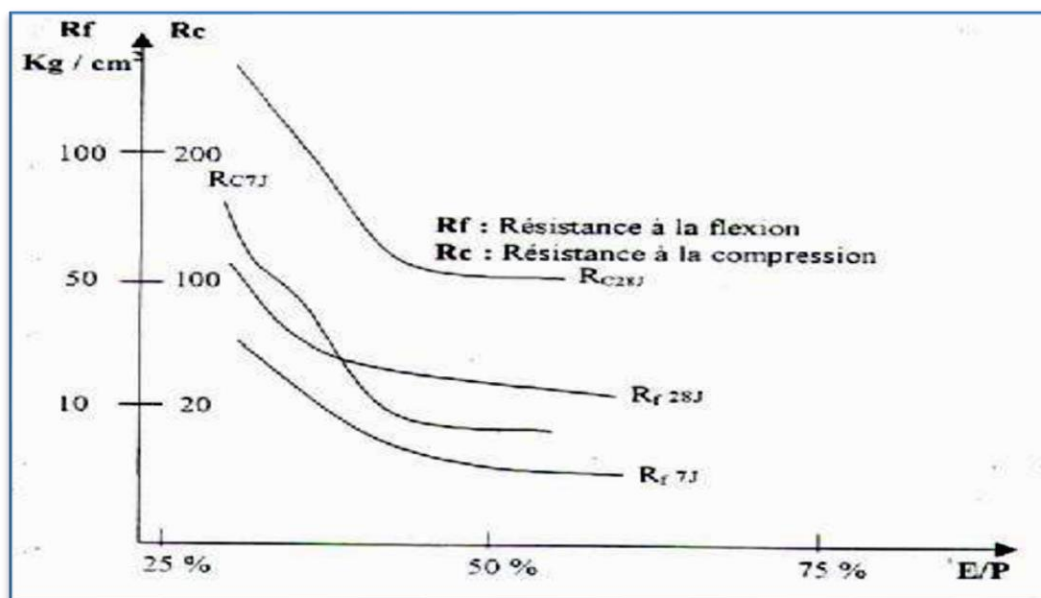


Figure I.12 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques [12]

On remarque que le rapport E/P influe directement sur les propriétés de produit résultant où lorsque le rapport E/P élevé provoque une porosité élevée, le matériau devient moins dense d'où une chute sur les résistances mécaniques. Pour l'obtention d'une meilleur ouvrabilité,

recommande l'utilisation d'un rapport E/P= 0,6 [12].

I.2.13.2. Temps (âge de plâtre).

I.2.13.3. Milieu de conservation (sec ou humide).

I.2.13.4. Adjuvants

Les adjuvants améliorent la résistance et augmente la durée de prise du plâtre comme la chaux éteinte avec un faible teneur de 6% à 10% [13].

I.2.14. Les recommandations du C.N.E.R.I.B

- Les constructions en murs porteurs de « plâtre » ne sont autorisés que pour les ouvrages simples à un ou deux niveaux, quel que soit leur usage.
- Le plâtre entrant dans la construction des blocs de mortier ou de béton de plâtre est un plâtre de construction.
- Elles s'appliquent pour les constructions en zones à sismicité faible ou nulle (zone 1 et 0 du RPA 81). Pour les zones 2 et 3, il y a lieu de compléter les présentes recommandations par les exigences du RPA 81 [14].

Partie B : Généralités sur les composites et sur les bétons de fibres

I.3. Matériaux composites

I.3.1. Définition des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant [15].

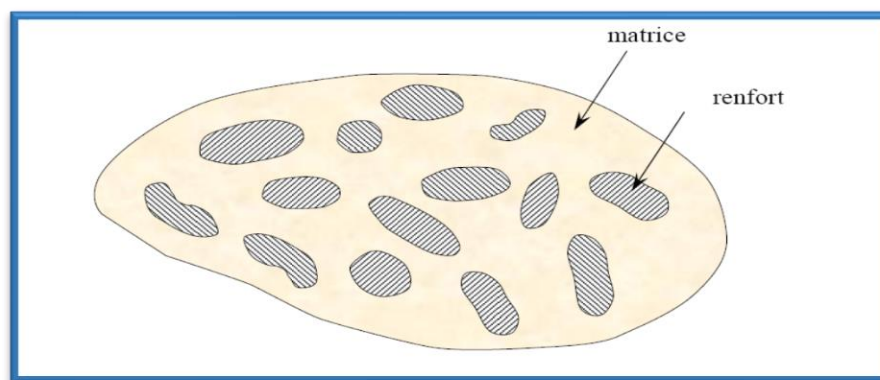


Figure I.13: Matériau composite [15].

I.3.1.1. Propriétés de la matrice

- Inutilisable seule à la flexion
- Faible résistance à la traction
- Comportement fragile à la fissuration [16].

I.3.1.2. Propriétés du renfort

- Résistance élevée à la traction
- Module d'élasticité important
- Allongement à la rupture suffisant [16].

La description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature des constituants et leurs propriétés,
- La géométrie du renfort, sa distribution,
- La nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation). Si l'ensemble de ces paramètres concourt à déterminer les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approchée soit par des sphères, soit par des cylindres.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une “homogénéité” du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées [16].

I.3.2. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.

I.3.2.1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

I.3.2.1.1. Composites à fibres

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

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres,

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques.

I.3.2.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

I.3.2.2. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

I.3.2.2.1. Composites à matrice organique (résine, charges), avec :

Des fibres minérales : verre, carbone, etc.



Figure I.14 : Fibre de verre [15]

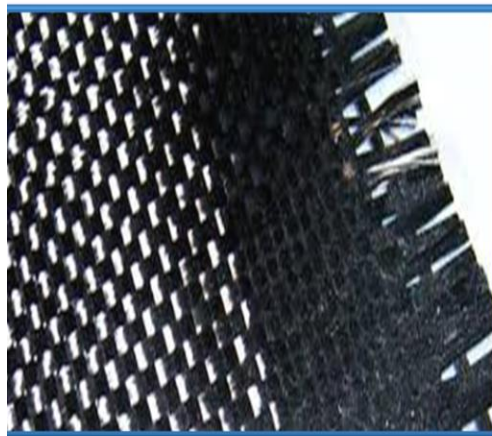


Figure I.15 : Fibre de carbone [15]

Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.

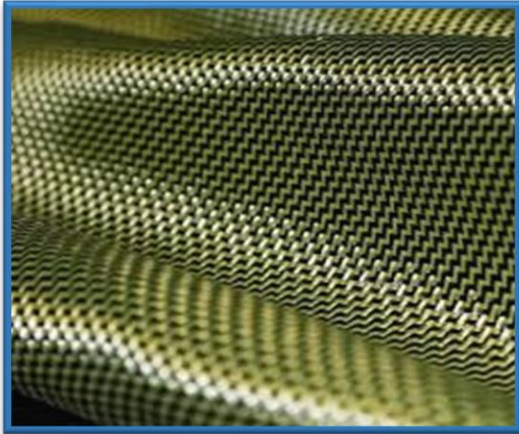


Figure I.16 : Fibre de kevlar[15]



Figure I.17 : fibre de polyamide [15]

Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.



Figure I.18 : Le bore [15]

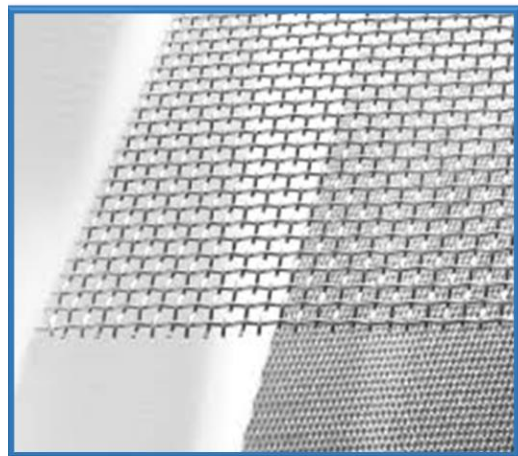


Figure I.19 : Fibre d'aluminium [15]

I.3.2.2.2. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- Fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- Fibres métalliques : bore,
- Fibres métal-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

I.3.2.2.3. Composites à matrice minérale (céramique) :

- Fibres métalliques : bore,
- Particules métalliques : cermets,
- Particules minérales : Carbures, nitrures, etc.



Figure I.20 : Particules de Nitrures.

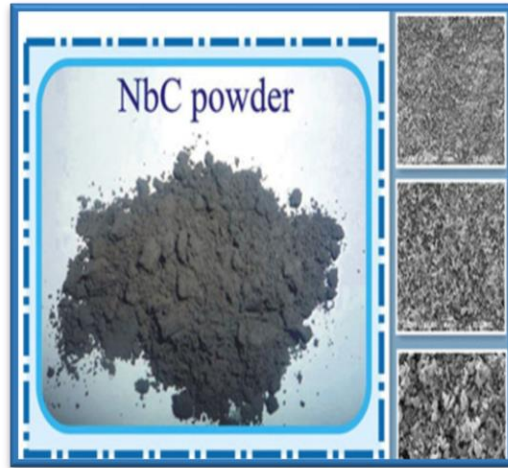


Figure I.21 : Particules de carbures

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique.

I.4. Les fibres

Les fibres végétales peuvent être classées selon l'organe dont elles sont issues, dans ce cas elles comprennent :

- Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok);
- Les fibres animales : elles peuvent émaner des poils (toison animale) ou encore des sécrétions (soie) ;
- Les fibres minérales (amiante).

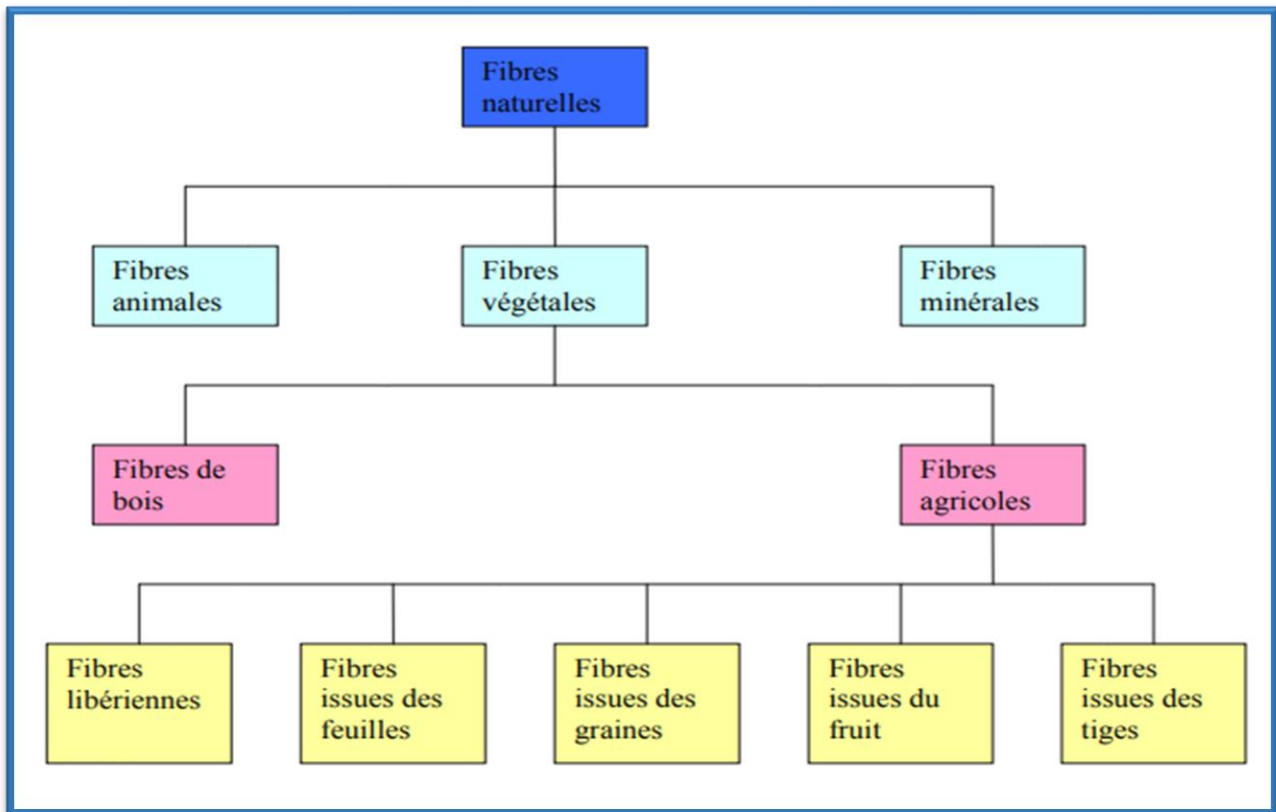


Figure I.22 : classification des fibres naturelles [18].

L'utilisation des fibres naturelles et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et demandant peu d'énergie pour être produites. Dans les pays peu industrialisés, les fibres végétales constituent donc une alternative à faible coût économique et surtout écologique aux fibres synthétiques conventionnelles (fibres métalliques, minérales ou polymériques).

I.4.1. Définition d'une fibre végétale

Une fibre végétale est une expansion cellulaire filiforme, principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines, et de pectines. On la trouve sous deux formes : soit isolée, soit regroupée avec d'autres fibres. Une fibre unitaire correspond à une cellule élémentaire fibreuse, et forme un faisceau de fibres lorsqu'elle est regroupée avec d'autres fibres (Figure I-23). Dans ce faisceau, les fibres sont liées ensemble principalement par des pectines et des hémicelluloses. Une fibre végétale est caractérisée par sa grande longueur par rapport à son

diamètre. Cet élanement est généralement compris entre 50 et 100 [18].

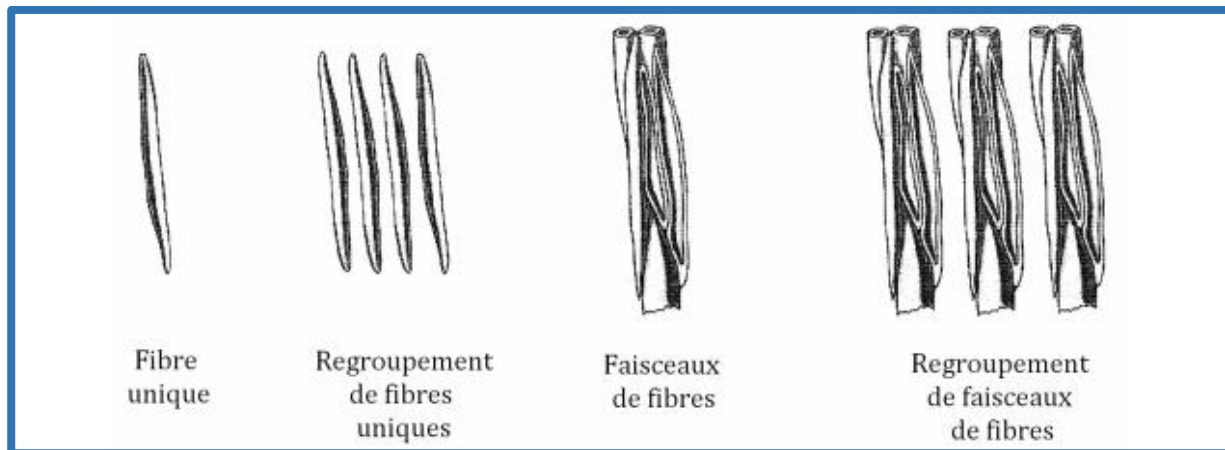


Figure I.23 : Classification des fibres naturelles d'origines végétale [17].

Les fibres végétales peuvent être classées suivant leur teneur en cellulose, en hémicellulose et en lignine. On distingue alors les fibres ligneuses (dures et rigides telles que celles provenant du Développement de bio-composites à base de fibres végétales et de colles écologiques bois) et les fibres non ligneuses (douces et souples dérivées de végétaux non ligneux souvent annuels tels que le jute et le sisal). Une troisième classification peut se faire suivant la longueur :

- Les fibres longues et douces (fibres libériennes) ;
- Les fibres longues, dures et rigides (provenant des feuilles et des troncs d'arbres) ;
- Les fibres courtes, dites encore étoupes, elles sont associées aux fibres longues [18].
- Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante. Elles peuvent provenir des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe), ou bien encore des feuilles.

I.4.2. Composition chimique de la fibre naturelle

La fibre végétale est composée de :

I.4.2.1. cellulose est un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de glucose. Ce bio polymère est le principal constituant de la paroi des cellules végétales, La cellulose constitue 35 à 50 % de la biomasse végétale terrestre devant l'hémicellulose (30 à 45 %) et la lignine (15 à 25 %), formant ainsi la première famille de composés par ordre d'abondance dans les plantes et dans les écosystèmes terrestres où domine la biomasse végétale morte ou vive.

Elle peut servir également d'isolant thermique et d'isolant phonique [19] .

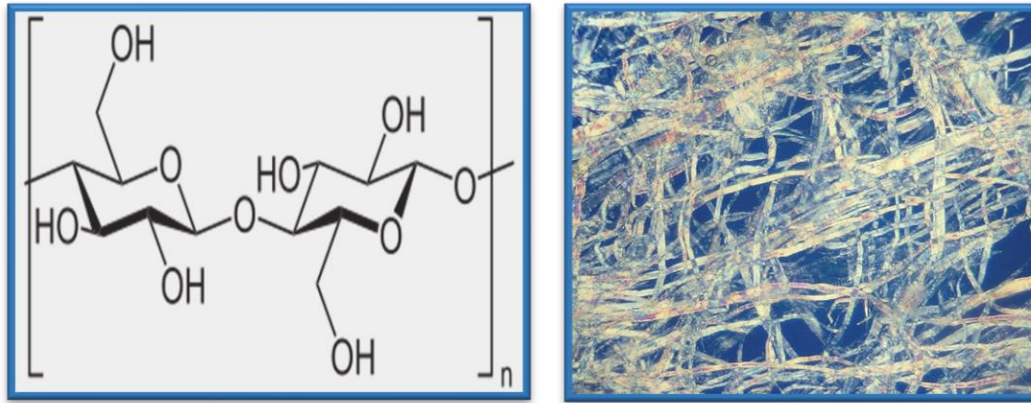


Figure I.24 : Structure de la cellulose [19]

I.4.2.2. hémicellulose

est un bio polymère de la famille des glucides, constitutif de la paroi cellulaire végétale. Elle a un rôle de pontage entre les fibres de cellulose, mais aussi avec d'autres composés matriciels. L'hémicellulose constitue 30 à 45 % de la biomasse végétale terrestre derrière la cellulose (35 à 50 %) mais devant la lignine (15 à 25 %), formant ainsi la deuxième famille de composés par ordre d'abondance dans les plantes et dans les écosystèmes terrestres où domine la biomasse végétale morte ou vive [20]

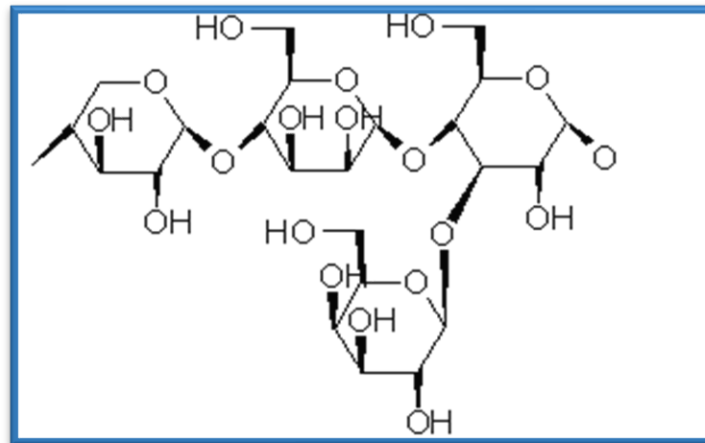


Figure I.25 : Structure de l'hémicellulose [20]

I.4.2.3. La lignine

est une biomolécule, en fait une famille de macromolécules qui est un des principaux composants du bois avec la cellulose et l'hémicellulose. La lignine est présente principalement dans les plantes vasculaires et dans quelques algues. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition. Toutes les plantes vasculaires, ligneuses et herbacées, fabriquent de la lignine.

Quantitativement, la teneur en lignine est de 3 à 5 % dans les feuilles, 5 à 20 % dans les tiges 15 à 35 % dans les tiges ligneuses. Elle est moindre pour les plantes annuelles que pour les vivaces, elle est maximum chez les arbres. Après la cellulose (constituant 35 à 50 % de la biomasse végétale terrestre) et l'hémicellulose (30 à 45 %), la lignine (15 à 25 %) forme la troisième famille de composés par ordre d'abondance dans les plantes et dans les écosystèmes terrestres où domine la biomasse végétale morte ou vive. L'abondance de ce bio polymère explique qu'il fasse l'objet de recherches en vue de valorisations autres que ses utilisations actuelles en bois [21].

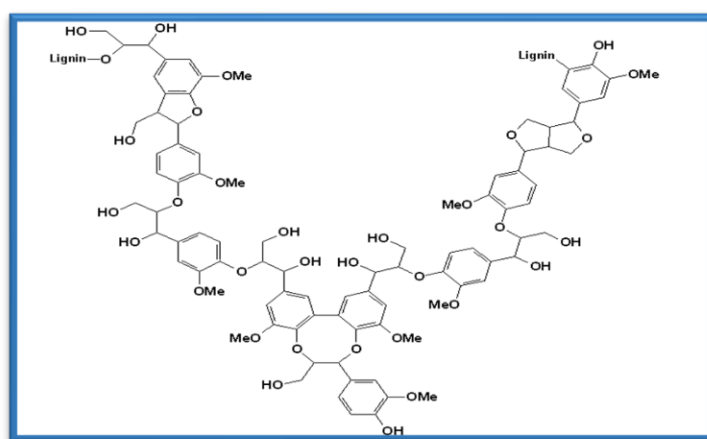


Figure I.26 : Structure de la lignine [21]

Le tableau I.3 montre les pourcentages de composant chimique de certaine fibre végétale.

Tableau I.3 : composition chimique des fibres végétales [18].

<i>Les composants</i>		Cellulose(%)	Hémicellulose(%)	Lignine(%)
<i>Les Fibres</i>				
Fibre issu de tige	bambou	46-58	16-20	20-22
	Kénaf	37-49	18-24	15-21
	Jute	41-48	18-22	21-24
Fibre issues de feuillage	abaca	56-63	15-17	7-9
	Sisal	47-78	10-24	7-11
Fibre issues de troncs	Palmier dattier	41-45	30-40	6-10
Fibre issues d'écorce	Lin	71	18.6-20.6	2.2
	Chanvre	57-77	14-22.4	3.7-13
	Ramie	68.6-91	5-16.7	0.6-0.7

I.4.3. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale. La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [17].

Tableau I.4 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales[16]

<i>Fibre</i>	<i>Longueur de la fibre</i>	<i>Diamètre de la fibre</i>	<i>Angle micro fibrillaire</i>
<i>Cotton</i>	35	10-45	—
<i>Lin</i>	4-77	5-76	10
<i>Chanvre</i>	5-55	10-51	6.2
<i>Kénaf</i>	2.5-4.5	14-33	—
<i>Jute</i>	2.5	5-25	8
<i>sisal</i>	900	8-50	20
<i>Coire</i>	0.3-1	12-24	45

- La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

I.4.4. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même.

Le renfort est constitué par les couches de microfibre cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine[18].

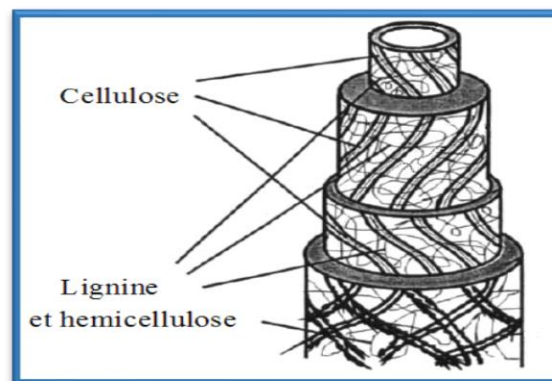


Figure I.27 : Structure d'une fibre [18].

Structure détaillée de la fibre végétale.

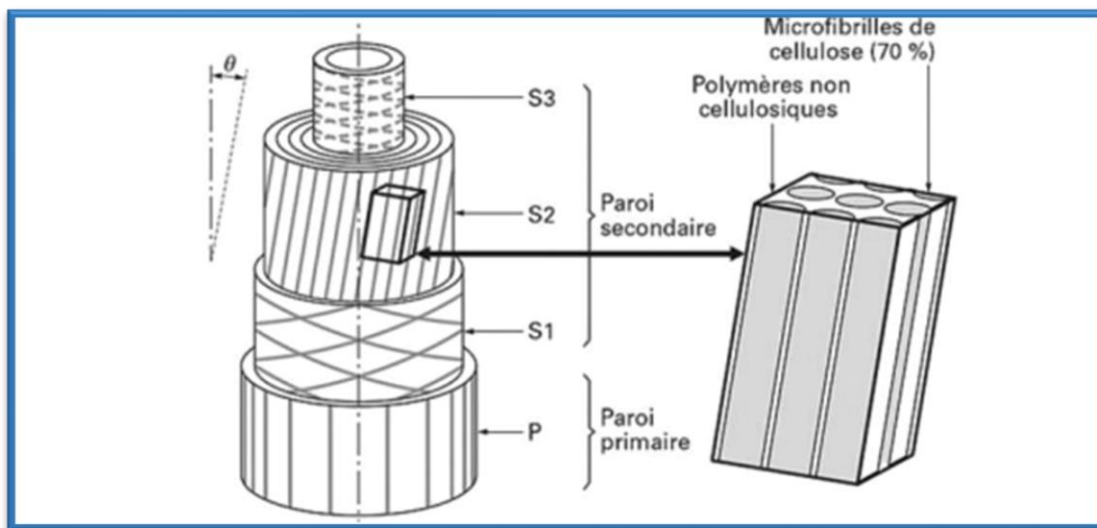


Figure I.28 : Schéma de la microstructure d'une fibre végétale [18]

Une fibre végétale est assimilable à un matériau multicouche composé de parois cylindriques concentriques. Elle est composée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, elle-même constituée de trois couches : S1, S2 et S3 (Figure 1.27).

- La paroi primaire dont l'épaisseur varie entre 1 à 3 μm renferme de l'eau (90 %), de la cellulose (80 %), d'hémicellulose, de lignine (parfois), d'extractibles ainsi que de substances pectiques. Les microfibrilles cellulosiques enchevêtrées forment un réseau poreux.

Cette paroi constitue une continuité à la lamelle moyenne et présente une grande élasticité :

- La paroi secondaire est rigide et inextensible à cause de l'absence de pectines et la présence d'une structure fibrillaire très compacte due au degré de cristallinité élevé de la Cellulose. Elle est riche en lignine, en cutine et en subérine, par contre, elle est peu hydratée (<20 %). Cette paroi est formée de trois sous-couches qui sont :
- La couche S1 est constituée de microfibrilles croisées formant un angle compris entre 60° et 80° par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur est comprise entre 0,1 et 0,35 μm .
- La couche S2 est la partie la plus volumineuse de la paroi. Les microfibrilles se présentent en hélice en formant un angle de 5° à 50° par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur varie entre 1 et 10 μm . Elle présente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche.
- La couche S3 présente une épaisseur entre 0,5 et 1,1 μm . Dans cette couche, les microfibrilles sont orientées suivant un angle variant entre 60° et 90° par rapport à l'axe de la cellule.

I.4.5. Les fibre sisal

Fibre épaisse et solide, le sisal est de plus en plus souvent utilisé dans les matériaux composites pour l'industrie automobile, l'ameublement et la construction. On le retrouve également dans les plastiques et dans les produits de papier [22].

I.4.6. La plante de sisal

Les fibres du sisal sont issues de l'*Agave sisalana*, originaire du Mexique. Cette plante résistante pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures. Elle s'accommode de la plupart des types de sols sauf ceux les sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies et nécessite comparativement peu d'intrants. Le sisal peut être récolté deux ans après avoir été planté et sa vie productive peut atteindre 12 ans. Chaque plante peut produire de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude, la pluviométrie et la variété considérée [23].

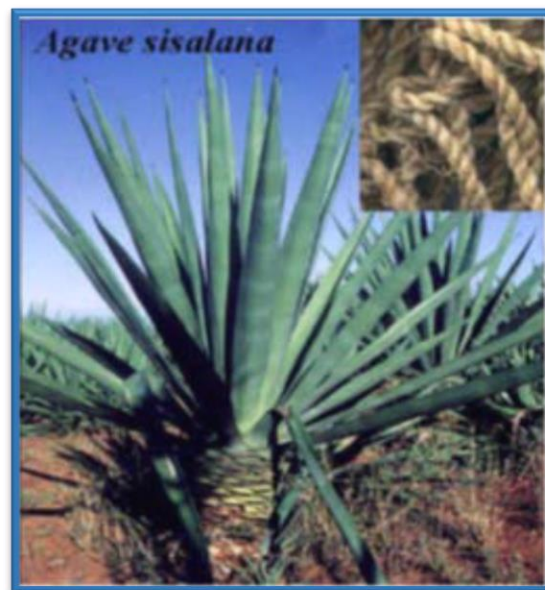


Figure I.29: Plante d'agave sisalana [24]

Même si le degré d'humidité des feuilles de sisal est de quelque 90 pour cent, elles sont rigides et leur pulpe charnue est très ferme. Les fibres, situées à l'intérieur des feuilles dans le sens de la longueur, sont plus abondantes vers la surface. Il faut donc défibrer immédiatement la récolte afin d'éviter de les abîmer durant le nettoyage. Pour ce faire, on gratte la pulpe, généralement à l'aide d'un procédé mécanique, mais aussi à la main. La production de sisal induit des pertes minimales en amont et aval de la récolte. Le rendement moyen en fibres séchées

s'établit à une tonne par hectare. En Afrique de l'Est, ce chiffre peut atteindre quatre tonnes par hectare [25].

I.4.7. Propriété de fibre de sisal

Tableau I.5: propriété de fibre de sisal [22].

Diamètre	0.10-0.13mm
Résistance a la traction	371±28 Mpa
Module d'élasticité	12.43 ± 2.23 Gpa
Forme	Droite
Couleurs	Blanche crème
Masse volumique	0.113g/cm ³

I.4.8. Extraction de la fibre de sisal

L'extraction des fibres de sisal sont montrées dans la figure suivante

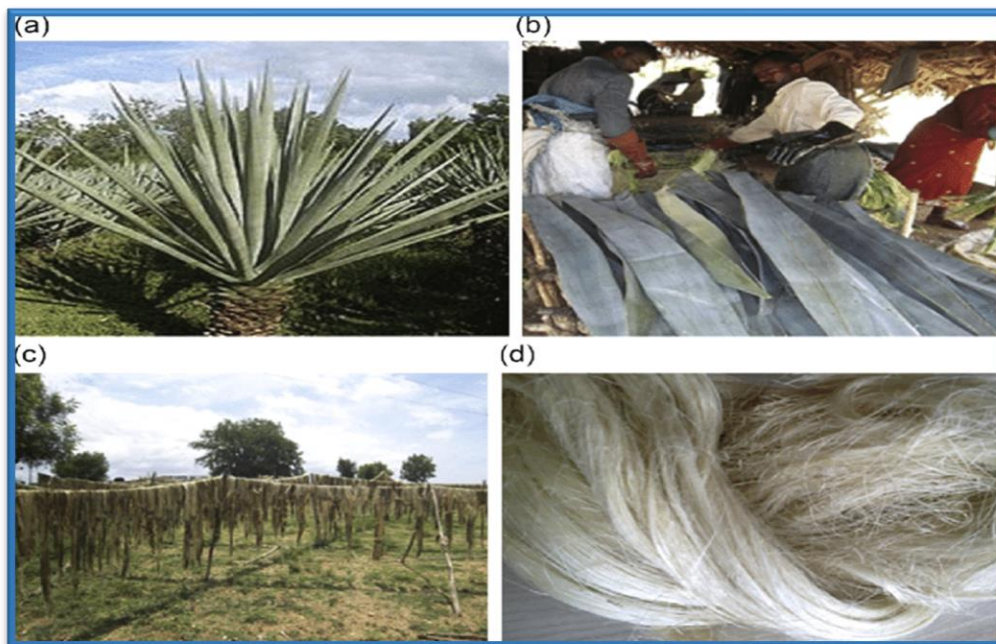


Figure I.30: Extraction de la fibre de sisal : (a) plante de sisal, (b) décortiquage, (c) séchage, (d) fibre brute [26].

I.4.9. Avantages de la plante pour l'environnement

Le sisal est la ressource renouvelable par excellence et pourrait aider à relever le défi du changement climatique. Tout au long de son cycle de vie, il absorbe plus de dioxyde de carbone qu'il n'en produit. Au cours de la transformation, il génère principalement des déchets organiques et des résidus de feuilles qui peuvent être utilisés pour produire de la bioénergie et fabriquer des aliments pour animaux, des engrais et des logements écologiques; en fin de cycle, il est

totalelement biodégradable. Les fibres synthétiques ne possèdent aucune de ces caractéristiques. De surcroît, le sisal réduit l'érosion des sols en raison de ses profondes racines et contribue à une bonne gestion des bassins versants. Planté en haies, il constitue une barrière végétale efficace pour protéger les cultures et les forêts des prédateurs et des intrus [23].

I.5. Béton ou mortier fibré

I.5.1. Définition

Les fibres jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du matériau et le transfert des efforts aux fibres. Depuis longtemps, les fibres sont utilisées pour renforcer des matériaux fragiles. La paille a été utilisée pour renforcer les briques de terre, et le crin de cheval pour renforcer les mortiers de maçonnerie et le plâtre. Plus récemment, une utilisation commerciale à grande échelle de fibres d'amiante dans une matrice cimentaire a commencé avec l'invention du procédé Hatschek en 1898. Cependant, principalement en raison des dangers pour la santé associés aux fibres d'amiante que nous connaissons, des types de fibres alternatifs ont été introduits dans les années 1960 et 1970. De nos jours, un grand nombre de matériaux techniques (matrices céramiques, métalliques ou organiques) incorporent des fibres pour améliorer les propriétés des matériaux. L'intérêt du secteur industriel pour les matériaux de construction renforcés de fibres ne cesse d'augmenter du fait du nombre conséquent de recherches en cours sur cette thématique [27].

I.5.2. Le rôle des fibres

La raison fondamentale de l'emploi des fibres comme renfort tient à leur bonne contrainte à la rupture. En effet, pour un même volume de matériau, la contrainte à la rupture sera plus haute pour une fibre que pour l'échantillon massif : la mise sous forme de fibre diminue fortement la taille des défauts et donc accroît la contrainte ultime.

Les fibres incorporées au béton ont pour rôle d'augmenter la résistance en traction du béton et limiter la propagation des microfissures. Elles peuvent également dans certains cas renforcer la structure ou remplacer les armatures passives. En général, les fibres permettent aussi une meilleure répartition des contraintes mécaniques. L'incorporation de fibres a pour effet d'augmenter la ductilité du béton et donc ses caractéristiques post-fissuration. De plus, les fibres peuvent améliorer la résistance en flexion, en torsion, en cisaillement, aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue ainsi de supporter les efforts après l'apparition de fissures. L'amélioration des résistances précédemment citées est fonction de la teneur, de la nature et de

la résistance des fibres utilisées. Il est important de souligner qu'une répartition uniforme des fibres dans le mélange est une condition essentielle pour améliorer les caractéristiques mécaniques du béton fibré. Selon le type utilisé, les fibres permettent également de mieux contrôler la propagation de fissure et leur ouverture. L'utilisation de fibres aide à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique. Quoique le retrait de séchage reste présent, la fissuration est mieux contrôlée ; les fissures sont plus fines, moins longues et mieux distribuées [27].

I.5.3. Propriétés des bétons fibrés

I.5.3.1. Influence des fibres sur la rhéologie

L'ajout de fibres, comme tout autre type d'inclusions, modifie les propriétés rhéologiques du matériau cimentaire à l'état frais. Dans ce domaine et dans celui, connexe, de la mise en œuvre de ce type de matériaux, les connaissances sont peu établies et les études menées sont relativement rares.

Pour de faibles taux de fibres, l'ouvrabilité du béton ne sera pas affectée et la répartition sera homogène dans le mélange. Cependant, il existe une fraction volumique critique pour laquelle la densité de contacts entre fibres est appréciable et ceci peut amener à la formation d'agglomérats. De nombreux paramètres liés aux fibres peuvent influencer sur la maniabilité du mélange à l'état frais comme la longueur, le taux d'incorporation, la rigidité, la morphologie, etc.

Une autre étude rhéologique a également montré que l'orientation des fibres rigides est liée à la contrainte d'écoulement du béton frais. Cette étude a également montré que la résistance à la flexion du béton était fortement liée à l'orientation des fibres. Il a également été observé qu'une meilleure orientation des fibres conduit à un béton ayant une faible limite d'élasticité, ce qui résulte en un développement d'une multi-fissuration sous chargement en flexion. Cependant, la rhéologie du béton fibré n'a été étudiée que dans le cas de fibres rigides avec un faible rapport d'aspect (rapport longueur/diamètre de la fibre) allant de 17 à 100. A titre de comparaison, les fibres de lin peuvent avoir un rapport d'aspect allant de 500 à 2000, ce qui explique leur grande flexibilité [27].

I.5.3.2. Influence des fibres sur le comportement mécanique

Tel que mentionné précédemment, on dénombre plusieurs types de bétons de fibres qui diffèrent selon leur composition, le type de fibre et les performances mécaniques. Le rôle principal des fibres est de mieux contrôler la fissuration du béton en limitant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Le

comportement du béton en flexion est conditionné par la fissuration de la zone tendue. En cela, la présence des fibres peut jouer un rôle stabilisateur après rupture de la matrice de béton. En effet, alors qu'un béton non-fibré a une rupture fragile qui se produit dès l'apparition de la première fissure, les bétons fibrés continuent de reprendre des efforts même après que la charge maximale soit atteinte (Figure 3.1). L'amélioration du comportement post-fissuration des bétons dépend de nombreux paramètres tels que la nature des fibres, les propriétés mécaniques et la morphologie de celles-ci, le taux et la longueur des fibres, etc. Chaque type de fibres a une utilisation bien spécifique suivant les propriétés recherchées pour le composite.

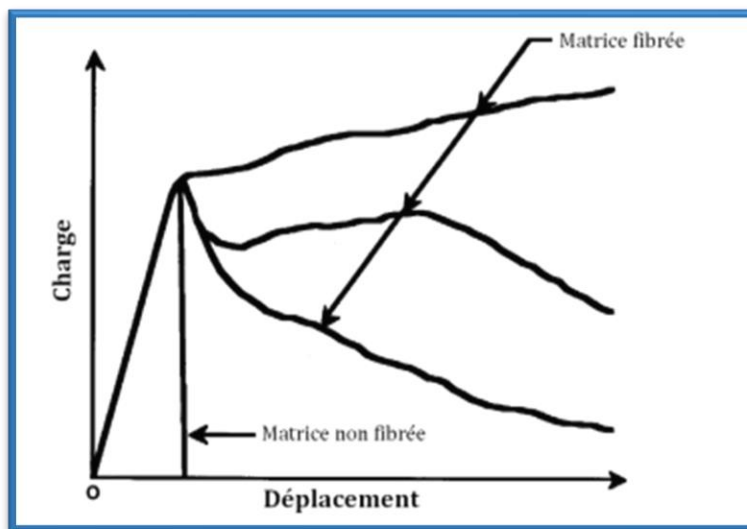


Figure I.31 : Courbes force-déplacement typiques en flexion d'un matériau cimentaire non-fibré et de matrices cimentaires renforcées par des fibres [27].

I.5.4. Caractéristiques des composites cimentaires incorporant des fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être associées à des matrices de différentes natures telles les polymères thermoplastiques ou thermodurcissables. Nous ne décrivons pas plus en détails ces composites à matrice polymère dont les propriétés sont relativement éloignées de celles valorisables dans le bâtiment. Nous limiterons notre étude bibliographique aux matériaux composites de construction à matrice minérale (à base de ciment, de plâtre ou encore de chaux) renforcée par des fibres courtes.

I.5.5. Propriétés à l'état frais

I.5.5.1. Maniabilité des composites à l'état frais

La maniabilité des mortiers et bétons est l'une des principales propriétés à l'état frais. L'incorporation de fibres végétales non-traitées au béton conduit à une forte réduction de la

maniabilité, due à l'absorption d'eau par les fibres. Cependant, le mélange doit être suffisamment maniable pour la mise en œuvre. Un mélange trop raide ou trop sec pourrait conduire à un produit final insuffisamment compacté, qui serait susceptible de contenir davantage de vides et/ou des nids d'abeille (réseau poreux). A l'inverse, un mélange trop humide conduira à une diminution des résistances mécaniques. L'autre aspect important concernant la maniabilité est la formation de boulettes de fibres, c'est-à-dire l'agglomération des fibres entre elles durant le malaxage. Le degré d'agglomération dépend du type et de la longueur des fibres utilisées, la fraction volumique de fibres, et de la dimension maximale de l'agrégat présent dans le composite cimentaire. L'agglomération des fibres doit être évitée car il a un effet néfaste sur la résistance. Certaines dispositions peuvent être prises lors du mélangeage afin de minimiser l'effet d'agglomération. Normalement, l'addition progressive des fibres à la fin de l'opération de malaxage, une fois les autres ingrédients mélangés, permet de réduire cet effet d'agglomération.

L'utilisation d'un plastifiant réducteur d'eau permet également d'augmenter sensiblement la maniabilité, sans nuire aux performances mécaniques du composite. De plus, la diminution du dosage en granulat permet aussi de limiter la formation de boulettes. [27].

Des mesures du temps d'écoulement sur des mortiers incorporant des fibres de lin ont montré que ce temps croît fortement avec l'augmentation du taux de fibres incorporées. La Figure 1.31 présente les résultats obtenus lors de cette étude, pour des fibres d'une longueur de 30mm. L'écoulement pour le mortier témoin sans fibres est de 6 secondes, ce qui correspond à une maniabilité « ouvrage » au sens de la norme NF P18-452. Un mortier est considéré comme non utilisable avec les méthodes courantes de mise en œuvre pour un temps d'écoulement supérieur à 20 secondes. Pour tous les taux volumiques de fibres, le temps d'écoulement est supérieur à 20 secondes. On note également que plus le taux de fibres augmente, plus le temps d'écoulement n'est augmenté.

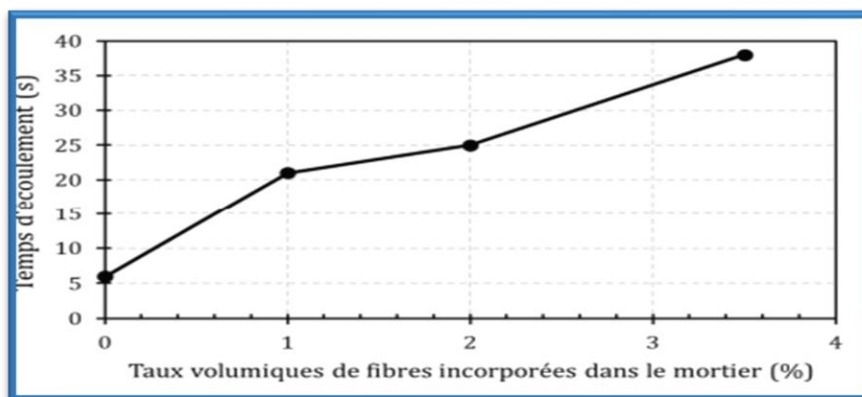


Figure I.32 : Temps d'écoulement de mortiers renforcés de fibres de lin [27]

D'autres études se sont également intéressées à la rhéologie des mortiers incorporant des fibres de lin. Le même constat a pu être fait, à savoir une diminution de la maniabilité des mortiers avec l'augmentation du taux de fibres. Au-delà de 4 % de fibres en volume, le mélange devient quasiment impossible à mettre en œuvre avec les méthodes traditionnelles.

I.5.6. Propriétés à l'état durci

I.5.6.1. Facteurs influents Les propriétés des bétons renforcés par des fibres végétales

Comme les autres bétons fibrés, sont affectés par un nombre important de facteurs, Les principaux sont les suivants :

- Type de fibre : lin, chanvre, sisal, jute, coir, bambou, bagasse, miscanthus, etc.
- Morphologie de la fibre : longueur, diamètre, section transversale.
- Configuration : fibre unitaire, faisceaux, brins.
- Etat de surface : lisse, rugueuse, présence d'un revêtement.
- Propriétés de la matrice : type de ciment, type et granulométrie des granulats, adjuvants.
- Proportions des différents constituants : rapport E/C, taux de fibres, proportion des granulats.
- Méthode de malaxage : type de malaxeur, séquence d'ajout des constituants, méthode d'incorporation des fibres, vitesse et durée de malaxage.
- Méthode de mise en œuvre : vibration standard, projection, extrusion.
- Conditions de cure : air, humide.

I.5.7. Comportement mécanique d'un composite cimentaire bio fibré

I.5.7.1. Comportement en flexion

Les études réalisées sur les matériaux composites incorporant des fibres végétales brutes mettent en évidence une modification du comportement mécanique du composite. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement élastique linéaire fragile en flexion, les éprouvettes de composites biofibrés n'ont pas un comportement fragile et continuent à supporter une charge significative après la charge maximale, Sedan [27] a comparé les propriétés mécaniques d'une pâte de ciment et d'une matrice cimentaire incorporant des fibres de chanvre (16 % en volume). Pour cela, des essais de flexion trois points ont été réalisés sur ces deux matériaux après 28 jours de cure.

La Figure 1.33 présente le comportement en flexion d'une pâte de ciment et d'une matrice renforcée par des fibres de chanvre.

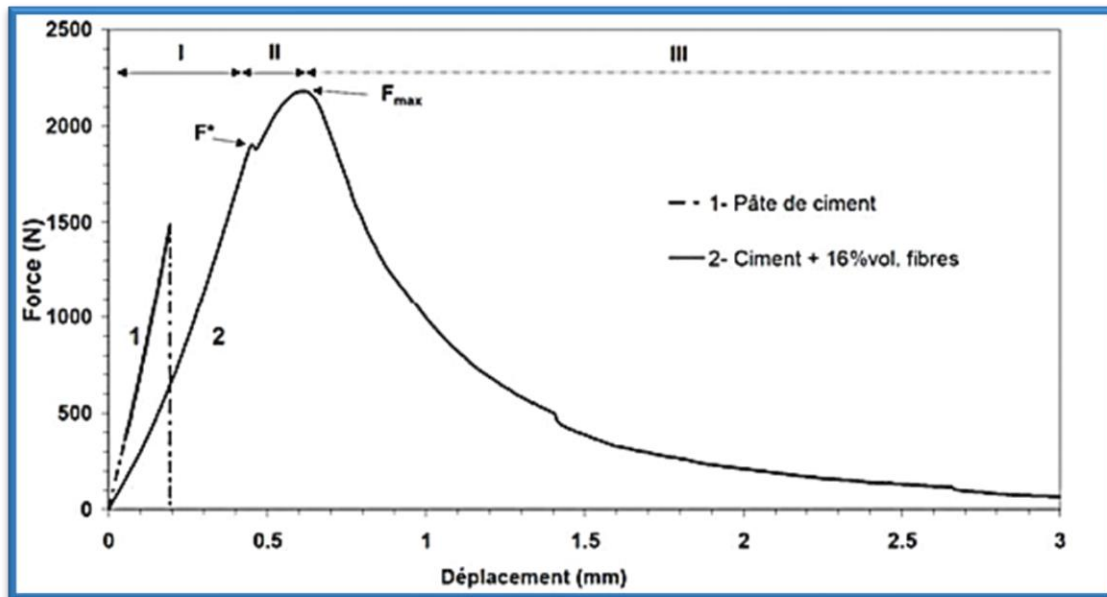


Figure I.33 : Comportement d'un échantillon de pâte de ciment et d'un composite ciment / fibres végétales en flexion [27].

L'auteur distingue trois zones dans le comportement du composite biofibré :

- **Phase I** : Comportement quasi-linéaire proche de celui de la pâte de ciment seule. Dans cette phase les efforts sont principalement supportés par la matrice.
- **Phase II** : Apparition de la première fissure dans la matrice à partir de F^* . Ensuite, les efforts sont transmis aux fibres qui supportent la charge. D'après Sedan, les fibres limitent également la propagation de la fissure par un effet de pontage.
- **Phase III** : A partir de F_{max} , la charge diminue de façon contrôlée contrairement à la pâte de ciment qui rompt brutalement. L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibre/matrice, suivie du déchaussement des fibres. L'incorporation de fibres végétales modifie peu la charge d'apparition de la première fissure, qui est principalement liée aux caractéristiques de la matrice, notamment sa déformation ultime. Cependant, une fois la première fissure apparue, les fibres permettent de limiter sa propagation. Le passage d'une matrice fragile à un composite fibré ductile présentant un comportement post-pic contrôlé est relevé par tous les auteurs. Cependant, cette modification du comportement n'est pas toujours accompagnée d'une amélioration de la résistance en flexion (Les performances du composite dépendent notamment du dosage et de la longueur des fibres (Figure 3.4). Le Hoang a étudié le renforcement de mortiers de ciment par des fibres de lin.

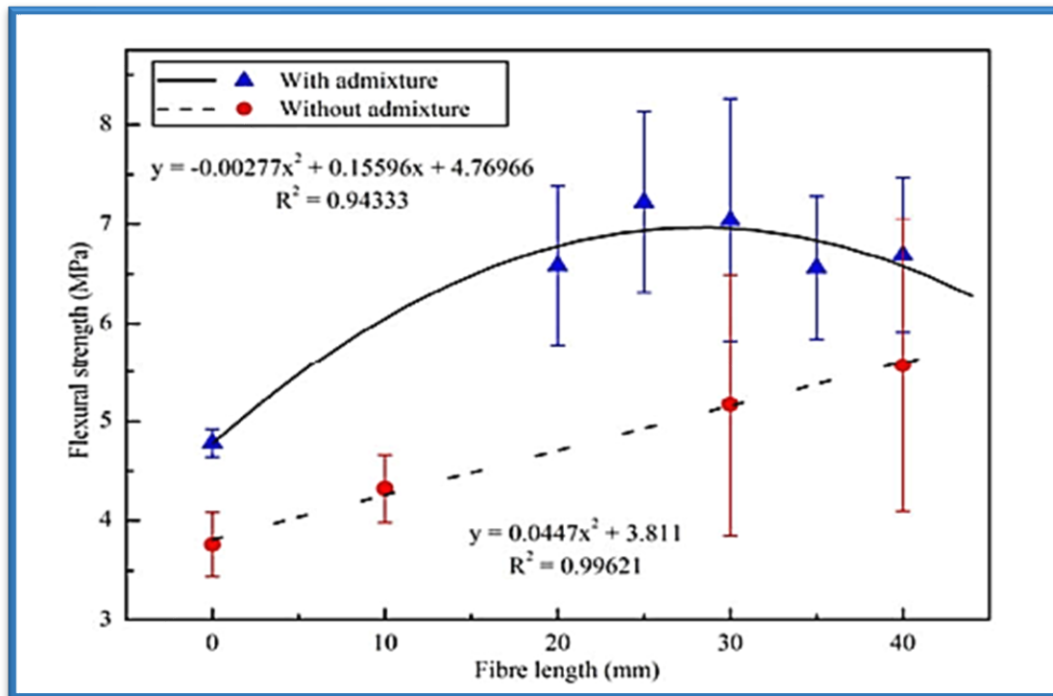


Figure I.34 : Influence du dosage et de la longueur des fibres de lin sur la résistance en flexion [27].

I.5.7.2. Comportement en compression

La résistance en compression des composites n'est, en général, pas significativement affectée par l'incorporation de fibres végétales. D'après une étude de Mansur, la résistance en compression de composites incorporant des fibres de jute n'est pas sensible à l'ajout de ces fibres (Mansur et Aziz, 1982). La résistance en compression reste quasiment la même pour les différents taux de fibres et les différentes longueurs (Figure 1.35).

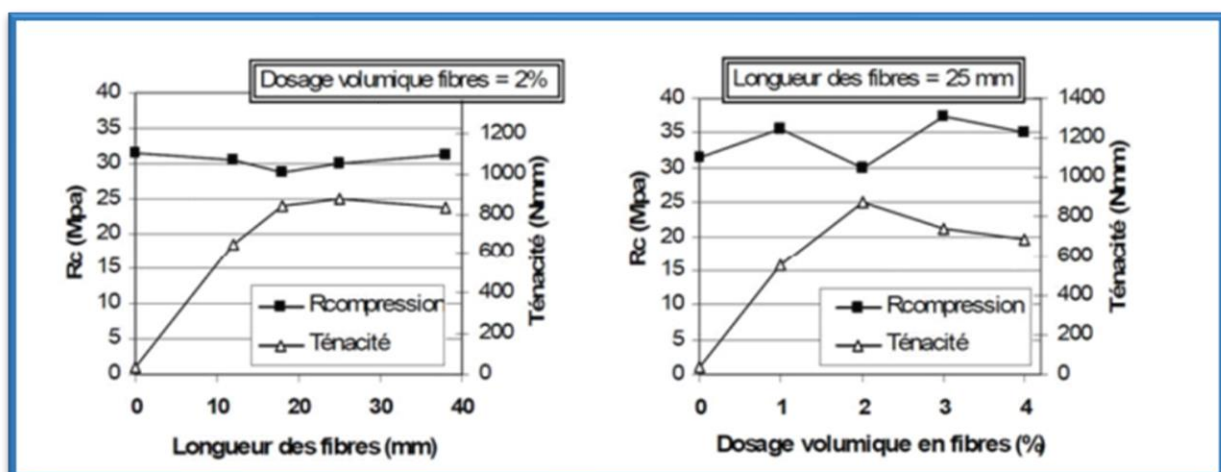


Figure I.35 : Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur la résistance en compression du composite cimentaire) [27].

Toutefois, ces résultats diffèrent de ceux de Kirke dont l'étude a mis en évidence une diminution

de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres. La résistance d'un béton renforcé par 2 % en volume de fibres de palmier dattier de longueur 15 mm représente 90 % de celle du béton non renforcé tandis que celle d'un béton renforcé par 3% de fibres de 60 mm de longueur ne représente plus qu'environ 55% de celle du béton seul. L'auteur attribue cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la répartition des fibres [27].

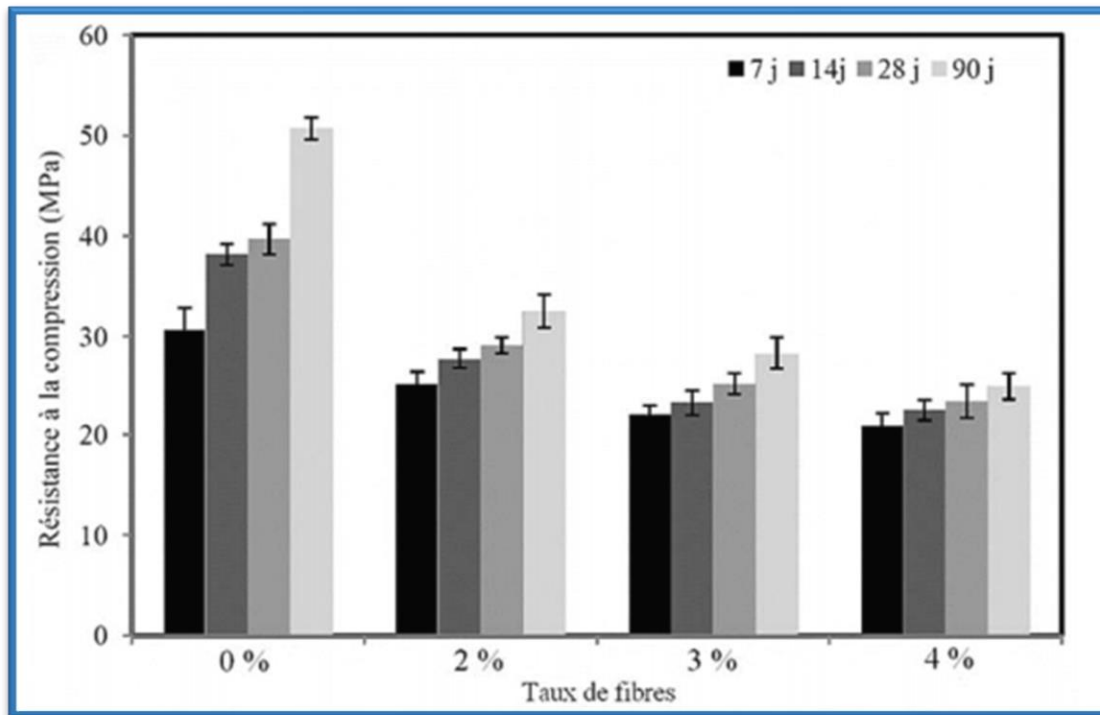


Figure I.36: Influence du taux de fibres de lin sur la résistance en compression du mortier [27].

I.5.8. Durabilités des composites cimentaires a fibres végétales

Malgré les propriétés mécaniques intéressantes obtenues pour les composites cimentaires à renfort de fibres végétales, de nombreuses études soulignent les problèmes rencontrés concernant durabilité des fibres dans une matrice fortement alcaline.

I.6. Conclusion

La recherche bibliographique sur le plâtre a montrés que :

- ☞ Il y'a plusieurs gisements de gypse, matière première pour produire le plâtre, son utilisation est limitée aux enduits intérieurs, aux carreaux de plâtre et quelque élément décoratif.
- ☞ Les qualités naturelles du plâtre sont des facteurs de confort, de santé et de sécurité pour nos espaces de vie. Ses multiples avantages l'ont érigé en tant que matériau naturel incontournable en construction comme en rénovation.
- ☞ Pour assurer une mise on ouvre facile de plâtre on ajoute la chaux aérienne comme retardateur de prise et qui n'affecte les propriétés mécaniques du plâtre.
- ☞ En fin, pour améliorer les propriétés des plâtres on va ajouter quelques matériaux tels le sable de dune, les fibres de sisal, la chaux pour l'introduire d'une façon rationnelle dans le domaine de bâtiments.
- ☞ Les matériaux composites se classifient selon la forme et selon la nature, leur rôle de ce dernier diminue la propagation des fissures.
- ☞ Les fibres utilisé sont biodégradable et elle viennent de la plante avaga sisalana qui a un bon impact sur l'environnement avec une faible densité égale à 0.113g/cm^3 .
- ☞ Le mortier de fibre végétale a une résistance à la flexion élevée par rapport le mortier témoin.

Chapitre II
Caractérisations des matériaux utilisés et
méthodes expérimentales.

Chapitre II Caractérisations des matériaux utilisés et techniques expérimentales.

II.1. Introduction

Nous abordons dans ce chapitre l'étude des caractéristiques des différents matériaux utilisés pour la réalisation de ce travail. Nous avons utilisé des matériaux localement produits tels que : plâtre, sable, chaux et fibres de sisal.

Ces essais de Caractérisation ont été effectués au sein de laboratoire de Génie Civil, Université Ammar Thelidji- Laghouat.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Plâtre

Le plâtre utilisé provenant de l'usine S.P.A Oasis plâtre-Ghardaïa, ce plâtre est commercialisé dans des sacs de 40 Kg et disponible au marché. La figure ci-dessous représente le sac du plâtre utilisé dans ce travail expérimental.



Figure II.1 : Plâtre utilisé.

II.2.1.1. Analyse chimique du plâtre

La Composition chimique du plâtre utilisé a été effectuée au sein de l'usine de sa fabrication. Le tableau suivant résume les constituants du plâtre utilisé et leur teneur.

Tableau II.1: Analyse chimique du plâtre.

Constituants Du plâtre	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	So_2	Na_2O	KO	cl
Teneur en %	0.70	0.10	0.80	32.15	0.53	44.95	0.09	0.03	0.002

- D'après le Tableau II.1, Nous remarquons que le plâtre utilisé contient des pourcentages appréciables de SO_2 et de CaO , ce qui affirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium.
- L'analyse minéralogique , nous montrons que le plâtre utilisé possède une teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ environ 96%, ce qui nous a permis de la classer en classe I et qui correspond à une teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ supérieure à 90% [14]

II.2.1.2. Analyse minéralogique par diffraction par rayon x :

La diffractométrie des rayons X est une technique de plus en plus utilisée pour l'étude de la composition minéralogique des matériaux. Cette technique est disponible au niveau de l'université de Laghouat.

Cet essai concerne les matériaux cristallisés. Il est réalisé à l'aide d'un diffractomètre de rayons X. Celui-ci est équipé d'un tube à anode de cuivre de rayonnement $\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$ et un compteur proportionnel.

D'après le diffractogramme de la Figure II.2, on remarque que le constituant essentiel du plâtre est le héli-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{ H}_2\text{O}$.

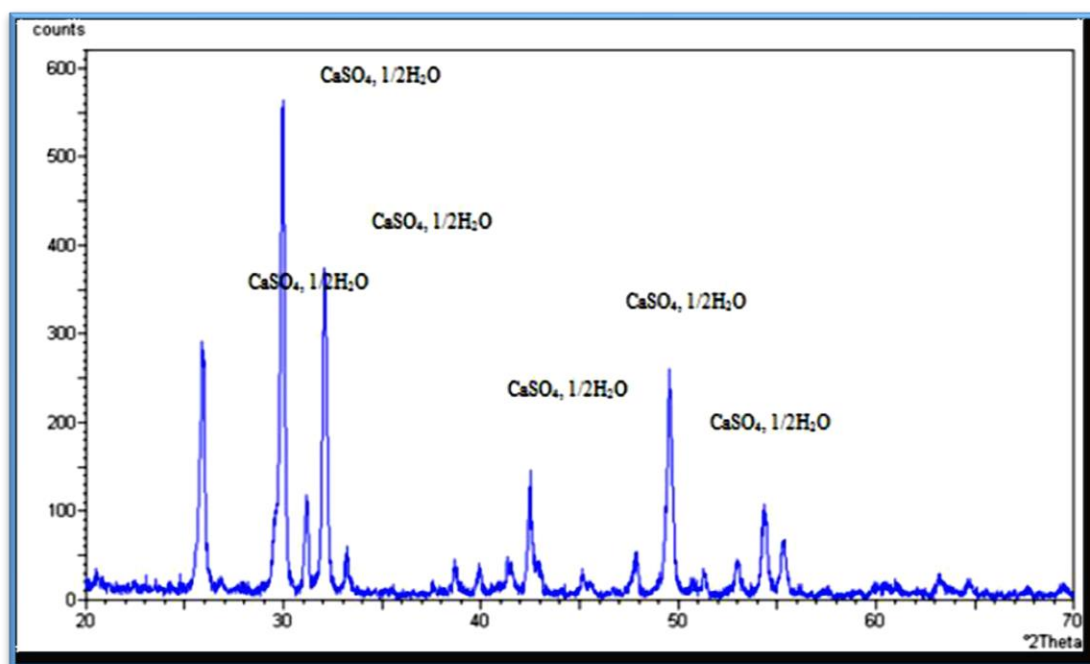


Figure II.2: Diffractogramme du plâtre utilisé.

II.2.1.3. Masse volumique absolue (NFP 18-555)

II.2.1.3.1. Le principe de mesure

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un densimètre de Chatelier, lorsqu'on introduit la poudre dont on cherche sa masse volumique absolue.

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.2.1.3.2. Équipements nécessaires

Pour effectuer cette essai on a besoin de :

- Un densimètre de Chatelier d'une contenance minimale de 50 cm^3 ;
- Un thermomètre, précis à $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, permettant de connaître la température du laboratoire ;
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé ;
- Papiers filtres.
- Plâtre de construction, Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le plâtre comme l'éthanol.



Figure II.3 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue.

II.2.1.3.3. Mode opératoire

- Tamiser 50 à 70 g de matériau ;
- Sécher l'échantillon jusqu'à l'obtention d'une masse constante et on le laisse refroidir ;
- Peser le densimètre rempli d'éthanol jusqu'à repère inférieur soit m_{dem} ;
- Verser l'échantillon dans le densimètre jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le repère supérieur ; voir figure II.3.
- Peser le densimètre soit m_{de} ;

La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M_{dem} - M_{de}}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (II-1)$$

M_{dem} : Masse de densimètre rempli d'eau et de matériau (g);

m_{de} : Masse de densimètre rempli d'eau en (g) ;

V_1 : Volume initial d'éthanol.

V2 : Volume final de liquide après l'introduction du plâtre.

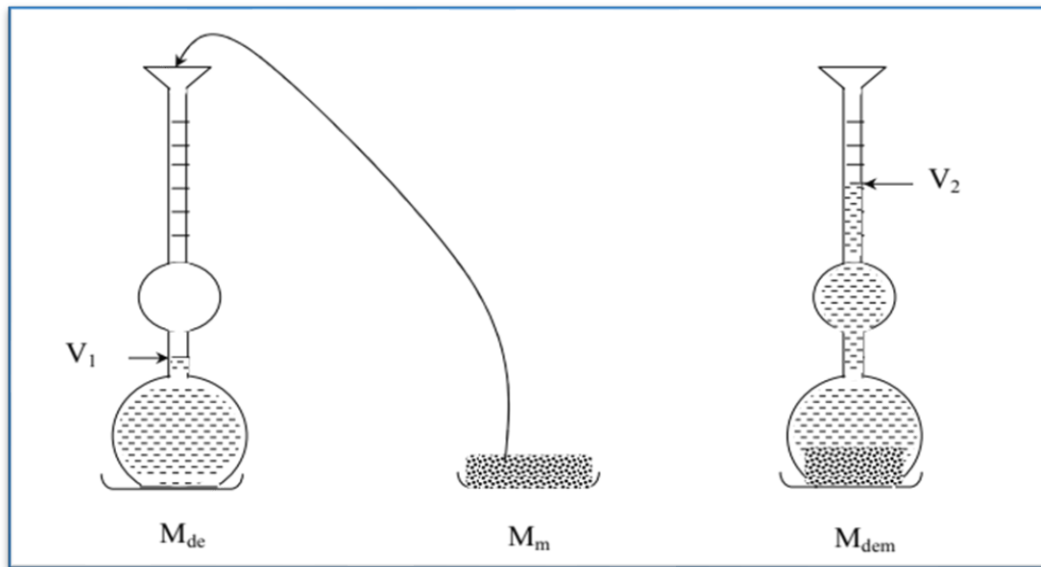


Figure II.4 : Protocole de l'essai.

✓ La masse volumique absolue obtenue du plâtre est 2510.40 kg/m^3 .

II.2.1.4. Masse volumique apparente (NFP 18-555)

II.2.1.4.1. Le principe de mesure

C'est le rapport entre la masse d'échantillon (M) sec et le volume total apparent (V_{tot}).

II.2.1.4.2. Equipements nécessaires

- Une balance avec une précision de 0.1g ;
- Récipient standard de volume connu de 1 litre ;
- Trépieds ;
- Règle métallique.



Figure II.5: Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.

II.2.1.4.3.Mode opératoire

- On pèse le récipient vide et on note sa masse ' M_0 ' ;
- On place le récipient sous le trépied est on commence à introduire le plâtre jusqu'à ce que le récipient soit plein ;
- On arase sans tasser, à l'aide d'une règle métallique ;
- On mesure le récipient plein et on note sa masse M_1 .
- La masse volumique apparente est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V} \dots \dots \dots (II-2)$$

M_1 : Masse totale.

M_0 : Masse de récipient standard.

V : Volume apparent.

✓ **La masse volumique Apparente obtenue du plâtre est 895kg/m³.**

II.2.1.5. Compacité et Porosité (NFP 18-555)

La compacité est définie par le rapport du volume (solide) de matière pleine au volume total. Alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité. La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à. L'essai est réalisé selon la norme NFP18-555. Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

La compacité

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} \rightarrow 35 \dots \dots \dots (II-3)$$

La porosité

$$\epsilon = 1 - C \rightarrow 65\% \dots \dots \dots (II-4)$$

II.2.1.6. Finesse de mouture (NF B 12.401)

II.2.1.6.1.Equipements nécessaires

- Etuve de séchage ;
- Tamis 0.2mm, 0.4mm et 0.8mm ;
- Balance ;
- Plâtre de construction

II.2.1.6.2. Mode opératoire

- On sèche 150 g de plâtre pendant 1 heure à une température 105 -110°C ;
- On Met le plâtre sec a L'air et on le laisse refroidir jusqu'à la température ambiante ;
- On pèse 50 g de plâtre sec avec une précision de 0,1 g ;
- On crible l'échantillon à l'aide du tamis ;
- On pèse le refus avec une précision de 0,1 g ;
- On calcule la finesse de mouture du plâtre de construction par la formule suivante :

$$f = \frac{M_1}{M_2} 100\% \dots \dots \dots (II-5)$$

M_1 : Masse de refus du plâtre sur le tamis, g ;

M_2 : Masse d'échantillon, g ($M_2 = 50$ g).

La norme NFB 12-301 distingue les plâtres de construction selon la finesse par tamisage.

Tableau II.2 :Finesse des plâtres de construction[2]

Tamis		Refus r(en %)de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	PGC	PFC
0,8	30	$5 \leq r < 20$	$r \leq 2$
0,4	27	$20 \leq r < 40$	$r \leq 15$
0,2	24	-	$r \leq 35$

Les résultats obtenus :

Tableau II.3: Résultats de finesse de plâtre.

Tamis		Refus (r %)de la masse initiale			
Ouverture (mm)	Module	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
0,8	30	8.88	5.43	8.5	7.60
0,4	27	28.20	37.9	39.1	35.6
0,2	24	11	16	11.2	12.37

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

D'après les résultats obtenus dans Le tableau II.2 en les comparant avec le tableau II.3on peut remarquer que pour :

- Tamis 0.8 → $5 < r = 7.6 < 20$.
- Tamis 0.4 → $20 \leq 35.6 < 40$.

✓ **Donc Le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction.**

II.2.1.7. Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre (NFB 12-401)

II.2.1.7.1. Principe

La quantité de gâchage à saturation est la quantité de plâtre en (g), humidifié lors de son versement dans 100 g d'eau. Cette valeur est déterminée selon la norme **NFB 12-401**.

II.2.1.7.2.Equipements nécessaires

- Bécher de 250 ml ;
- Balance de précision de 0.1 ;
- Chronomètre ;

II.2.1.7.3.Mode opératoire

- On prend 100 ml d'eau dans un bécher de 250 ml ;
- On saupoudre le plâtre dans le bécher pendant 30 secondes jusqu'à ce que le niveau de plâtre soit à 50 ml, et pendant la deuxième 30 secondes atteindre 100 ml.
- On continue l'opération jusqu'à ce que la quantité d'eau soit absorbée par le plâtre et cela pendant la deuxième minute.

Le rapport P/E pour le gâchage à saturation est égal à 0.6.

$$\frac{P}{E} = \frac{M_1 - M_0}{100} \dots\dots\dots (II-6)$$

Avec :

M₀ : Masse de l'eau, en grammes ;

M₁ : Masse de l'eau et la masse de plâtre, en grammes.

- ✓ D'après plusieurs essais pour la détermination du taux de gâchage à la saturation du plâtre nous avons trouvé que le rapport **E/p = 0.60** donne une meilleure maniabilité, ce qui est en accord avec les résultats de **Djoudi** [28]et recommandé par **CNERIB** [14].

II.2.1.8. Détermination de temps de début et fin de prise (NF B 12.401)

II.2.1.8.1. Principe

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm de diamètre, sous l'effet d'une charge de 300g, l'aiguille s'arrête à une distance 'd' du fond du moule telle que

$$d = 4mm \pm 1mm$$

- Début de prise : C'est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre plus jusqu'au fond du moule ;
- Fin de prise : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre pas dans la pâte.

II.2.1.8.2. Equipements nécessaires

- Appareil de Vicat (voir fig. 1) ;
- Balance;
- Tasse en porcelaine ;
- Couteau métallique ;
- Spatule métallique ;
- Chronomètre ;



Figure II.6: Équipements nécessaires.

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.2.1.8.3. Mode opératoire :

- On graisse la surface intérieure du moule tronconique ;
- On prépare dans la tasse en porcelaine la quantité d'eau correspondante à la consistance normale de 300 g du plâtre ;
- On verse 300 g de plâtre dans l'eau et on malaxe pendant 30 secondes ;
- On verse la pâte dans le moule tronconique et on arase sa surface par le couteau métallique ; la durée de cette opération ne doit pas dépasser 30 sec ;
- On place le moule sur l'appareil de Vicat et on met l'aiguille en contact avec la surface de la pâte ;
- On libère l'aiguille en laissant s'enfoncer par son propre poids dans la pâte ; et on remarque la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la surface de l'appareil de Vicat ; on répète cette opération toutes les 30 secondes en changeant chaque fois le lieu de chute de l'aiguille ;
- On détermine les délais de prise d'après les conditions suivantes :
 - Début de prise : C'est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre plus jusqu'au fond du moule ;
 - Fin de prise : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre pas dans la pâte.

Tableau II.4 : Détermination de début et de fin de prise pour un plâtre de construction

<i>Essais</i> \ <i>Temps</i>	<i>Temps de début de pris</i>	<i>Temps de fin de prise</i>
<u>Essai 01</u>	4 min 30 s	10 min 31s
<u>Essai 02</u>	4 min 45s	10 min50s

✓ D'après plusieurs essais pour la détermination de temps de début et de fin de prise pour E/P = 0.6, on a constaté que le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction avec un temps de prise égale à 6 min, 3sec.

II.2.1.9. Détermination de la résistance mécanique d'un matériau

II.2.1.9.1. Equipements et matériaux nécessaires

- Appareils pour la détermination de la résistance à la flexion et à la résistance compression (presse mécanique).

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

- moules prismatiques de mortier 4x4x16 cm³.

II.2.1.9.2. Mode opératoire

Le malaxage s'effectue sans malaxeur de la façon suivante :

- On met l'eau de gâchage dans un récipient et en saupoudrant avec le mélange (plâtre=330 g, chaux = 19.8 g) on mélangeant manuellement et rapidement.
- On verse le mélange dans les moules prismatiques.
- On démoule les éprouvette réalisées après 24h .En les conservent a l'air ambiants du laboratoire jusqu'à l'âge 28jours.
- On place les échantillons dans le dispositif pour la détermination de la résistance à la rupture par flexion ;
- On place les demi-éprouvettes sur le dispositif pour la détermination de la résistance à la rupture par compression ;

$$R_C = \frac{F}{S} \dots\dots\dots(II-7)$$

Où :

F : Charge appliquée à la compression N;

S : Section transversale mm².

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.5 : propriétés mécaniques du plâtre.

Propriétés mécaniques	28 jours (Mpa)
Résistance à la compression	10.7
Résistance à la flexion	3.1

II.2.2. Sable de dune

Le sable utilisé dans notre étude est le sable de dunes de la région nord de la ville de Laghouat. Les sables, qu'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de mêmes tailles et de petites dimensions.

II.2.2.1. Masse volumique apparente NFP 18-555

Elle est déterminée par la méthode du récipient standard de volume connu, il s'agit de remplir un volume de 1000 cm³ et peser la masse totale.

- ✓ La masse volumique apparente du sable de dune utilisé est de 1514.79 kg/m³.

II.2.2.2. Masse volumique absolue par la méthode d'éprouvette graduée (NFP 18-555)

C'est le rapport entre la masse d'échantillon (M) et le volume absolu de l'ensemble des grains.

✓ La masse volumique absolue du sable de dune de construction est 2598.68 kg/m^3

II.2.2.3. Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse d'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h à 20 C°,

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \dots \dots \dots (II-8)$$

Ms: Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 105 C°.

Mh: Masse de l'échantillon imbibé (surface essuyée).

✓ Le coefficient d'absorption du sable de dune utilisé est 1.62%.

II.2.2.4. Compacité et Porosité NFP 18-555

II.2.5.1. Compacité

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} \rightarrow 58\% \dots \dots \dots (II-9)$$

II.2.5.2. La porosité

$$P = 1 - C \rightarrow 42 \% \dots \dots \dots (II-10)$$

II.2.2.5. Equivalent de sable NFP 18-598

II.2.2.5.1.Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm des matériaux à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins, on lave l'échantillon selon un processus normalisé, et on le laisse reposer pendant 20 min, on mesure :

- Hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- Hauteur h2 : sable propre seulement .vue à l'œil.
- Hauteur h'2 : sable propre seulement .mesuré à l'aide du piston.

Deux valeurs sont déterminées E_{SV} visuel et E_{SP} piston

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

L'équivalent de sable est donné par les relations suivantes :

$$E_{sv} = \frac{h_2}{h_1} \dots \dots \dots (II-11)$$

$$E_{SP} = \frac{h'_2}{h_1} \dots \dots \dots (II-12)$$

Tableau II.6: Résultats obtenus de l'équivalent de sable.

ESSAIS	H_1	H_2	H'_2	E_{SV}	E_{SP}
ESSAI 01	11.2	10	9	89.28	80.35
ESSAI 02	10.8	9.5	8.5	87.96	78.70
MOYENNE	11	9.75	8.75	88.62	79.52

✓ D'après les résultats obtenus de l'équivalent de sable dans le tableau III. 7, on peut constater que le sable de dune utilisé est un sable très propre .

II.2.2.6. Morphologique des grains de sable de dune

Une photo du sable dunaire à grande échelle visualisée par microscope électronique à balayage (M.E.B), effectuée par Berdina [29]au laboratoire de l'I.U.T d'Amiens en France montre que la majorité des grains possèdent des formes arrondies avec une faible angularité

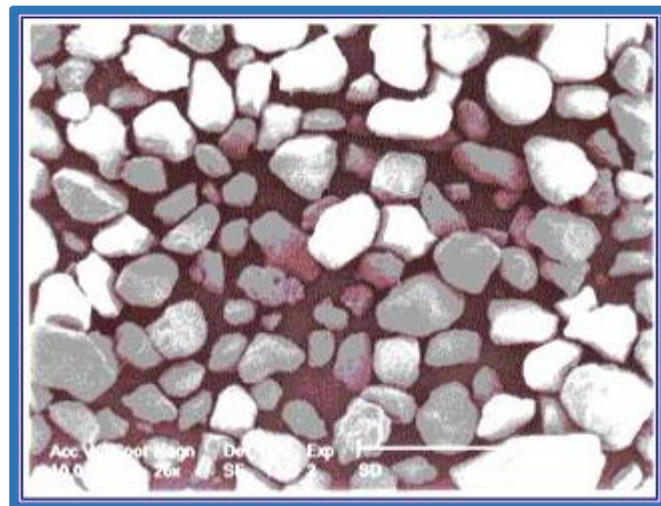


Figure II.7 : Morphologie des grains de sable de dune [29].

II.2.2.7. Analyse granulométrique (EN 933-1).

II.2.2.7.1.Principe

- L'essai a été réalisé conformément à la norme (EN 933-1).où les granulats passent à travers

une série des tamis décroissante des mailles en (mm)

- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

II.2.2.7.2.Mode opératoire

- On dessèche l'échantillon.
- On pèse la masse sèche MS de l'échantillon.
- On met du granulat sec sur la série des tamis.
- On met l'ensemble de la série des tamis sur la machine vibrante.
- On met en marche la machine jusqu'au moment où on considère que chaque tamis n'a retenu que la fraction granulométrique qui lui est due.
- On pèse les refus dans chaque tamis.

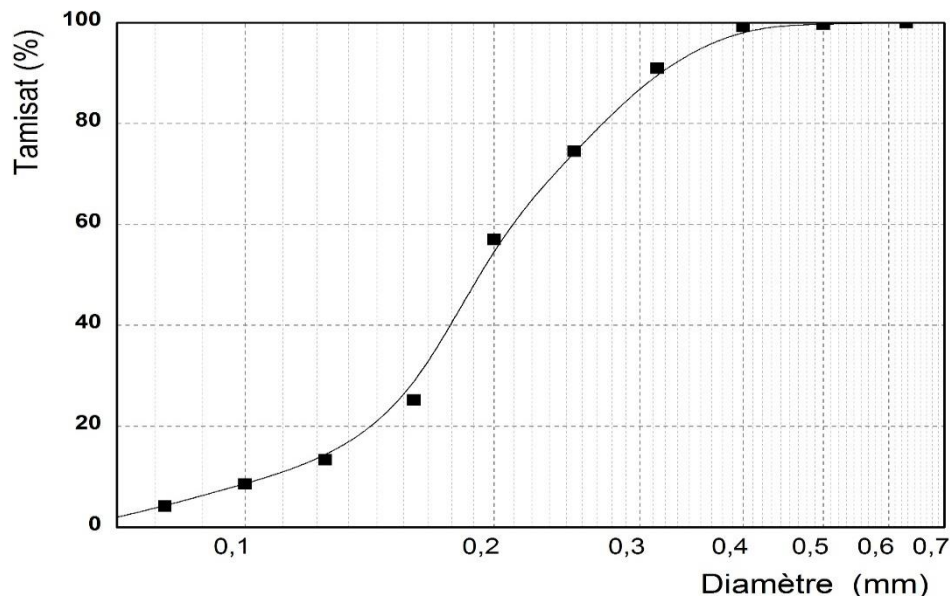


Figure II.8: Courbe granulométrique de sable de dune.

Le sable de dune est défini comme étant un sable fin et une granulométrie serrés.

II.2.2.8. Module de finesse de sable (EN 933-1).

Le module de finesse M_f du sable est défini comme suit :

$$M_f = \sum \frac{R_c \%}{100} \dots\dots\dots (II-13)$$

Avec : R_c : Refus cumulé en % sur les tamis 4 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 ; et 0,125 .On a obtenu un Module de finesse du sable égale à 1.32. Lorsque M_f est inférieure à $1.32 < 1.8$. Le sable de

Chapitre II :Caractérisations des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

dune utilisé est un sable très fin.

II.2.3. La chaux :

On a utilisé la chaux vive de SARL B.C.B Berriane - Ghardaïa figure II.9 comme retardateur de prise du plâtre, car elle diminue la solubilité de ce dernier et permet d'augmenter son temps d'emploi. En plus elle n'affecte pas ces propriétés mécaniques [15].

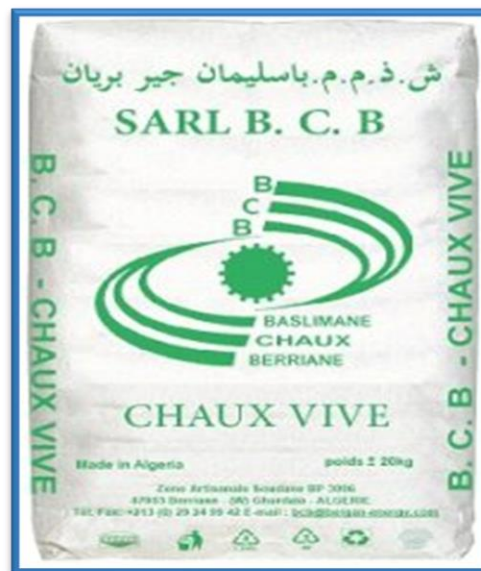


Figure II.9 : la chaux utilisée

La nomination commerciale de la chaux utilisée : chaux dolomitique vive.

Nomination chimique : oxyde de calcium et magnésium.

Forme chimique : CaO.MgO .

II.2.3.1 Analyse chimique de la chaux utilisée

Une analyse chimique de la chaux utilisée nous a été transmise par l'usine et représentée sur le tableau ci-dessous

Tableau II.7: analyse chimique de la chaux utilisée.

Constituants	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
Pourcentage	56%	24%	0.4%	0.08%	0.04%

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du réseau public de la ville de Laghouat. Le PH mesuré régulièrement est au voisinage de 7,5.

Si le choix a été porté sur cette eau est une eau qui a une pureté, et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides, et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat.(annexe2).

II.2.5. Les fibres de sisal

Les fibres utilisées sont des fibres végétales de sisal, disponible au marché,



Figure II.10 : Fibres de sisal en état de vente.

Pour couper les fibres de sisal en différents longueurs , il faut les regrouper pour faciliter le travail.

Les fibres sont découpées en morceaux de longueur 10mm, 20mm, 30mm et 40mm.

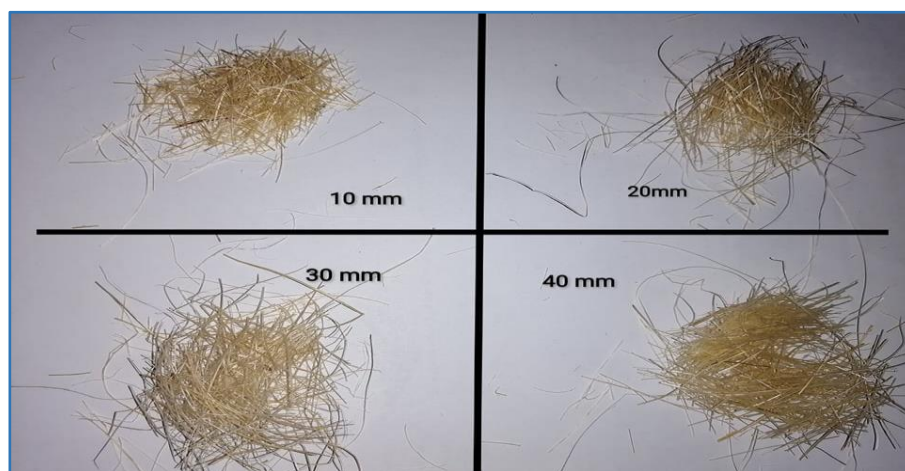


Figure II.11 Les fibres de sisal coupées en différents longueurs.

II.2.5.1. Propriété physico-mécaniques des fibres de sisal :

L'essai de traction a été effectué au laboratoire de mécanique à l'université de Laghouat. On a utilisé une presse de traction de 100KN de capacité

Les résultats des caractéristiques physico-mécaniques des fibres de sisal utilisées sont mentionnés sur le tableau II.9 [22].

Tableau II.8 : Caractéristiques physico-mécaniques des fibres utilisées[14]

Propriétés	Valeurs
Densité	1.3
Taux d'absorption (%)	143.75
Résistance à la traction (Mpa)	572.95
Module d'élasticité (Gpa)	4.77
Déformation à la rupture (mm)	0.191

II.3. Formulation des composite en plâtre

La formulation des composites de plâtre à base de fibres de sisal a été préparée comme suit :

- Composite 1 : plâtre
- Composite 2 : plâtre + sable.
- Composite 3 : plâtre +fibres
- Composite 4 : plâtre + fibres+ sable.
 - On ajoute 6% de la chaux vive comme retardateur de prise.
 - S/P= 0.5 rapport recommandé par CNERIB[14].
 - E/P=0.6 rapport recommandé par CNERIB [14]et Djoudi [28].

On a fait cette formulation pour les longueurs 10mm ,20mm, 30mm et 40mm.

Tableau II.9 : Formulation des composite en plâtre.

	Dosage en pourcentage%			Dosage en pourcentage en gramme				
Mélange	S/P	Fibre	Chaux	Plâtre (g)	Sable (g)	Fibre (g)	Chaux (g)	Eau (g)
Mix 1	0.5	0	6%	900	450	0	54	540
Mix 2	0	0.5%	6%	900	0	9	54	540
Mix 3	0.5	0.5%	6%	900	450	9	54	540
Mix 4	0	1%	6%	900	0	18	54	540
Mix 5	0.5	1%	6%	900	450	18	54	540
Mix 6	0	1.5%	6%	900	0	27	54	540
Mix 7	0.5	1.5%	6%	900	450	27	54	540
Mix 8	0	2%	6%	900	0	36	54	540
Mix 9	0	2%	6	900	450	36	54	540

III.3.1.Le processus de malaxage :

- On mélange le plâtre, les fibres, la chaux et le sable à sec.
- Dans un récipient on met l'eau et on saupoudre le mélange sec avec un malaxage manuelle et rapide, cette étape prend une durée de 30sec,
- On commence à remplir les moules par 3 couches et à l'aide d'une tige on pique les couches pour éviter tous les problèmes de ségrégation, le moule a une dimension de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.
- Le démoulage est fait après 24 heures.

III.3.2.Conservation des éprouvettes

La conservation des éprouvettes démoulées se fait a l'air ambiant du laboratoire avec :
 Une température de $T=25^\circ \pm 1$ et une humidité relative $45\% \pm 5$, j'jusqu'à l'âge de 14 jours.

II.4. Caractérisation physique

II.4.1. Masse volumique

Les éprouvettes 4x4x16 cm³ sont pesées régulièrement au cours du temps, et cela à l'aide d'une balance de précision de 0.1g. Les masses volumiques a âges de 14 jours sont mesurées lors de cette étude.

II.5. Caractérisation mécanique

II.5.1. Résistance à la flexion EN 196-1

L'essai de flexion à trois points et l'essai de compression sont réalisés selon la norme **EN 196-1**, sur les échantillons élaborées, moyennant un appareil d'essais mécanique de marque "CONTROLS" de charge maximale de 100 KN muni d'un ordinateur. La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.

La résistance à la flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_f = \frac{3 f_r L}{2b^3} \dots\dots\dots (II-14)$$

R_f : Résistance à la flexion en MPa;

L : Distance entraxe des rouleaux ($L= 100$ mm) ;

f_r : Charge à la rupture en N.

b : Largeur de la section carrée du prisme en mm ($b = 40$ mm).

II.5.2. Résistance à la compression EN 196-1

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s $\pm$ 200 N/s.

La résistance à la compression est déterminée par la formule suivante :

$$R_C = \frac{f_c}{A} \dots\dots\dots (II-15)$$

R_C : Résistance à la compression en MPa.

f_c : Charge à la rupture en N.

A: L'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm² (1600 mm²).

II.6. Conclusion

L'étude de caractérisation des matériaux utilisés montre que :

- ✓ Le plâtre utilisé est de qualité cela d'après sa teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ élevée.
- ✓ L'étude de la finesse de mouture et de la prise montre que notre plâtre est un plâtre gros de construction à temps de prise court d'où la nécessité d'un retardateur de prise.
- ✓ Le sable de dune est un sable siliceux avec une propreté élevé.
- ✓ L'eau de gâchage a un pH au voisinage de 7.5 qui convient au béton.
- ✓ Les fibres de sisal ont une bonne résistance à la traction 572.69 (MPa) par rapport aux autres fibres végétales.

Chapitre III

Résultats et interprétations

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Les matériaux étudiés dans ce chapitre sont des composites à base de plâtre, chaux, sable de dune et fibres de sisal.

La formulation des composites élaborés dans cette étude est basée sur les recommandations pour la construction en plâtre **CNERIB** [14] et les travaux expérimentaux de **Djoudi** [28].

En deuxième lieu, ce travail expérimental consiste à discuter les résultats des propriétés physico-mécaniques à l'âge 14 jours telles que : Masse volumique apparente, résistance à la flexion et résistance à la compression.

III.2. Etude des Propriétés physiques

III.2.1. Masse volumique apparente

Les résultats de la masse volumique des composites à l'état durci en fonction des différents pourcentages et longueurs des fibres de sisal sont regroupés dans les tableaux et les figures Ci-dessous :

III.2.1.1. Masse volumique de composite plâtre + fibre

La figure III.1 et le tableau III.1, donne les résultats de la masse volumique du composite en plâtre en fonction des différents pourcentages et longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.1: Variation de la masse volumique pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre .

<i>Longueurs des fibres (mm)</i> <i>Pourcentages des fibres(%)</i>	<i>10mm</i>	<i>20mm</i>	<i>30mm</i>	<i>40mm</i>
<i>Plâtre témoin</i>	1328.12	1328.12	1328.12	1328.12
<i>0.5%(PF)</i>	1390.62	1437.5	1464.84	1464.84
<i>1%(PF)</i>	1484.3	1523.43	1601.5	1660.15
<i>1.5%(PF)</i>	1523.4	1562.5	1679.68	1718.75
<i>2%(PF)</i>	1523.4	1562.5	1757.81	1718.75

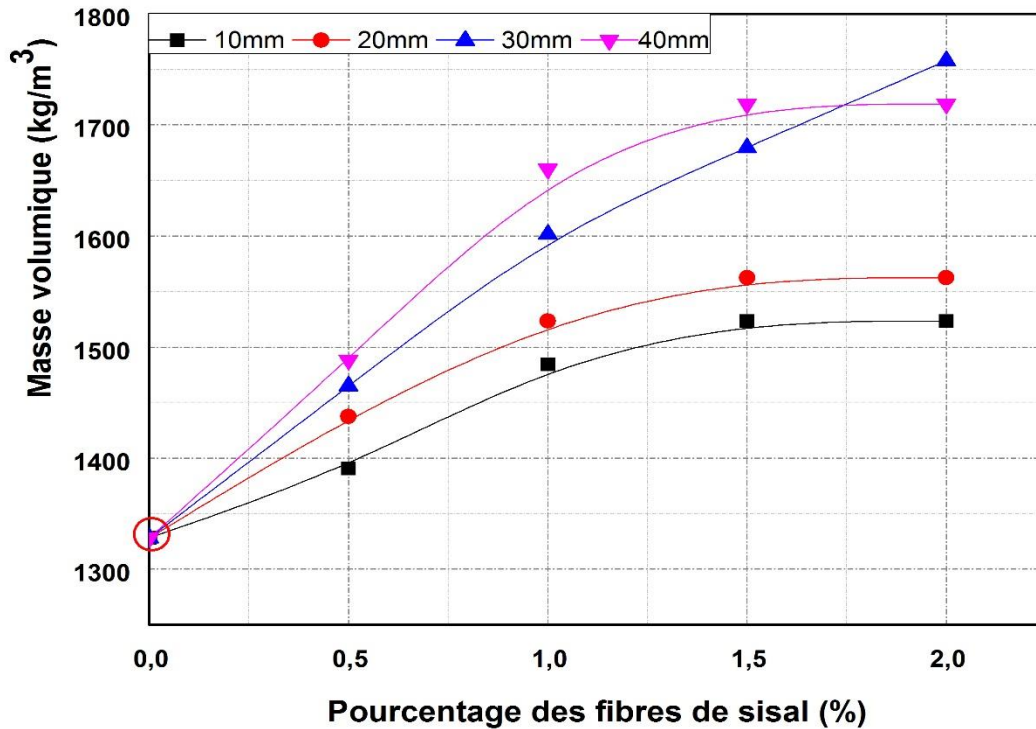


Figure III.1: Variation de la masse volumique pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre .

D'après la figures **III.1** et le tableau **III.1**, On remarque que la masse volumique des composites en plâtre augmente avec le pourcentage et pour différentes longueurs des fibres. Elle est d'autant meilleure pour certaines longueurs et dosages élevés de fibre, tels que 30 mm et 40mm pour un dosage de 2%. Nos résultats sont en accord avec les travaux de **Aqil et al**[30] Sur l'effet des fibres de sisal sur la densité apparente de plâtre. Jusqu'à pourcentage de 4% après, elle décroît-on augmentant le pourcentage des fibres. Et contrairement aux résultats de plâtre avec fibres de palmier **Djoudi** [28] et plâtre avec fibre d'alfa **Bahlouli** [31]. Cette contradiction par rapport aux autres fibres végétales et due aux caractéristiques des fibres utilise [28].

III.2.1.2. Masse volumique de mortier de plâtre +fibre

La figure III.2 et le tableau III.2 donne les résultats de la masse volumique de mortier en plâtre avec fibre de sisal en fonction des différents pourcentages et longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.2: Variation de la masse volumique pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre .

Longueurs des fibres (mm) Pourcentages des fibres(%)	10mm	20mm	30mm	40mm
Plâtre témoin	1601.56	1601.56	1601.56	1601.56
0.5%(MPF)	1562.50	1562.52	1601.56	1640.62
1%(MPF)	1555.40	1560.90	1569.60	1626.60
1.5%(MPF)	1564.00	1564.70	1621.09	1640.62
2%(MPF)	1523.43	1564.70	1600.10	1660.40

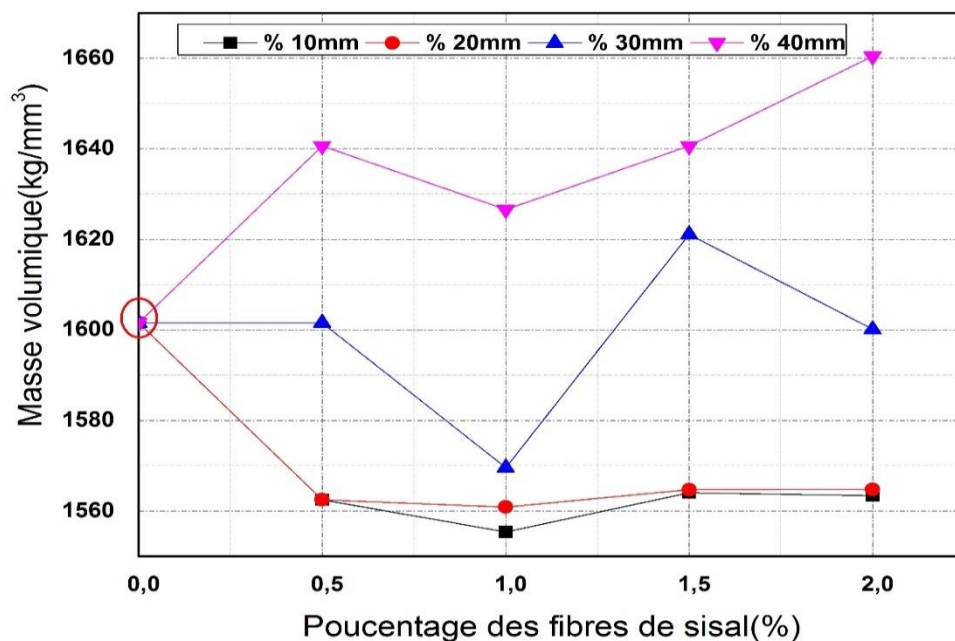


Figure III.2: Variation de la masse volumique pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre .

Le tableau III.2 et la figure III.2 montrent que la masse volumique de mortier de plâtre augmente avec l'ajout de sable, et cela est due au fait que le sable remplit les vides existants dans le plâtre[31], et on remarque aussi que la masse volumique du mortier varie irrégulièrement avec les pourcentages et les différentes longueurs des fibres de sisal, les meilleurs résultats sont obtenus pour les fibres de 40mm de longueur et 2% de dosage.

III.3. Etude des propriétés mécaniques

III.3.1. Résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des composites à l'état durci en fonction des différents pourcentages et longueurs des fibres de sisal sont regroupés dans les tableaux et les figures Ci-dessous.

III.3.1.1. Résistance à la flexion d'un composite de plâtre +fibre de sisal

La figure III.3 et le tableau III.3, donnent les résultats de la résistance à la flexion d'un composite en plâtre avec fibre de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.3: Variation de la résistance à la flexion pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibres.

<i>Longueurs des fibres (mm)</i>	<i>10mm</i>	<i>20mm</i>	<i>30mm</i>	<i>40mm</i>
<i>Pourcentages des fibres(%)</i>				
<i>Plâtre témoin</i>	<i>1.37</i>	<i>1.37</i>	<i>1.37</i>	<i>1.37</i>
<i>0.5%(PF)</i>	<i>2.78</i>	<i>2.92</i>	<i>2.76</i>	<i>2.24</i>
<i>1%(PF)</i>	<i>1.54</i>	<i>1.56</i>	<i>1.77</i>	<i>1.61</i>
<i>1.5%(PF)</i>	<i>2.37</i>	<i>1.62</i>	<i>1.90</i>	<i>2.17</i>
<i>2%(PF)</i>	<i>2.30</i>	<i>1.65</i>	<i>1.70</i>	<i>1.47</i>

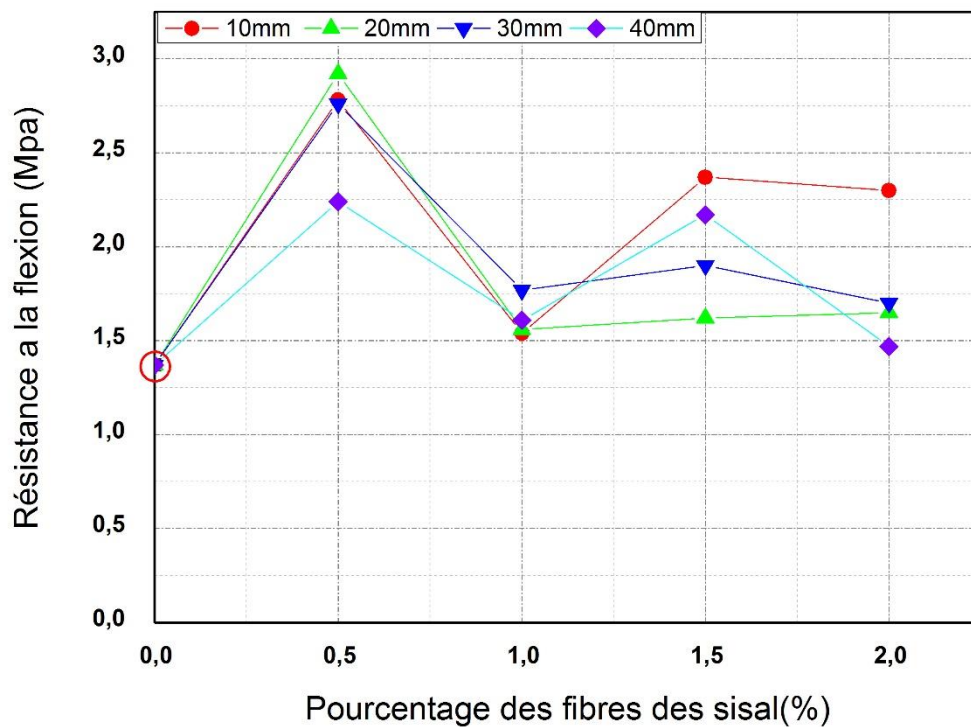


Figure III.3: Variation de la résistance à la flexion pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs de fibre.

D'après le tableau III.3 et la figure III.3, on remarque que résistance à la flexion du plâtre varie d'une façon irrégulière avec des pourcentages et différentes longueurs des fibres de sisal ce qui est contradictoire avec la résistance à la flexion des composites renforcés avec d'autres fibres végétales telles que les fibres d'Alfa [31] et les fibres de Palmier [28] etc. Cela peut être due à l'effet de l'orientation des fibres et aussi l'interface fibre et matrice, autrement dit la bonne adhérence entre la fibre et la matrice, ce qui a été remarqué par l'examen de faciès de rupture des éprouvette réalisées,

Les meilleurs résultats par rapport au plâtre témoin sont obtenus pour les longueurs de 20 mm et 10 mm avec 0.5% de pourcentage de fibre.

III.3.1.2. Résistance à la flexion d'un mortier de plâtre +fibre de sisal

La figure III.4 et le tableau III.4, donnent les résultats de la résistance à la flexion d'un mortier en plâtre avec fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.4: Variation de la résistance à la flexion pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

Longueur Pourcentages des fibres(%)	10mm	20mm	30mm	40mm
<i>Mortier de plâtre témoin</i>	2.96	2.96	2.96	2.96
<i>(MPF) 0.5%</i>	1.98	2.20	2.67	2.24
<i>(MPF) 1%</i>	1.70	1.46	1.90	1.76
<i>(MPF) 1.5%</i>	1.40	1.33	1.67	1.32
<i>(MPF) 2%</i>	1.72	1.02	1.27	1.07

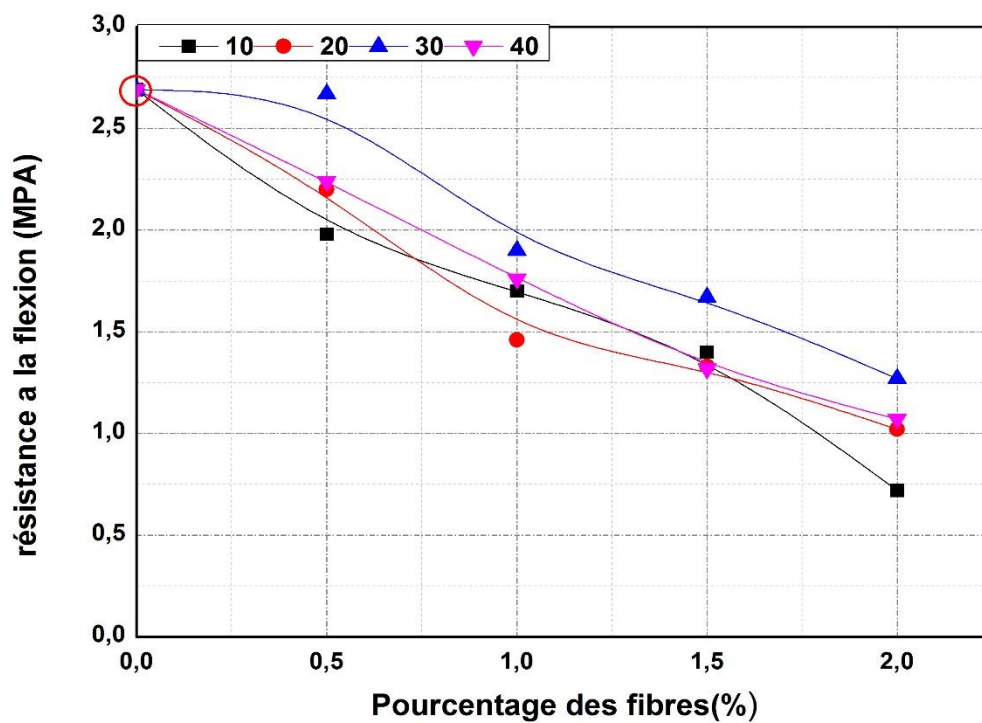


Figure III.4 : Variation de la résistance à la flexion pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

D'après la figure III.4 et le tableau III.4, la résistance à la flexion diminue avec le dosage pour différentes longueurs des fibres, cela peut être expliquée par la même chose que la pâte en plâtre avec fibres de sisal, les meilleurs résultats sont obtenus pour la longueur de 30mm et 0.5 % de pourcentage.

III.3.2. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des composites à l'état durci en fonction des pourcentages et pour différents longueurs des fibres de sisal sont regroupés dans les tableaux et les figures Ci-dessous.

III.3.2.1. Résistance à la compression d'un composite de plâtre +fibres de sisal

La figure III.5 et le tableau III.5, donnent les résultats de la résistance à la compression d'un composite en plâtre avec fibre de sisal en fonction des pourcentages et différents longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.5: Variation de la résistance à la compression pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

<i>Longueur</i> <i>Pourcentages des fibres(%)</i>	<i>10mm</i>	<i>20mm</i>	<i>30mm</i>	<i>40mm</i>
<i>Plâtre témoin</i> <i>(PF)</i>	4.42	4.42	4.42	4.42
<i>(PF) 0.5%</i>	6.03	5.73	8.25	7.43
<i>(PF) 1%</i>	7.98	6.25	7.51	7.48
<i>(PF) 1.5%</i>	5.77	4.89	6.67	6.23
<i>(PF) 2%</i>	3.37	3.81	4.61	4.76

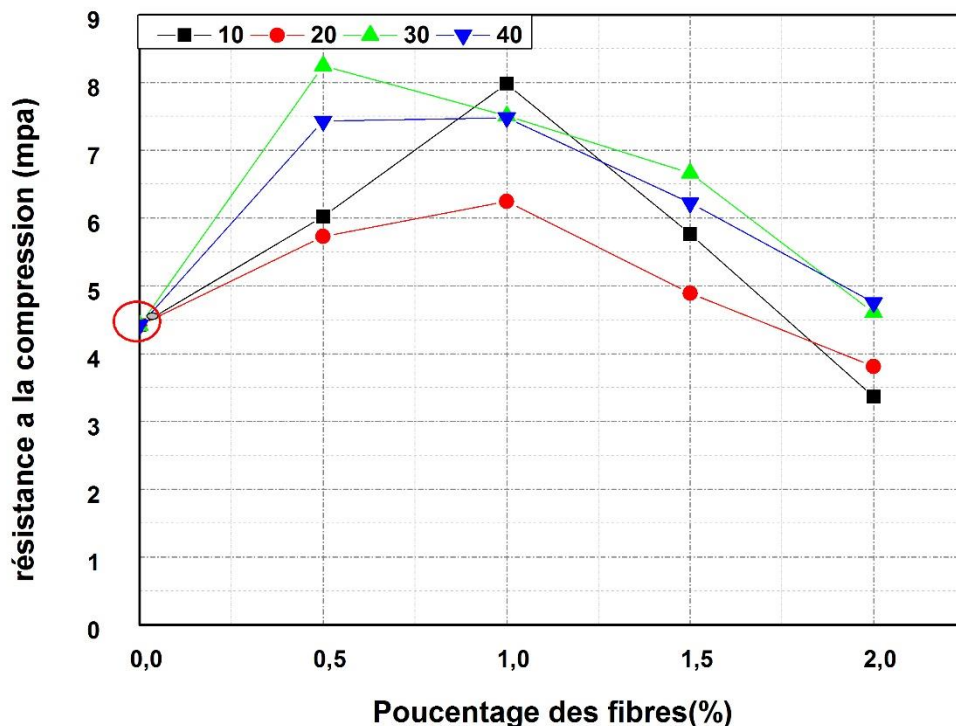


Figure III.5 : Variation de la résistance à la compression pour un composite de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

D'après la figure III.5 et le tableau III.5, la résistance à la compression de plâtre +fibre sisal croît avec l'augmentation des dosages et différentes longueurs et diminue pour certains dosage élevé tel que 2% de dosage pour 10 et 20mm de longueurs. Cela est dû à la bonne disposition de la fibre par rapport à l'effort de compression appliquée. Cette disposition a amplifiée l'effort de compression d'où l'amélioration de la résistance à la compression de plâtre avec la fibre de sisal [28] Les meilleurs résultats sont obtenus pour le dosage de 0.5% avec 30mm de longueur. On peut dire aussi pour les longueurs 10,20 et 40mm, on a enregistré une augmentation de la résistance a compression jusqu'à 1% de fibre après elle décroît cela est due à un excès de fibre d'où une perte de maniabilité, ce dernier et en accord avec les travaux de Djoudi[28]

III.3.2.2. Résistance à la compression d'un mortier de plâtre +fibres de sisal

La figure III.6 et le tableau III.6, donnent les résultats de la résistance à la compression d'un mortier de plâtre avec fibre de sisal en fonction des pourcentages et différents longueurs des fibres de sisal.

Tableau III.6: Variation de la résistance à la compression pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

Longueur (mm)	10mm	20mm	30mm	40mm
Pourcentages des fibres(%)				
Mortier de plâtre témoin	8.43	8.43	8.43	8.43
(MPF) 0.5%	7.81	7.58	7.42	7.44
(MPF) 1%	3.30	2.825	3.18	2.30
(MPF) 1.5%	5.815	3.23	3.44	2.965
(MPF) 2%	5.585	2.88	3.08	2.73

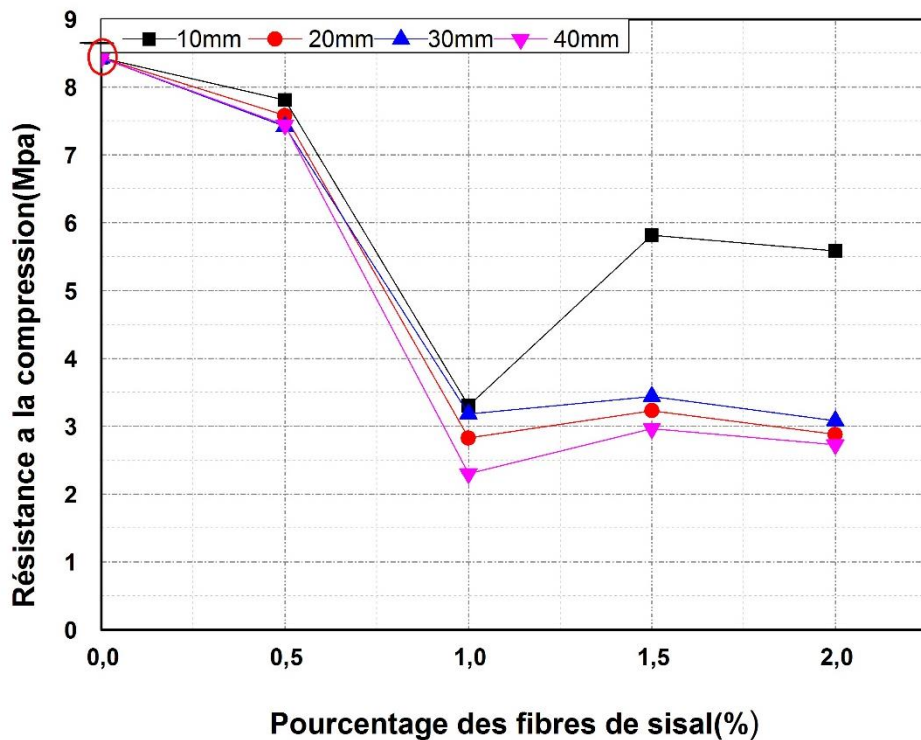


Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression pour un mortier de plâtre +fibres de sisal en fonction des pourcentages et différentes longueurs des fibre.

D'après la figure III.6 et le tableau III.6, la résistance à la compression décroît avec le dosage et la longueur des fibres, Les meilleurs résultats sont obtenus pour 10mm avec un dosage de 0.5%.

Cela due que les fibres perturbent le squelette minérale du mortier de plâtre de plâtre [28] d'où une diminution de la résistance à la compression, Ce qui est en accord avec les résultats de Djoudi [28].

III.4. Conclusion

L'étude des propriétés physico- mécaniques des composites de plâtre et mortiers en plâtre renforcés avec les fibres végétales de sisal a montré que :

- ☞ La masse volumique d'un mortier de plâtre croît avec l'ajout de fibre de sisal pour les pourcentages et différentes longueurs des fibre.
- ☞ La résistance à la flexion pour un composite de plâtre avec fibre de sisal croit pour certains dosages et différentes longueurs des fibres de sisal.
- ☞ La résistance à la flexion pour un mortier de plâtre avec fibre de sisal décroît avec les dosages et différentes longueurs des fibres de sisal.
- ☞ La résistance à la compression du composite de plâtre avec fibre de sisal croît pour certain dosages et les longueurs des fibres.
- ☞ La résistance à la compression du mortier de plâtre décroît avec les dosages et les longueurs des fibres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude entre dans le cadre de l'utilisation des matériaux locaux et la valorisation des fibres naturelles dans le domaine de construction. Les matériaux utilisés sont : le sable dunaire, les fibres de sisal d'une source renouvelable et le plâtre qui ne produit que de l'eau lors de sa fabrication, donc il s'intègre parfaitement à la logique du développement durable.

Au début il a été nécessaire de définir le plâtre et ses produits ainsi que ses dérivés. En concluant que les recommandations du C.N.E.R.B pour la construction en plâtre sont venues combler un vide existant dans ce domaine.

En deuxième partie, on a conclu que les matériaux composites peuvent être classés suivant la forme ou suivant la nature des composants, et que les composites à fibres jouent un rôle importants dans l'arrêt de mécanisme de fissuration. La géométrie et la forme de fibres utilisées sont choisies en fonction de la maniabilité et le comportement mécanique à étudier. La caractérisation des matériaux utilisés a montré que :

- Le plâtre utilisé est un plâtre de qualité, le sable de dune est très propre et les fibres de sisal possèdent une bonne résistance à la traction.

L'étude de l'effet du dosage et de la longueur des fibres de sisal sur les propriétés physico-mécanique on conclut que :

- La masse volumique de la pâte pure en plâtre croît de 1328.12 jusqu'à 1757.81 kg/cm^3 pour un composite de plâtre avec fibres de sisal.
- La masse volumique du mortier de plâtre croît de 1601.56 jusqu'à 1660.40 kg/cm^3 pour un mortier de plâtre avec fibres de sisal.
- Concernant la résistance à la flexion les meilleurs résultats sont obtenus pour les composites en plâtre avec 0.5% et 20mm de longueur de fibres de sisal et elle est de l'ordre de 2.92 MPA et de 2.67 MPA pour le mortier de plâtre avec 0.5% de dosage et 30mm de longueur de fibres de sisal.
- Les meilleurs résultats de la résistance à la compression sont enregistrés pour le composite plâtre avec 0.5 % de fibre de sisal de 30mm de longueur et elle est de l'ordre 8.24 MPA. Par contre pour le mortier de plâtre avec fibre de sisal, elle est de l'ordre de 7.81 MPA et qui correspond à 0.5% et 10mm de longueur de fibre.

Conclusion générale

A la lumière des résultats obtenus cette étude doit être complétée par une étude de :

- Comportement thermiques des composites en plâtre renforcé avec des fibres de sisal.
- Corrélation entre les propriétés mécaniques et la microstructure du composite avec un microscope électronique à balayage.
- Durabilité des composite de plâtre à base de fibres de sisal, en vérifiant la comptabilité chimique entre la matrice plâtre et les fibres de sisal.
- Variations dimensionnelles pour un composite et mortier de plâtre à base des fibres de sisal.
- Modélisation des propriétés thermo-physiques pour des composites en plâtre avec fibres de sisal.
- Propriétés acoustique des composites en plâtre avec fibres de sisal.

Références bibliographiques

- [1] S. Meille, « Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure », L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, 2001.
- [2] H. Benouis et D. Chehrouri, « Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un composite en plâtre à base des déchets des bouteilles en plastique recycle. », Mémoire de master, p. 147, 2019.
- [3] I. Mahboubi et M. Khalfi, « Etude des propriétés physico-mécaniques d'un composite en plâtre à base de déchets en plastique recycle. », Mémoire de master Université Amar Thelidji- Laghouat, 2018.
- [4] « 6 - Le plâtre.<https://csd23.blogspot.com/2009/04/6-le-platre.html> », 6 - *Le plâtre*. <https://csd23.blogspot.com/2009/04/6-le-platre.html> (consulté le oct. 17, 2020).
- [5] « https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/documents/schema-platre-industriel_1.pdf ». .
- [6] « Les enduits - GuideBeton.com ». <http://www.guidibeton.com/enduits> (consulté le oct. 17, 2020).
- [7] F. Mermat et A. Kiche, « Etude et caractérisation physique et mécanique de plâtre recyclé », Journal p. 73.
- [8] « Recyclage plâtre : tri, collecte, valorisation des déchets plâtre », *Servipac-Salazie*. <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/platre> (consulté le oct. 17, 2020).
- [9] p Marteau, « Mémento roches et minéraux industriels -gypse et anhydrite (R37722). » .
- [10] Ghomari. F., « Science des matériaux de construction. » Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen.
- [11] « Wikipédia – plaques et carreaux de plâtre – mise à jour Juin.2015. » .
- [12] M. Rachedi, « Contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre. », p. 9.
- [13] Hamida. M. L., « Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction. Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine. » Université Mentouri de Constantine., 2010.
- [14] C.N.E.R.I.B, « recommandation pour la construction en plâtre 'centre national d'étude et de recherche intégré au bâtiment'. » 1993.
- [15] Belidi salah eldinne, « cours des matériaux composites . », Université Amar Thelidji- Laghouat.
- [16] Djoudi A, « cours des matériaux composites. », Université Amar Thelidji- Laghouat.
- [17] AIZI Djamel Eddine, « Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de *Retama monosperma* L.Boiss ». Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017 2016.
- [18] Z. B. Debabi, « effet des traitement chimiques sur les morphologie structurale des fibres végétale utilisées dans un matériau composite », Thèses, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2019.
- [19] « Cellulose », *Wikipédia*. juin 11, 2020, Consulté le: oct. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cellulose&oldid=171922668>.
- [20] « Hémicellulose », *Wikipédia*. juin 11, 2020, Consulté le: oct. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=H%C3%A9micellulose&oldid=171922640>.
- [21] « Lignine », *Wikipédia*. mai 23, 2020, Consulté le: oct. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Lignine&oldid=171197824>.
- [22] Mhissat .S et Mahcar.N, « Etude physico-mécanique d'un mortier de réparation à base des matériaux locaux renforcé par des fibres de sisal », Mémoire de master 2019.
- [23] « Future Fibres: Sisal ». <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/fr/> (consulté le oct. 18, 2020).
- [24] « *Agave sisalana* », *Wikipédia*. août 18, 2019, Consulté le: oct. 18, 2020. [En ligne].

- Disponible sur:
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Agave_sisalana&oldid=161908856.
- [25] « « Agave sisalana », Wikipédia. août 18, 2019, Consulté le: oct. 18, 2020. [En ligne].
Disponible sur:
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Agave_sisalana&oldid=161908856. » .
- [26] « Figure 21.1 Extraction of sisal fiber: (a) sisal plant, (b)... », *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/figure/Extraction-of-sisal-fiber-a-sisal-plant-b-decortication-c-drying-d-raw-fiber_fig1_327883140 (consulté le oct. 18, 2020).
- [27] S. Chafei, « Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin », These de doctorat, Caen, 2014.
- [28] Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Bouziani T., « Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: experimental study and modeling. Journal of adhesion science and technology. », p. 28, 2014.
- [29] Bedrina, M, . « Characterizations mécanique et microstructure des bétons de sables locaux : effets des fillers et la nature des sables sur le comportement mécanique du matériaux . »
- [30] A. M. ALmusawi, T. S. Hussein, et M. A. Shallal, « Effect of Temperature and Sisal Fiber Content on the Properties of Plaster of Paris », *IJET*, vol. 7, n° 4.20, p. 205, nov. 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.20.25927.
- [31] Bahloul.O,bourazem.A, « Utilisations des fibres végétales dans le renforcement des mortiers de ciment (cas d'alfa) SBEIDCO. 1st International conférence on sustainable Built Environnement Infrastructures in Developing Countries. » ENESET Oran, 2009.

Les Normes utilisés

NFP 18-555 : Détermination de la masse volumique absolue et apparente.

NF B 12.401 : Mesure de la finesse de mouture du plâtre.

NFB 12-401 : Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre.

NFB 12 -401 : Détermination de la prise de plâtre.

EN 1097-6 : Masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre de sable.

NFP 18-555 : Compacité et Porosité.

EN 933-1: Détermination du module de finesse de sable.

EN 933-8 : Essai de l'équivalence de sable.

EN933-1 et EN 933-2 : Essai de caractérisation des matériaux –L'analyse granulométriques.

EN 196-1 : Déterminer la contrainte de flexion et compression de mortier

Annexes

Annexe 1

Tableau IV.1: Analyse granulométrique pour sable de dune .

Diamètre des tamis (mm)	Tamisât (%)
0,8	0.04
0,63	0.2
0,5	8.48
0.4	99.24
0.315	91
0.25	74.50
0.2	57
0.16	25.2
0.125	13.40
0.1	8.6
0.08	4.20
0.063	0.2



Figure 1 : série des tamis

Annexe 2

Tableau IV.2: Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E. Laghouat].

Nature du point d'eau		Robinet	
Ca ⁺² en mg/l	104	Balance cations m. éq/l	5.20
Mg ⁺² en mg/l	97		8
Na ⁺ en mg/l	102.3		4.45
K ⁺ en mg/l	646		0.14
Cl ⁻ en mg/l	148	Balance Anions m. éq /l 16.74	4.17
SO ₄ ⁻² en mg/l	520		10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/l	94		/
NO ₃ ⁻ en mg/l	12.4		0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH 7.70	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77	dureté totale 43.25
Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m ³) 0.96 ml/l		T.A.C 7.8°F	S.A.F 75°F
MINERALISATION 1010.60	M.O milieu Acide en O ₂ 8.53	SiO ₂ 4.45 mg/l	Somme des ions 1084 mg/l
Cations	Ca ⁺² = 15%	Mg ⁺² = 23.2%	Na ⁺ + K ⁺ = 13.4%
Anions	HCO ₃ ⁻ = 4.5%	SO ₄ ⁻² = 53.8%	Cl ⁻ + NO ₃ ⁻ = 12.6%

Annexe 3
Procédé de réalisation des éprouvettes



Figure 1: préparation des mélanges.



Figure 2: Remplissages des moules.



Figure 3: les éprouvettes après l'essai de flexion.



Figure 5: les éprouvette après l'essai de flexion.

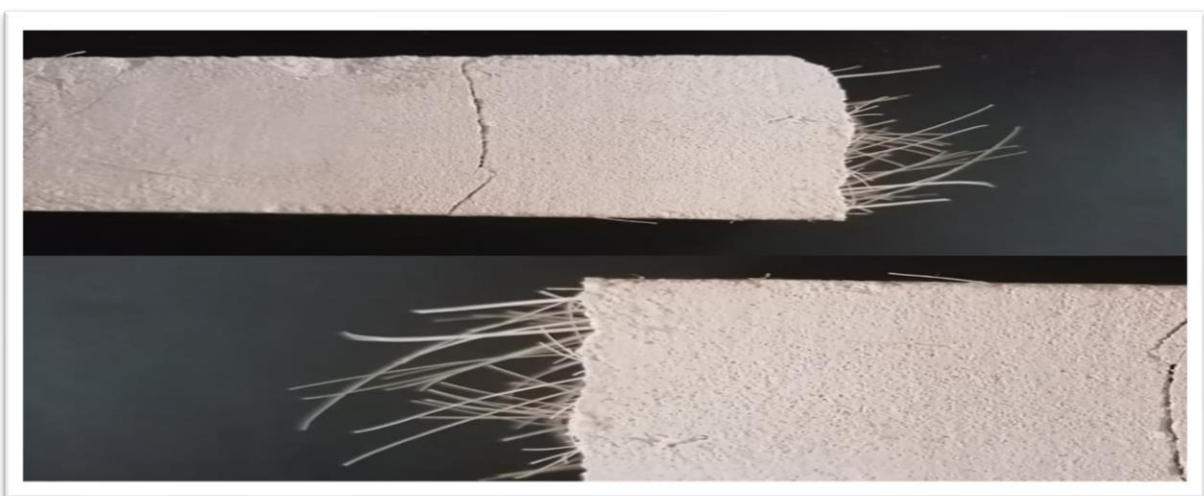


Figure 6: les éprouvette montre la distributions des fibres