



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : D'ARCHITECTURE ET GENIE CIVIL

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : MAIZA AHMED

DOMAINE: Sciences & Technologies

FILIERE: Génie Civil

OPTION: Matériaux en Génie Civil

Thème

Etude de la durabilité d'un composite à base de plâtre et sable de dune renforcé par des fibres de sisal.

Jury de soutenance:

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mohamed Bou Sedra	Pr	Président
Makhloufi Zoubir	Pr	Examineur
Djoudi Amina	MCA	Rapporteur
Bendjillali Khadra	MCA	Co-rapporteur

Promotion : 09 - 2022

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail :

A celle qu'elle a veillée sur moi pendant toujours, ma chère mère,

A mon très cher père,

A toute ma famille, mes frères, mes sœurs,

A tous mes amis

A tous les enseignants du département de Génie Civil.

M.AHMED

Remerciements

Je remercie en premier lieu ALLAH qui m'a donné la santé, le courage et la volonté de poursuivre mes études.

Je remercie mes parents, qui se sont sacrifiés pour mon bien être et ma famille qui m'a encouragé à reprendre les études. Aussi à toutes les personnes qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir m'orienter tout au long de ce travail ; pour leurs conseils et leurs encouragements.

Je tiens à exprimer mon profond respect et ma reconnaissance à mes directrices de mémoire DR. DJoudi Amina et DR. Bendjillali Khadra, qui m'ont encouragé, soutenu et orienté pour la réalisation de ce travail. Mes remerciements vont aussi au Pr. Makhloufi Zoubir et au Pr. Khenfer Mohamed Mouldi, d'avoir accepté d'examiner mon travail et aux enseignants du Département mécanique qu'ils m'ont aidé à réaliser certains essais.

Enfin une pensée amicale à tous mes collègues et mes proches amis pour les moments que nous avons partagés ensemble durant ces années de formation.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE.....	2
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I.....Recherche Bibliographique,Partie (1)

I.1.Introduction.....	4
I.2.Plâtre.....	4
I.2.1. Gypse.....	4
I.2.2.Fabrication du plâtre.....	7
I.2.3.Les propriétés Physique de plâtre.....	10
I.2.4.Les propriétés chimiques.....	11
I.2.5.Les propriétés principales du plâtre.....	13
I.2.6. Types de plâtre et leur utilisation.....	14

CHAPITRE I..... Recherche bibliographique,Partie (2)

I.3.Matériaux Composites.....	18
I.3.1.Constituants d'un matériau composite.....	18
I.3.2.Les renforts.....	19
I.3.3.La matrice.....	21
I.3.4.Classification des composites suivant la nature des constituants.....	21
I.3.5.La microstructure des composites.....	22
I.4.Les fibres naturelles.....	24
I.4.1.Définition.....	24
I.4.2.Types des fibres naturelles.....	24
I.5.Les fibres de Sisal.....	28
I.5.1.Localisation de la plante.....	29
I.5.2.Domaine d'utilisation.....	29
I.5.3.Propriété de fibre de sisal.....	30
I.6.Plâtre / fibre.....	31
a)Plâtre renforcé de fibres de verre.....	31
b)Plâtre renforcé de fibres de sisal.....	31
c)Plâtre renforcé de fibres de bois.....	33
d)Plâtre renforcé des fibres de palmier dattier.....	33

e)Plâtre renforcé de fibres synthétiques	33
I.7.Durabilité des composites renforcé par des fibres végétales.....	34
I.7.1.Bétons de Fibres	34
a.Bétons de Fibres de sisal et coco.....	34
b.Bétons de Fibre de palmier	35
c.Béton de fibre de PSE	35
I.8.Conclusion	37

CHAPITRE II.....Caractérisation des matériaux et méthode expérimentale

II.1.Introduction	40
II.2.Caractéristiques des différents matériaux utilisés	40
II.2.1.Plâtre.....	40
II.2.2.Sable de dune.....	44
II.2.3.Chaux.....	46
II.2.4.Eau de gâchage.....	47
II.2.5.Fibres	47
II.2.6.Formulation et caractérisation des mortier de plâtre	55
II.2.7.Essais mécaniques	57
II.2.8.Observation par microscope optique.....	58
II.3.Conclusion.....	59

CHAPITRE III.....Resultats et Discussions

III.1.Introduction.....	61
III.2.Influence des différents milieux hygrométriques sur les propriétés mécaniques	61
III.2.1.Résistance mécanique des éprouvettes conservées à l'air ambiant du laboratoire	61
III.2.2.Résistance mécanique des éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité	63
III.2.3.Résistance mécanique des éprouvettes soumises à des Cycle de séchage/humidification	65
III.3.Etude des propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans des différents milieux agressives	65
III.3.1.Propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans un milieu acide	66
III.3.2.Propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans un milieu sulfatique.....	66
III.4.Visualisation des surfaces de rupture des échantillons par microscope optique.....	67

III.5.Conclusion	69
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION.....	71
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	73

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Roche de gypse [3].	5
Figure I-2: Différentes roches du gypse naturel [3].	5
Figure I-3: Structure cristalline du gypse [5].	7
Figure I-4: Extraction du gypse à ciel ouvert [6].	7
Figure I-5: Concassage de gypse [6].	8
Figure I-6: Four cuisson du gypse [7].	8
Figure I-7: Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques [10].	11
Figure I-8: Influence du rapport E/P sur la densité [10].	11
Figure I-9: Schéma déshydratation du gypse [13].	12
Figure I-12: Matériau composite [25].	19
Figure I-13: Forme de renfort [25].	19
Figure I-14: Différents types de renforts [25].	20
Figure I-15: Différents types de matrice [25].	21
Figure I-16: Différent types des fibres [25].	21
Figure I-17: Différentes particules.	22
Figure I-18: Les structures géométriques des composites [26].	23
Figure I-19: Dispositions unidirectionnel des fibres [25].	23
Figure I-20: Les types d'armures [25].	24
Figure I-21: Disposition aléatoire des mats [27].	24
Figure I-22: Classification générale des fibres naturelles [29].	25
Figure I-23: Structure de cellulose [30].	25
Figure I-24: Structure chimique des unités composant la lignine [32].	26
Figure I-25: Structure de l'hémicellulose [33].	26
Figure I-26: Fibre de sisal [36].	29
Figure I-27: Plante d agave sisalana [37].	29
Figure I-28: Corde en sisal [38].	30

Figure I-29:Effet des cycles de séchage-mouillage sur la charge de rupture pour les matrices renforcées par les fibres de sisal [41].	34
Figure I-30:Résistance mécanique de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux étudiés [42].	35
Figure I-31:La perte de masse pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux [42].	36
Figure II-1: Sac de plâtre commercialisé.	40
Figure II-2 Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.	41
Figure II-3:Dispositif pour l'essai de la masse volumique absolue.	42
Figure II-4: Sable de dune.	44
Figure II-5: Analyse granulométrique par tamisage du sable NF (933-1).	45
Figure II-6: Fibre de sisal.	47
Figure II-7: Test d'absorption des fibres de sisal.	48
Figure II-8: Taux d'absorption des fibres.	48
Figure II-9: Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique apparente.	49
Figure II-10: Pycnomètre rempli d'eau + Fibre.	50
Figure II-11: Machine universelle de type MTS pilotée par ordinateur.	52
Figure II-12: Dispositif de l'essai de traction de fibre végétale de sisal.	53
Figure II-13: Comportement des fibres de sisal à l'état naturel à la traction directe.	53
Figure II-14:Comportement des fibres de sisal à la traction directe à l'état saturée.	54
Figure II-15: Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs.	56
Figure III-1: Variation de la résistance à la compression dans le temps à l'air de laboratoire.	62
Figure III-2: Variation de la résistance à la flexion dans le temps à l'air de laboratoire.	62
Figure III-3: Variation de la résistance à la compression dans le temps pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité.	64
Figure III-4:Variation de la résistance à la flexion dans le temps pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité.	64
Figure III-5: Matrice de plâtre.	67
Figure III-6: Matrice mortier de plâtre.	67
Figure III-7:matrice de mortier de plâtre soumise au cycle de séchage / humidification.	68
Figure III-8:matrice mortier de plâtre avec fibres conservée continuellement dans l'humidité.	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate [15].	13
Tableau I-2: Propriétés des différentes fibres de renforcement [25].	20
Tableau I-3: Composition chimique de quelques fibres végétales [27].	26
Tableau I-4: Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [10].	27
Tableau I-5: Avantages et inconvénients des fibres végétales [10].	28
Tableau I-6: Propriété de fibre de sisal.	30
Tableau I-7: Propriétés mécaniques des panneaux de plâtre renforcé de fibres de sisal comparées à d'autres matériaux [39].	32
Tableau II-1: Analyse chimique du plâtre.	40
Tableau II-2: Résultats de la finesse de plâtre.	43
Tableau II-3: Finesse de plâtres de construction distinguée par la norme NFB 12-301.	43
Tableau II-4: Propriétés physiques du plâtre.	44
Tableau II-5: Résultats d'analyse granulométrique de sable de dune utilisé.	45
Tableau II-6: Différentes propriétés physiques du sable de dunes.	46
Tableau II-7: Analyse chimique de la chaux.	47
Tableau II-8: Caractéristique générale des fibres végétales de sisal utilisées.	47
Tableau II-9: Propriétés physiques des fibres utilisées.	51
Tableau II-10: Caractéristiques chimiques des fibres de sisal [38].	51
Tableau II-11: Propriétés mécaniques des fibres à l'état naturel.	54
Tableau II-12: Propriétés mécaniques des fibres l'état saturé.	55
Tableau II-13: Comportement mécanique des composites de plâtre.	58
Tableau III-1: Résultats de la variation de la résistance mécanique des éprouvettes soumis à des cycles séchage/humidification.	65
Tableau III-2: Résultats de la variation des propriétés physico- mécaniques des éprouvettes conservées dans le milieu acide.	66
Tableau III-3: Résultats de la variation des propriétés mécaniques et l'aspect superficiel des éprouvettes conservées dans un milieu sulfatique dans la solution de sulfate.	67

LISTE DES SYMBOLES

ρ : Masse volumique

E : Module de Young .

ν : Coefficient de Poisson.

R : Limite élastique en traction.

α : Dilatation thermique.

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

ρ_{abs} : Masse volumique absolue.

f : Finesse de mouture.

$Abs\%$: Coefficient d'absorption.

E_{sv} : Equivalent de sable *visuelle*.

E_{sp} : Equivalent de sable Piston.

MF : Module de finesse.

$W (\%)$: L'absorbation d'eau.

$TH (\%)$: Taux d'humidité.

D : Diamètre de fiber.

$MO\%$: Masse de la matière organique.

$MM\%$: Masse de la matière minérale.

T° : Température.

$H\%$: Humidité relative.

R_f : Resistance mécanique a la flexion.

R_c : Resistance mécanique.

$C.H$: Continuellement dans l'humidité ; AL : Air de laboratoire.

L_f :Longueur de fibre

Introduction Générale

Introduction Générale

Le domaine de la construction fait partie des manifestations les plus importantes de la modernité d'un pays, c'est pourquoi tous les pays cherchent à le développer, en utilisant des produits plus performants pour améliorer la qualité et la durabilité des matériaux de construction. Notre pays l'Algérie, surtout le sud, est riche en matériaux naturels (gypse, les fibre), qui peuvent être utilisés directement dans le domaine de la construction. Parmi ces matériaux, on trouve des sources illimitées de fibres végétales, de palmier, d'Alfa, de Jute, etc., mais leur utilisation dans le domaine de la construction est presque inexistante.

Le plâtre est très connu dans le domaine de construction de bâtiments, mais malgré l'existence d'énormes gisements de gypse comme matière première pour la production du plâtre dans de nombreuses régions du monde, son utilisation reste limiter. En effet, ce matériau est encore utilisé sous sa forme traditionnelle de poudre mélangée à l'eau pour réaliser des revêtements. Son développement ne s'est pas étendu au-delà des éléments préfabriqués tels que les plaques, tuiles, dalles, etc. Donc il faut mieux étudier les propriétés de ces matériaux pour élargir le champ de leur utilisation.

L'utilisation des fibres dans le renforcement des matériaux de construction pour améliorer certaines propriétés, est la technologie la plus utilisée actuellement, en raison de ses résultats bénéfiques et pour élargir l'utilisation des éco-matériaux.

L'objectif de ce travail est de contribuer à l'amélioration de l'utilisation des matériaux locaux tels que, le plâtre, le sable de dune et les fibres de sisal et les intégrer rationnellement dans le champ architectural. L'étude elle-même propose deux objectifs fondamentaux, à savoir :

- L'amélioration de certaines propriétés physiques et mécaniques du composite à base de plâtre et le renforcement par les fibres de sisal de plâtre.
- L'étude de la durabilité en se basant sur des travaux déjà réalisés sur des composites à base de plâtre renforcé par des fibres de sisal.

Ce mémoire est présenté en trois chapitres:

- Le premier chapitre est une recherche bibliographique qui se divise en deux parties, La première partie concerne des généralités sur le plâtre et la deuxième partie s'intéresse aux

matériaux composites, ses essentielles caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques et leurs utilisations dans le domaine de Génie Civil.

- Le deuxième chapitre décrit le protocole du travail réalisé ainsi que les différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des matériaux.
- Le dernier chapitre concerne l'étude de la durabilité d'un composite a base de plâtre renforcé par les fibres de sisal, effet des milieux hygrométriques et effet des milieux chimiques agressives avec leurs résultats obtenus et leurs interprétations.
- Enfin, nous présentons une conclusion générale et des recommandations dans l'étude élaborée.

Chapitre I
Recherche
Bibliographique

I.1. Introduction

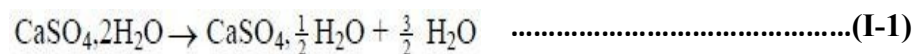
Le plâtre est l'un des matériaux de construction les plus anciens utilisés par l'homme, les premiers signes de son utilisation remontant à environ 9 000 ans sous la forme de fresques de support (fouilles en Anatolie). La basse température requise pour produire la poudre de plâtre et l'abondance de gypse naturel dans la nature expliquent cette époque d'utilisation. Pour Pline, c'est Lysistrate de Sicyone, frère du sculpteur Lysippe qui produisit le premier moulage en plâtre sur nature à partir duquel il réalisa un tirage en cire. Si la tradition des masques funéraires moulés se retrouve aux périodes hellénistique et romaine, ce fut toujours en Égypte que la production de plâtre fut la plus importante (reliefs, médaillons, attaches d'anses, pieds de vase, plats). Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement pour la peinture, soit pour des éléments préfabriqués, dalles ou planches (une couche de gypse entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation intérieure en raison de ses propriétés thermiques et acoustiques et de sa résistance au feu. La conductivité thermique des enduits de plâtre est d'environ 0,26 W.m-1. °C-1, tandis que 1,15 pour le ciment ou 50 pour l'acier [1].

I.2. Plâtre

La pierre de plâtre est un sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- L'anhydrite, ou sulfate de calcium anhydre, assez rare, qui répond à la formule chimique CaSO_4 .
- Le gypse, ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau, di hydraté, très abondant, qui répond à la formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Le mot plâtre désigne à la fois le matériau de structure solide (plâtre pris) et la poudre qui permet de l'obtenir, cette poudre (sulfate de calcium hémi hydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) s'obtient en déshydratant du gypse, selon la réaction [2].



I.2.1. Gypse

Le gypse (**Figure I.1**) est un sulfate de calcium di-hydraté de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 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 :

a) Gypse naturel

Le gypse est une roche sédimentaire déposée en strates plus ou moins horizontales à l'échelle d'un bassin sédimentaire (**Figure I.2**). C'est un sulfate de calcium di-hydraté contrairement à l'anhydrite qui est un sulfate de calcium ne contenant aucune molécule d'eau (il est anhydre). Le gypse est une roche sédimentaire déposée en strates plus ou moins horizontales à l'échelle d'un bassin sédimentaire. C'est un sulfate de calcium di-hydraté contrairement à l'anhydrite qui est un sulfate de calcium ne contenant aucune molécule d'eau (il est anhydre). On obtient du plâtre par déshydratation partielle du gypse.

**Figure I-1: Roche de gypse [3].**

Le gypse et l'anhydrite se forment par évaporation de l'eau de mer sous un climat chaud et sous une faible tranche d'eau, dans des conditions comparables à celles d'un marais salant. Dans la séquence évaporitique, se déposent en premier lieu les carbonates (*aragonite, calcite, dolomite*), puis les sulfates (gypse d'abord puis anhydrite) et enfin les chlorures (Halite NaCl puis Sylvite KCl). Lorsque la concentration en sulfates de calcium dans l'eau de mer est trop élevée pour rester en solution, il y a précipitation de petits cristaux de gypse. C'est l'agglomération de ces petits cristaux lors de l'empilement des autres séquences sédimentaires qui conduira à la formation de la roche gypse. On parlera alors de couches de gypse ou encore de masses. Ces couches de gypse, se trouvent alors enfouies. Elles sont mises à jour soit naturellement par l'érosion, soit par des exploitations à ciel ouvert ou souterraines [3].

**a****b****c**

Rose des sables

Albâtre

Sélénite

Figure I-2: Différentes roches du gypse naturel [3].

b) Gypse de synthèse

Le Gypse de synthèse est le produit essentiel d'une réaction chimique industrielle. Sa production est limitée à cause des impuretés ainsi que pour des raisons techniques et économiques. En effet, pour l'élimination de ces derniers produits au cours de ce type nécessite des traitements chimiques coûteux.

Les principales sources de gypse chimique sont :

- La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) : par attaque du phosphate naturel.

$$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F} + 5 \text{H}_2\text{SO}_4 + 10 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_3\text{PO}_4 + 5 \text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2 + \text{HF} \dots \dots \dots \text{(I-2)}$$
- La fabrication d'autres acides minéraux : (acide borique, brogypse, acide fluorhydrique, fluor Gypse) ou organique, organo-Gypse (acide citrique, tartrique, etc...)

$$\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{HF} + \text{CaSO}_4 \dots \dots \dots \text{(I-3)}$$
- La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) : conduit également à une production de gypse appelé titan gypse.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO_2 (anhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux.

c) Structure cristalline de gypse naturel

Les éléments qui composent la structure du gypse sont les suivants : les ions SO_4 forment un tétraèdre avec le soufre au centre et l'oxygène au sommet ; des atomes de calcium, chacun lié à huit atomes d'oxygène, dont deux sont des molécules d'eau, chaque atome d'oxygène étant lié à deux atomes d'oxygène de différents tétraèdres SO_4 sont reliés à un atome de calcium. Le gypse a une structure empilée de couches parallèles dans laquelle une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium alternent. Chaque couche de sulfate est constituée de chaînes $\text{Ca-SO}_4\text{-Ca-SO}_4$. Chaque molécule d'eau a deux types de liaisons avec la couche de sulfate : d'une part elle se lie à ses propres flocons, et d'autre part elle se lie faiblement aux flocons adjacents. L'existence de cette grande inégalité entre les forces de liaison et en particulier l'existence de la liaison faible, explique la facilité de clivage suivant le plan parallèle aux couches et la forte anisotropie de dilatation [4].

À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium comme il est présenté dans la (Figure I-3) [4]. En effet la structure de gypse présentée montre bien qu'elle avait des molécules d'eau dans sa structure, ce qui conduit par cuisson du gypse à des changements de structure par déshydratation avec l'apparition de plusieurs variétés structurelles et on obtient également le plâtre.

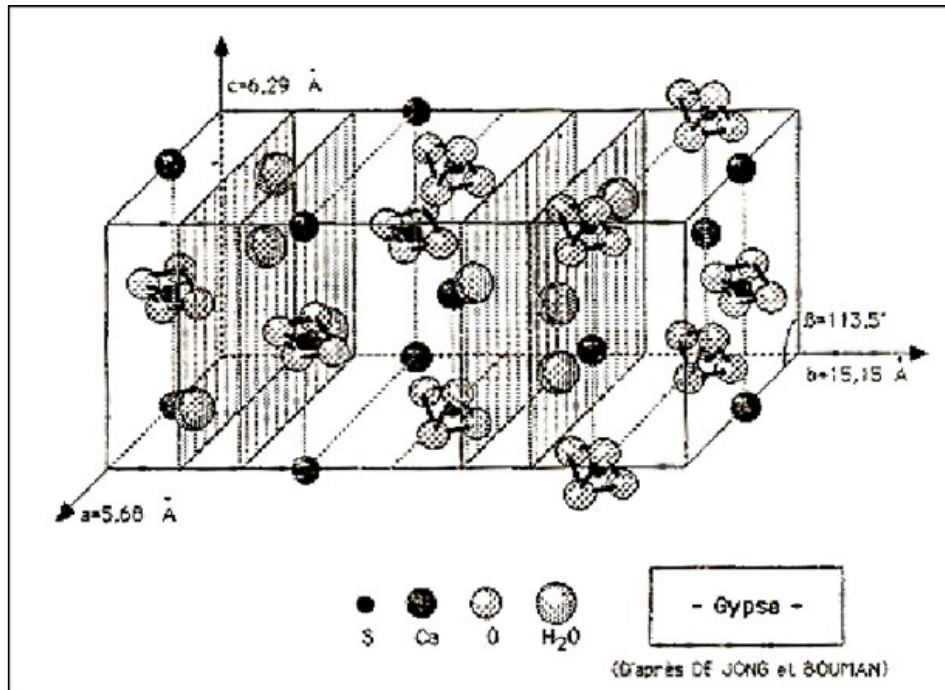


Figure I-3: Structure cristalline du gypse [5].

I.2.2. Fabrication du plâtre

a) L'extraction de la matière première

Le gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert (**Figure I.4**) ou en carrière souterraine. Dans le cas de l'usine COLPA, c'est la carrière de (Manhargypse) qui fournit le gypse, très réputé plâtre provient du pour sa pureté, sa blancheur et sa régularité de teneur en humidité, qualités indispensables à la production des plâtres de spécialité.



Figure I-4: Extraction du gypse à ciel ouvert [6].

b) Le concassage et le calibrage

Le concassage (**Figure I-5**) a pour but de réduire le gypse extrait de la carrière en produits plus fin. Généralement, après un concassage, il ne subsiste plus de blocs dont la dimension est supérieure à 100 mm. Ce gypse devient donc transportable sur des bandes par exemple, et peut être envoyé en usine pour le traitement ultérieur. De très nombreux types de concasseurs existent sur le marché et peuvent traiter jusqu'à (1 200 à 1 300 t/h) [6].

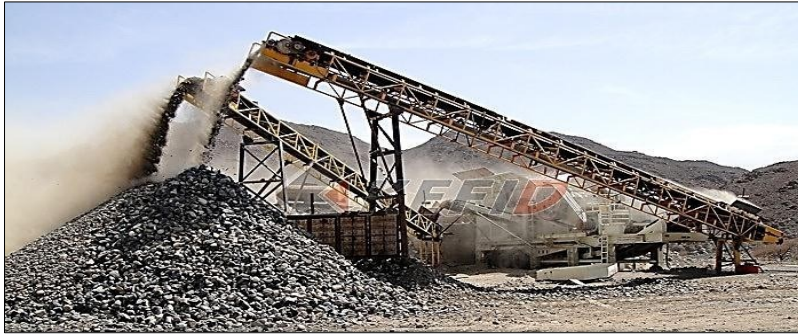


Figure I-5: Concassage de gypse [6].

c) La cuisson

Elle permet d'obtenir, par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre. (**Figure I-6**). La déshydratation du gypse est la base de la fabrication des plâtres. Il est connu que suivant les conditions dans lesquelles s'opèrent cette déshydratation, les caractéristiques des plâtres obtenus seront différentes. La déshydratation des gypses est donc en fonction de la température, de la durée de cuisson, de la nature du gypse, de la granulométrie mais également d'autres paramètres comme la pression de vapeur d'eau.



Figure I-6: Four cuisson du gypse [7].

Selon les conditions de pression et de vapeur d'eau imposées, on distingue deux principes de cuisson :

❖ **La Cuisson par voie sèche β (plâtre Bêta)**

La plus utilisée, car moins coûteuse, est réalisée à la pression atmosphérique ou sous une faible pression partielle de vapeur d'eau. Vers des températures de 140 à 170 °C, l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et donne un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux, c'est l'hemi hydrate β , il nécessite un taux de gâchage $\frac{E}{p} < 0,6$. Il s'agit du composé principal de plâtres courants utilisés en tant que matériau de construction. Par chauffage vers 400 à 600 °C on obtient de l'anhydrite II, (CaSO₄) [8].

❖ **La Cuisson par voie humide α (plâtre Alpha)**

Qui s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau dans des autoclaves sous 2 à 7 bars pendant quelques heures. Le produit obtenu est l'hemi hydrate α , il nécessite un taux de gâchage faible $e/p = 0,4$ et donne des plâtres dits "durs" ayant de très bonnes résistances mécaniques.

d) Le broyage

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

e) Conditionnements et la logistique

L'usine dispose de plusieurs silos repartis sur différents postes de chargement en vrac qui permettent une logistique en flux tendu.

f) Le contrôle et la validation des produits

En amont (à l'extraction) l'état et la pureté du Gypse font l'objet de contrôles périodiques des échantillons de Gypse comme un long processus et contrôlent la qualité du laboratoire par exemple il faut vérifier que la pureté, le temps de prise et la granulométrie de produits, ou encore qu'il soit facile à utiliser. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité plâtres mis en vente [9].

I.2.3. Les propriétés Physique de plâtre

a) Prise:

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact de l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives [10].

- Reprise de l'eau pour reformer le di hydrate ;
- Cristallisation (qui constitue la prise proprement dite) ;
- Durcissement.
- ✓ La réaction de prise : $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O} \dots \dots \dots \text{(I-4)}$
- ✓ La réaction de cuisson : $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O} \dots \dots \dots \text{(I-5)}$

b) Les phases de durcissement

- Dissolution des produits du semi-hydrate de Ca.
- L'hydratation du semi-hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de Ca.
- La cristallisation de l'hydrate [10].

c) Facteur influençant la prise et le durcissement

Les temps de prise et le durcissement sont fonction de la nature du plâtre (présence de semi hydrate) des facteurs suivants :

- Eventement (altération due à l'humidité) : prise autant plus rapide que le plâtre et plus frais.
- Quantité d'eau de gâchage : plus cette quantité et faible plus la prise et rapide.
- Température d'eau : l'eau chaude retarde la prise.

d) Adjuvants

- **Accélérateur de prise** : ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) en faible quantité ; chlorure de sodium ; sulfate de potasse et alumine
- **Retardateur de prise** : phosphore ; gélatine ; colle ; chaux ; produit résultant de la dégradation de protéine animal.

e) Variation de volume

Après le gâchage, le plâtre augmente de volume, puis après plusieurs jours ou plusieurs semaines, on observe un léger retrait par rapport au gonflement initial. Ce retrait par séchage est d'autant plus important que l'atmosphère est plus sèche

f) Densité

La densité dépend à la variation de deux facteurs : la finesse de plâtre et le rapport de E/P

g) Influence de facteur E/P sur les propriétés physiques et mécaniques

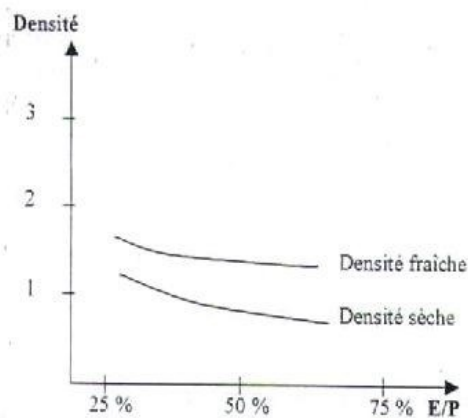


Figure I-8: Influence du rapport E/P sur la densité [10].

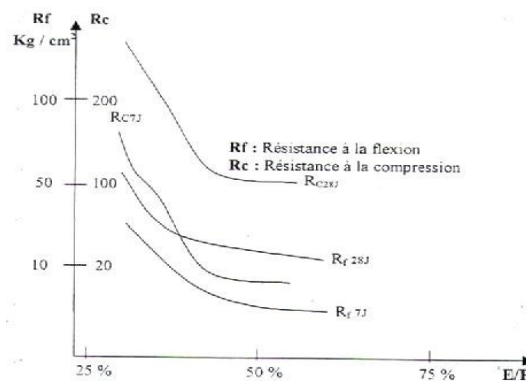


Figure I-7: Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques [10].

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 (Figure I-8). Le matériau devient moins dense d'où une chute sur les résistances mécaniques (Figure I-7). Selon les recommandations de C.N.E.R.I.B pour l'obtention d'une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante, recommandent l'utilisation d'un rapport E/P= 0,6 [11].

I.2.4. Les propriétés chimiques

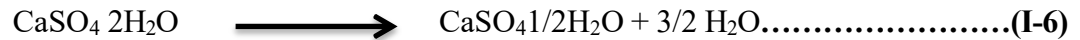
a) anhydrites

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formations gypseuses et salifères, ou dans certains gites métallifères. On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques [4].

b) Definition de semi-hydrates

Les semi-hydrates (ou les demi-hydrates) sont obtenus au début de l'opération de déshydratation du gypse. La teneur en eau varie de 0,15 à 0,66 %.

La température selon la réaction suivante varie entre 50 °C à 160 °C



On trouve deux types des semi-hydrates α et β [12].

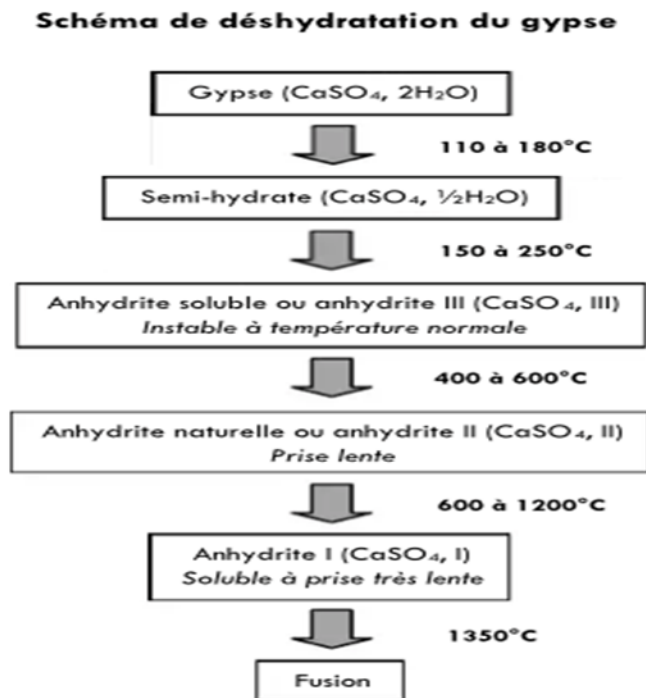


Figure I-9:Schéma déshydratation du gypse [13].

➤ Les semi-hydrates α

Les semi-hydrates α sont compacts et ils ont une forme cristalline. Leurs solubilités dans l'eau est inférieure à celle du composé β . Leurs contacts avec l'eau donnent un mélange fluide. C'est un constituant de très haute qualité, utilisé en particulier, comme plâtre dentaire. Ils possèdent une grande résistance mécanique. Leurs temps de prise est inférieur à celle des semi hydrate β [14].

➤ Les semi-hydrates β

Ils sont floconneux et ils présentent des fissures écailleuses. Leurs solubilités dans l'eau est supérieure à celle des composés α . La combinaison avec de l'eau donne un mélange plus épais. Ils nécessitent une grande quantité d'eau pour le gâchage. Leurs temps de prise est plus long. Ils possèdent

une faible résistance mécanique (10 fois moins que les semi hydrate α). Ils sont considérés comme des constituants essentiels de plâtre préfabriqué [15].

Propriétés	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)	56	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 °C (en g de CaSO ₄ pour 100 cm ³)	0,63	0,74

I.2.5. Les propriétés principales du plâtre

a) Regulation de l'hygrometrie

Par sa porosité, le plâtre absorbe l'humidité ambiante, mais il la restitue lorsque l'atmosphère devient plus sèche [15].

b) Isolation et absorption acoustique

Insonorisation des locaux : par sa masse, par colmatage des fissures du Gros œuvre [16].

c) Isolation thermique

Car le plâtre a une faible conductivité thermique, de 0,4 à 0,6 W.m-1.°C, c'est à dire qu'il transmet mal la chaleur [16].

d) Protection contre l'incendie

Lors d'un incendie, le plâtre absorbe une grande quantité d'énergie calorifique car le phénomène de déshydratation est le même que lors de la cuisson du gypse. La protection est obtenue par des ouvrages entièrement en plâtre associé à de la vermiculite, ou de l'argile expansée etc [16].

e) Adherence aux matériaux

En général très bonne sur tous les matériaux [16].

I.2.6. Types de plâtre et leur utilisation

Les principaux types de plâtre du marché et leurs utilisations les plus courantes, bien que non exhaustives, reposent sur les différentes variétés suivantes :

- Gypse grossier à grosse granulométrie. Le taux de rejet pour un tamis de 800 μ peut être compris entre 5 % et 20 %. Ils peuvent être utilisés seuls ou additionnés de sable ou d'un mélange de sable et de chaux, en principe pour la première couche d'enduit, la finition des murs et des plafonds, le remplissage épais pour l'étanchéité, etc.
- Pour le plâtre fin à peindre, le taux de tamisage du tamis de 800 μ est inférieur à 1 %, et le taux de tamisage du tamis de 200 μ est d'environ 25 %. Il en existe plusieurs types, soit bruts, soit à très haute dureté (T.H.D) ou allégés à la perlite. Ces enduits se détériorent généralement à un rapport E/P proche de l'unité. Ils peuvent être appliqués manuellement ou par pulvérisation mécanique [17].

a. Plâtre de construction

On distingue les plâtres gros ou fins. Ils sont utilisés :

- Pour l'assemblage des briques plâtrières ;
- Pour le lissage des revêtements ;

b. Plâtre à projeter

Destinés à la réalisation de tous les enduits intérieurs à la main ou la machine, il s'agit de plâtres fins et durs. On trouve des plâtres pour enduits spéciaux de très haute dureté (pour locaux très sollicités : cages d'escalier, couloirs).

c. Plâtre à modeler

Particulièrement fins, le plâtre à modeler sert à la réalisation de décors, de réparations de corniche, etc. Il est possible de l'utiliser par exemple, pour refaire l'angle sortant ébréché d'un mur. On se sert aussi de plâtre à modeler dans les activités manuelles, pour le moulage de figurines ou de décors variés.

d. Plâtre à prise retardée

Certains plâtres sont dits “à prise retardée”, l’addition d’un adjuvant permettant d’obtenir un début de prise de l’ordre de 8 à 15 minutes et une fin de prise de 15 à 45 minutes, voire 1 heure. Ces produits peuvent être utilisés pour les réparations délicates qui demandent du temps ou pour des travaux de scellement exigeant un éventuel repositionnement des éléments à fixer pendant une certaine durée. Ils sont pratiques pour l’amateur qui manque d’expérience.

e. Plâtre de surfaçage

Il s’agit d’un plâtre très fin additionné d’adjuvants, que l’on applique en couche très mince après projection d’un plâtre pour enduit, pour corriger les petits défauts de surface avant la finition (**Figure I-11**) [18].

f. Plâtre de Paris

Sûrement le produit le plus utilisé par les professionnels de la construction, car il est très fin et sert aussi bien dans la réparation, la couverture et le moulage décoratif.



Figure I-10 : Enduit de façade [19].



Figure I-11 : Les cloisons en plaques de plâtre [20].

Partie 2

I.3. Matériaux Composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. [21].

Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve aussi les arcs Mongols (2000 ans av. J.C). Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne.

- 1823 : Charles Macintosh crée l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus comme le coton.
- 1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé (le composite utilisé en construction) avec le béton qui forme la matrice et l'acier qui forme le renfort.[22].



Figure I-12: Torchis [23].



Figure I-13: Arc Mongol [24].

I.3.1. Constituants d'un matériau composite

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 (figure I-12) [25].

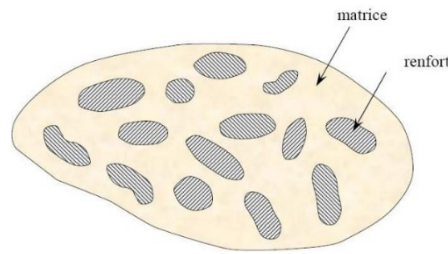


Figure I-10:Matériau composite [25].

I.3.2. Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques) [19].

a) Les formes de renfort



Verranne



Les rovings ou stratifil



La silionne



Les fils coupés



Billes pleines



Les écailles

Figure I-11:Forme de renfort [25].

b) Différents types de renfort

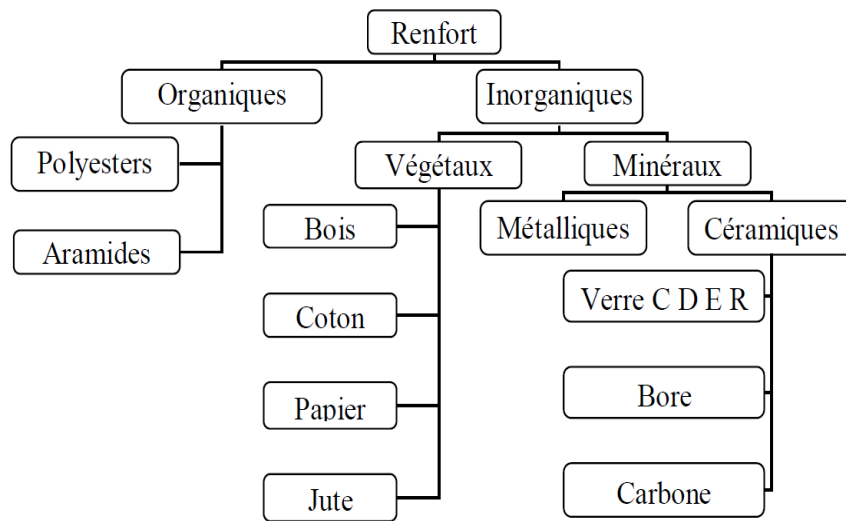


Figure I-12: Différents types de renforts [25].

c) Les fibres les plus courants et leurs propriétés

- Les fibres de verre
- Les fibres de carbone
- Les fibres aramides
- Les fibres céramiques

Le tableau ci-dessous donne quelques propriétés physico- mécaniques de quelques fibres.

Tableau I-2: Propriétés des différentes fibres de renforcement [25].

Type de fibres	Densité	Module en traction GPA	Résistance à la rupture MPA	Allongement %	Coefficient de dilatation 10-6/°C
Fibre de verre	2.54	72	2800	2	7.2
Fibre de carbone HR	1.76	230	3290	1.4	3
Fibre de carbone HM	1.81	399	2450	0.5	- 0.5
Fibre d'aramide	1.44	130	2340	2.8	- 4
Fibre de bore	2.6	414	2900	0.8	4.5
Fibre de polyéthylène	0.97	119	2625	4	10
Fibre de basalte	2.8	89	4800	3.15	8
Fibre de sisal	1.4	15	770	2.2	4
Fibre de lin	1.49	10	800	3	4
Fibre de silicium	3.18	428	3100	0.72	5

I.3.3. La matrice

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

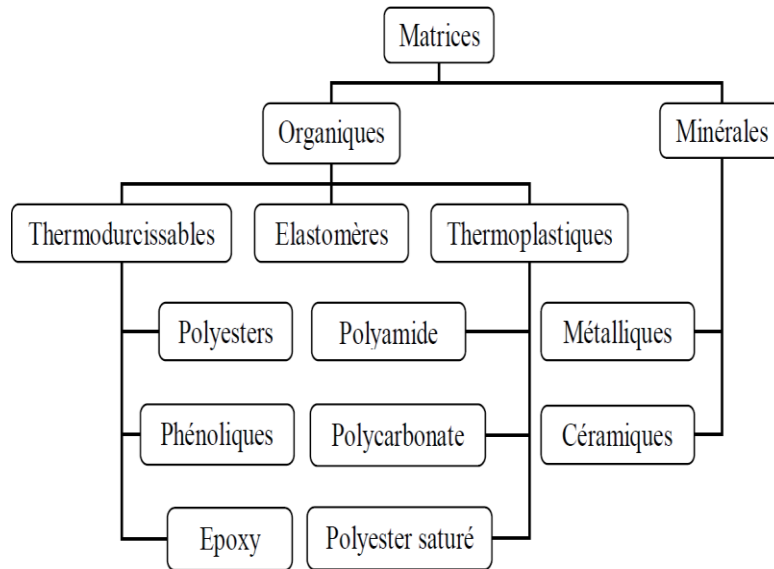


Figure I-13: Différents types de matrice [25].

I.3.4. Classification des composites suivant la nature des constituants

a) Composites à matrice organique (résine, charges) avec :

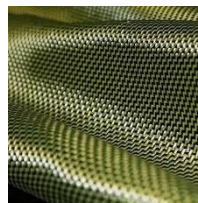
- Fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- Fibres métalliques : bore, aluminium, etc.



Fibre de verre [25].



Fibre de kevlar [25].



Fibre de polyamide [25].



Fibre de bore [25].

Figure I-14: Différent types des fibres [25].

b) Composites à matrice métallique (alliages légers ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane) avec :

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

c) Composites à matrice minérale (céramique) avec :

- Fibres métalliques : bore,
- Particules métalliques : cermets,
- Particules minérales : Carbures, nitrures, etc. (**Figure I-17**).

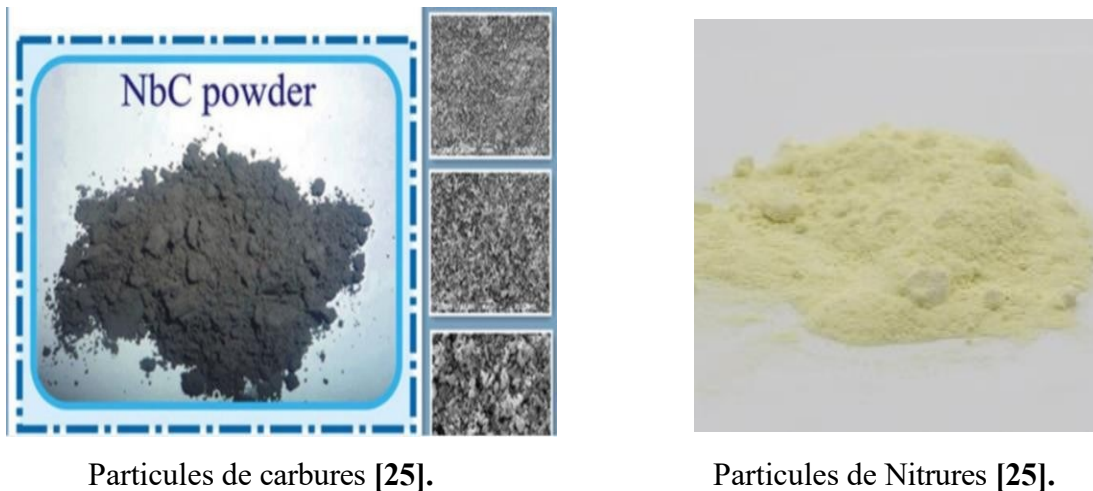


Figure I-15: Différentes particules.

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 [25].

I.3.5. La microstructure des composites

Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites dépendent en partie de l'architecture des renforts c'est à dire de leurs formes géométriques et leurs orientations. Donc il est important d'en tenir en compte pour espérer obtenir un matériau optimum qui satisfera les exigences du cahier de charge.

a) Géométrie des renforts

On peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, **Figure I-18(A)** ;
- Les fibres courtes (longueur faible devant les dimensions de la pièce, **Figure I-18(B)** ;
- Les particules, ou charges renforçantes, **Figure I-18(C)**.

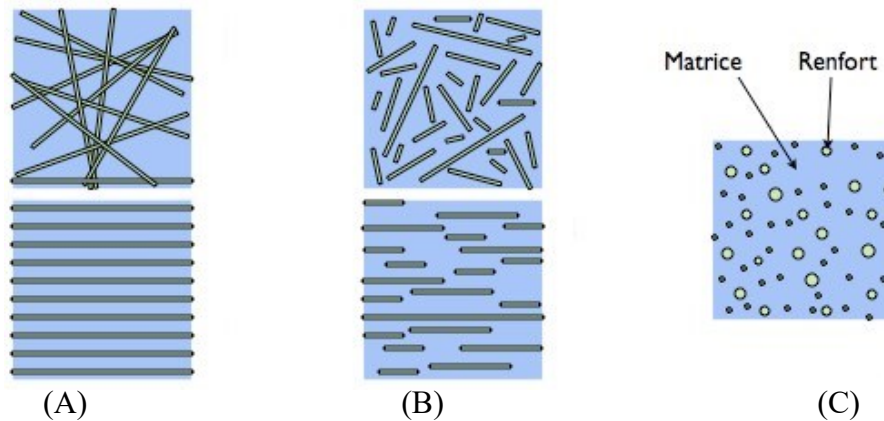


Figure I-16: Les structures géométriques des composites [26].

b) Disposition des renforts

Les fibres peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement. Donc, il existe différentes dispositions d'aménager les fibres dans un matériau composite.

❖ Disposition unidirectionnelle

Le renfort unidirectionnel est un ensemble des fibres disposées parallèlement dans une direction donnée. La figure ci-dessus (**Figure. I- 19**).

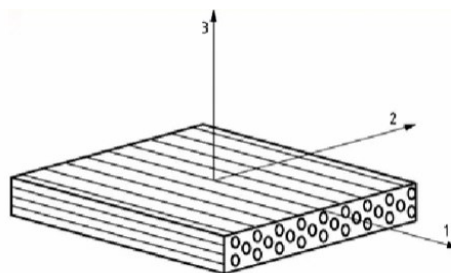


Figure I-17: Dispositions unidirectionnelles des fibres [25].

❖ Disposition bidirectionnelle

Un renfort disposé dans deux directions différentes afin de servir de renfort a un matériau composite(armure).

- Les types d'armures :

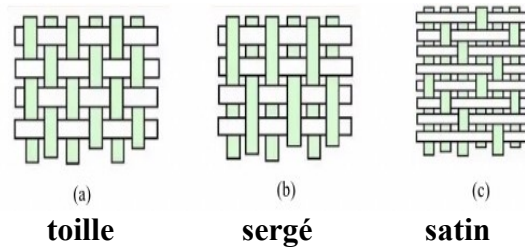


Figure I-18:Les types d'armures [25].

❖ Disposition aléatoire

- On parle ici des mats, (**Figure I-21**).

Les mats sont des nappes de fils continus ou coupés disposées dans un plan suivant une direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant. Les mats sont isotropes a cause de l'absence d'orientation des fibres.

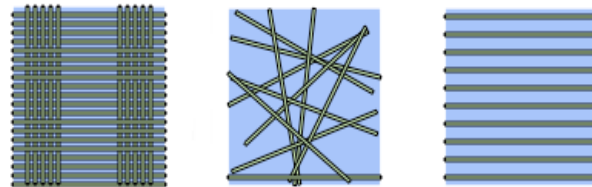


Figure I-19:Disposition aléatoire des mats [27].

I.4. Les fibres naturelles

I.4.1. Définition

Les fibres naturelles définies comme étant des fibres dont les ressources renouvelables, naturellement biodégradables, neutres quant aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère et ne demandant que peu d'énergie pour être produites [28].

I.4.2. Types des fibres naturelles

Les fibres naturelles regroupent plusieurs types des fibres peut être : animal, minérale ou végétale.

a) Les fibres d'origine végétale

Une fibre végétale (**Figure I-22**) est une expansion cellulaire filiforme, principalement composée de celluloses, d'hémicelluloses et de lignines. Elle peut être soit isolée, soit regroupée avec d'autres fibres. Les fibres végétales sont actuellement les plus utilisées pour la fabrication des matériaux [28].

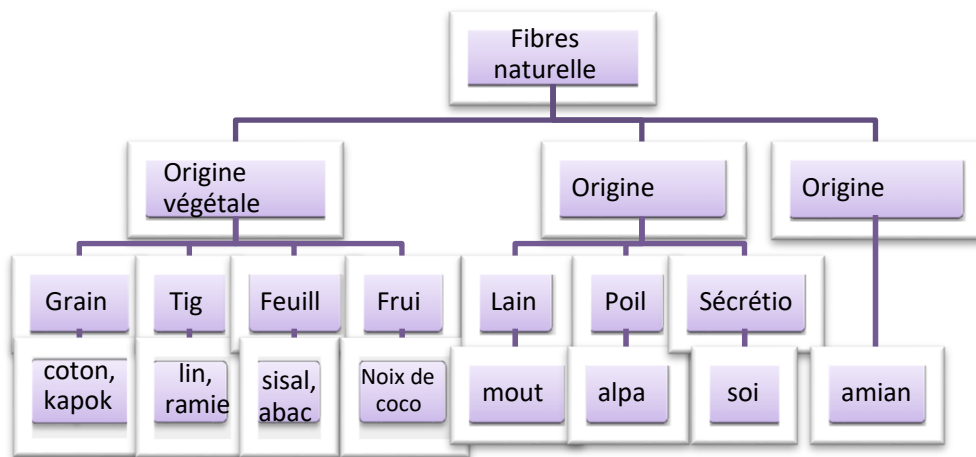


Figure I-20: Classification générale des fibres naturelles [29].

b) Principaux composants de fibres végétales

- Cellulose

La cellulose (**Figure I-23**) est un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de D-glucose (entre 15 et 15 000)6. Ce biopolymère 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 est le constituant chimique qui contribue le plus à la résistance et la stabilité des fibres [30].

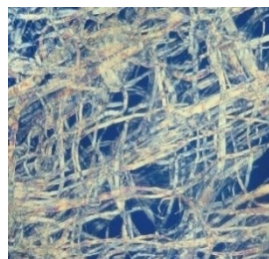
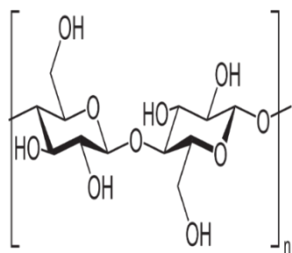


Figure I-21: Structure de cellulose [30].

- Lignine

La lignine (**Figure I-24**) est l'un des principaux constituants du bois, le deuxième en importance après la cellulose et l'hémicellulose (10 à 25 % de la biomasse sèche). Elle est présentée dans la plupart des plantes vasculaires et dans quelques algues. Elle assure la rigidité de la plante et protéger contre l'attaque des organismes pathogènes [31].

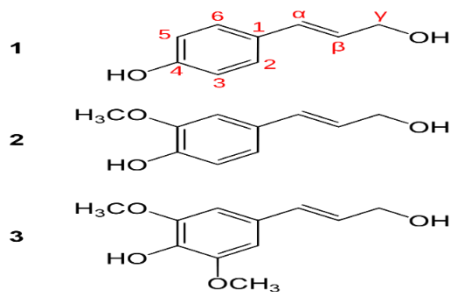


Figure I-22: Structure chimique des unités composant la lignine [32].

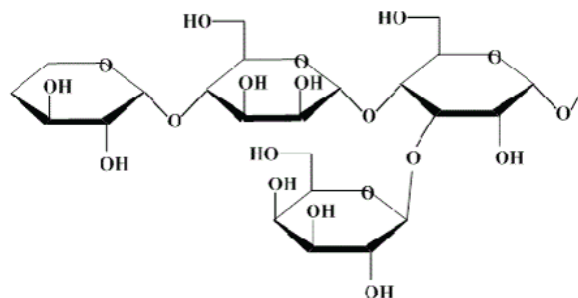


Figure I-23: Structure de l'hémicellulose [33].

- Hémicellulose

Les hémicelluloses (**Figure I-25**) (sont un des trois composants principaux de la biomasse lignocellulosique, représentant ~20-40 % de la biomasse en poids. Elles constituent un groupe de polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur solubilité dans des solutions alcalines (par exemple KOH 1M) et leur insolubilité dans l'eau [34].

Tableau I-3: Composition chimique de quelques fibres végétales [27].

Les fibres	Cellulose %	Lignine %	L'hémicellulose %
Sisal	43-62	7-9	21-24
Bois	38-49	23-30	19-26
Coton	85-96	0.7-1.6	1-3
Riz	28-48	12-16	23-28

c) Propriétés des fibres végétales

❖ Propriétés mécaniques

Chaque type de fibre végétale possède ses propres propriétés mécaniques car ces dernières dépendent de la teneur de chaque constituant de la fibre à savoir la cellulose, la lignine et l'hémicellulose.

❖ **Propriétés physiques**

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et sa teneur en eau et le pourcentage d'absorption d'eau ,et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [10].

Tableau I-4:Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [10].

Propriétés	Type de fibres							
	Lin	Chanvre	Jute	Ramie	Coco	Sisal	Abaca	Coton
Densité	1,4	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,5	1,5
Résistance à la traction (MPa)	800-1500	550-900	400-800	550	220	600-700	980	400
Module d'élasticité E[GPa]	60-80	70	10-30	44	6	38		12
(E/densité) Spécifique	26-46	47	7-21	29	5	29		8
Allongement à la rupture (%)	1,2-1,6	1,6	1,8	2	15-25	2-3		3-10
Absorption D'eau (%)	7	8	12	12-17	10	11		8-25

d) Avantages et inconvénients des fibres végétales

Le tableau ci-dessous (**Tableau I-5**) résume les avantages et les inconvénients des fibres végétales.

Tableau I-5: Avantages et inconvénients des fibres végétales [10].

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

I.5. Les fibres de Sisal

Le sisal est une plante originaire de l'Est du Mexique, de la famille des « Agavaceae », dont le nom botanique est « Agave sisalana » (**Figure I-26, Figure II-27**). Il pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures et s'accommode de la plupart des types de sols sauf ceux des sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies et nécessite peu d'intrants.

Chaque plante peut produire pendant sa vie productive, qui peut atteindre 12 ans, de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude et la pluviométrie. Chaque feuille contient une moyenne d'environ 1000 fibres dont la longueur varie de 60 à 110 cm. Par ailleurs, une fois planté, la

première coupe du sisal a lieu après 2 ou 3 ans, puis à 6 ou 12 mois d'intervalle. 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 [35].



Figure I-24: Fibre de sisal [36].



Figure I-25: Plante d agave sisalana [37].

I.5.1. Localisation de la plante

Le sisal est cultivé pour sa fibre dans plusieurs pays : Afrique du Sud, Angola, Brésil, Chine, Cuba, Haïti, Indonésie, Kenya, Mozambique, Mexique, Tanzanie, Thaïlande et Madagascar. La production mondiale de fibre de sisal en 2007 équivalait à 240 000 tonnes dont le Brésil est le plus grand producteur au monde avec 113 000 tonnes [35].

I.5.2. Domaine d'utilisation

Le sisal produit à partir de ses feuilles est traditionnellement utilisé pour fabriquer de la ficelle, des cordes et des nattes. Cependant, le marché mondial du sisal depuis l'avènement des alternatives synthétiques aux fibres naturelles, les contrats d'autant plus que le polypropylène est utilisé pour fabriquer de la ficelle et corde. Cependant, compte tenu de l'intérêt croissant pour les produits naturels et renouvelables, un nouvel essor du commerce du sisal grâce à la biodégradabilité. Renaissance des usages traditionnels et émergence de nouvelles applications. En fait, les fibres de sisal sont maintenant utilisées comme agents de renforcement (à l'endroit en amiante et en fibre de verre) dans des cordes recouvertes de fil, de pâte à papier spécial et plâtre. Ils sont également utilisés comme isolant ou fibres de tapis décoratifs, revêtements muraux et le macramé. Ces fibres entrent aussi dans la fabrication de filtres et de géotextiles écologiques utilisés en génie civil (Figure I-28).



Figure I-26:Corde en sisal [38].

De plus, en raison de sa faible densité et de ses bonnes propriétés adhésives, le sisal est un potentiel intéressant pour le renforcement des composites polymères (thermoplastiques et thermodurcissables). L'utilisation de matériaux composites contenant du sisal connaît une popularité croissante dans les pièces automobiles (carrosserie, intérieur, etc.) et les meubles. La fibre de sisal peut également être utilisée comme supplément de fibres végétales. En revanche, elle reste le matériau de choix pour les jeux de fléchettes selon des recherches internationales menées sous la direction de la FAO. Les déchets de la production de sisal peuvent également être utilisés comme aliment pour animaux, engrais. Produire également du biogaz comme mutualisation des produits de base, L'ONUDI (L'Organisation des Nations unies pour le développement industriel) et l'industrie tanzanienne du sisal construisent la première usine de traitement des résidus. Le sisal peut être utilisé pour produire du biogaz, de l'électricité et des engrais. Par ailleurs, les déchets issus de l'extraction des fibres sont aujourd'hui transformés pour en extraire du jus de sisal, qui entre dans la composition des produits pharmaceutiques. Le sisal a donc un avenir prometteur car il respecte également l'environnement [35].

I.5.3. Propriété de fibre de sisal

Le tableau ci-dessus donne les propriétés des fibres de sisal :

Tableau I-6:Propriété de fibre de sisal.

Diamètre	0.10-0.13 mm
Resistance a la traction	371±21 GPA
Module d'élasticité	12.43 ± 2.23 GPA
Forme	Droite
Couleurs	Blanche crème
Masse volumique	0.13 g/cm ³

I.6. Plâtre / fibre

Le plâtre est un matériau extrêmement fragile. Sa disponibilité et ses vertus avérées permettent de s'y pencher pour chercher les possibilités de réduire l'effet de ce principal défaut. Il est avéré que renforcement par des fibres apporte une importante réduction de cette fragilité. Des études sont donc menées à travers le monde entier pour le renforcer avec des fibres prises localement.

a) Plâtre renforcé de fibres de verre

ALI et ses co-auteurs ont étudié le renforcement du plâtre par des fibres de verre de type E de longueur 5 mm, de diamètre de 8 à 10 μm regroupés en faisceau de 204 fibres et ensimées de poly acétate de vinyle, de caractéristiques mécaniques $\sigma_R = 2.06$ à 2.75 GPa, $E = 68.9$ à 75.8 GPa.

Les plâtres α et β ont été utilisés comme matrice avec un retardateur : la kératine. Ils procèdent par projection du mélange plâtre fibres de verre dans des moules suivie d'un séchage pendant 72 heures à l'air libre et conservation dans une enceinte à 18°C avec un taux d'humidité relative de 40%. Des essais de flexion 4 points et de traction ont été menés sur des éprouvettes découpées sur des plaques obtenues dans des moules de 1,5 m par 1 m, d'épaisseur variant entre 11 et 13 mm D'après les résultats, la contrainte à la rupture par traction ou par flexion des composites plâtre/fibres de verre est 2,5 à 3 fois supérieure à celle du plâtre non renforcé. Mais cette contrainte, en compression diminue avec le taux de fibres [39].

b) Plâtre renforcé de fibres de sisal

Manjit et ses co-auteurs ont étudié l'utilisation de cloisons sèches renforcées de fibres de sisal pour remplacer les panneaux de bois sur les portes. Les panneaux mesurant 750 x 560 x 12 mm³ ont été fabriqués à partir d'un mélange sandwich de fibres de sisal courtes de 5 cm de long avec un mélange non directionnel de 66 % entre deux couches de plâtre. Les produits non formés sont placés, transformés, dans L'humidité ambiante est contrôlée au-dessus de 90 % pendant 28 jours. Ils ont ensuite été séchés dans un four à 42°C et testés pour l'humidité, la flexion, la traction, l'impact, le gonflement à l'eau et la dureté de surface. Une comparaison avec d'autres matériaux dans le tableau 1.6 montre que. Les panneaux ont montré une bonne résistance après avoir été exposés à l'humidité pendant 28 jours, ils sont restés dans l'eau pendant la même durée sans s'éroder, tandis que le gypse non renforcé l'a fait à partir du 3e jour d'immersion. **Le tableau I-7** montre également que la résistance aux chocs est similaire à celle des panneaux renforcés de fibres de verre, mais toujours meilleure que les panneaux d'autres matériaux. La résistance à la flexion après 28 jours d'exposition est supérieure à celle des panneaux de plâtre, des

panneaux de fibres de plâtre et comparable à celle des panneaux de ciment Collés et d'autres panneaux de particules. Ces résultats montrent également que les panneaux composites sisal-plâtre absorbent moins d'eau et gonflent moins que les panneaux de gypse renforcés d'amiante-ciment et de fibres de verre. Une comparaison de prix révèle enfin que le panneau de plâtre renforcé de fibres de sisal peut être produit à un coût relativement bas [39].

Tableau I-7: Propriétés mécaniques des panneaux de plâtre renforcé de fibres de sisal comparées à d'autres matériaux [39].

Propriété	Pps	ppv	pp	Ppar _t		ca	ppf	ppartcc
Humidité (%)	1,5	1	1	0,8-1		2	1,5	1
Résistance à la flexion <i>N/mm²</i>	3,5	17,30	4-5	14		-	4-6	9-15
1 jour	6,5	-	-	-		-	-	-
3 jours	8	-	-	-		-	-	-
7 jours	10	-	-	-		18-23	-	-
28 jours	16	14-18	8-10	4,5		2	10	-
Résistance au choc <i>Nmm/mm²</i>	0,8	0,68	3	14		-	30	12
28 jours	10	25-30	50	70		-	30	12
Gonflement (24hrs) (%)	0,6	0,5	0,36	-		-	0,6	0,4
Absorption d'eau (24hrs)								
(%)Dureté de surface (mm)								
<p>pps : Panneau de Plâtre renforcé de Sisal; ppv: Panneau de Plâtre renforcé de fibres de Verre</p> <p>pp : Panneau de Plâtre; ppart: Panneau de particules; ca: Ciment d'Asbestos</p> <p>ppf: Panneau de Plâtre fibreux; ppartcc: Panneaux de Particules de Ciment Collées</p>								

c) Plâtre renforcé de fibres de bois

En 2007, Pascal BOUST INGORR a étudié la résistance au visage de plaques de plâtre renforcées de fibres de bois. Il a mélangé la sciure de bois et la poudre semi-hydratée à la main dans de l'eau de mélange, puis a versé l'alliage obtenu dans un moule ; après la prise, le moule a été libéré.

Ses travaux ont montré que le gypse renforcé de fibres de bois répondait différemment à la contrainte de flexion que le gypse non renforcé. La présence de fibres de bois le rend considérablement résistant à la propagation des fissures. Les panneaux de fibres renforcés offrent une meilleure résistance à l'arrachement des vis que les panneaux de fibres non renforcés. Les plaques de plâtre renforcées de fibres de vieux papiers ont une excellente fermeté et incombustibilité. Utilisé comme panneau de construction, ignifuge et isolation étanche à l'humidité.

Magaly aráujo c et al [39]. En 2008, Renforcement du plâtre fabriqué à partir de fibres de cellulose dans un carton d'emballage en ciment.

Des tests de flexion ont été effectués, les faciès de rupture ont été observés à l'imagerie SEM (Scanning Electron Microscopy). Les résultats sont probants : un bon accrochage des fibres à la matrice, une résistance mécanique du composite améliorée sont notés [39].

Plâtre renforcé des fibres de palmier dattier

Pour répondre aux préoccupations environnementales de l'abondance de fibres de palmier dattier algérien et de son incinération, Djoudi et al se sont engagés à utiliser ces fibres pour renforcer le gypse afin de valoriser ces ressources biologiques. Ils sont mélangés à une pâte de plâtre de fibres de palmier dattier E/P=0,6 préalablement trempées dans l'eau et séchées à l'air libre ; une proportion de 6 % de chaux éteinte est ajoutée à l'eau gâchée comme retardateur, et le mélange est rapidement versé dans des moules. Le démoulage a été effectué après 24 heures. Les résultats rapportés révèlent un changement complet du comportement rhéologique du matériau, la résistance à la flexion et la ductilité tout en augmentant son seuil de fissuration [39].

d) Plâtre renforcé de fibres synthétiques

koffi clément kouadio et al [40] . Sont remarqué que l'utilisation des mèches synthétiques provoque une pollution de l'environnement. Cette étude vis à mettre au point un matériau à base de plâtre et des

mèches synthétiques usagées. Ce matériau a été confectionné avec des proportions de mèches variant de 0% à 1.5% en masse selon une méthode définie. Il commence par écoulement du mélange plâtre-mèches dans des moules et soumis à un vibro-compactage. Les échantillons obtenus sont démoulés au bout de 36 heures et séchés jusqu'au 28^e jour. Après séchage, ils ont été soumis à différents essais de caractérisation. Les résultats obtenus montrent que l'ajout des mèches dans le plâtre entraîne une diminution de la densité apparente passant de 0.97 pour un matériau sans mèches à 0.90 lorsque le teneur en mèche est de 1.5% soit un allègement du matériau de 7.21%. Aussi la conductivité thermique passe-t-elle de 0.31 W/m.k à 0.21 W/m.k . La résistance à la flexion 3 points varie de 2.08 MPa à 3.7 MPa ; ce qui correspond à une augmentation de la résistance de 80.77%. L'incorporation des mèches dans le plâtre constitue donc une voie de recyclage des mèches synthétiques.

I.7. Durabilité des composites renforcés par des fibres végétales

I.7.1. Bétons de Fibres

a. Bétons de Fibres de sisal et coco

Plusieurs tests à long terme sur la résistance à la traction et à la flexion de l'acier et du polymère BF ont montré que ces types de béton ont une bonne durabilité dans les environnements secs et humides. Tolède et al [41]. Ont étudié l'effet des cycles d'humidification et de séchage sur la charge de rupture d'une matrice de ciment renforcée de fibres végétales de sisal et de coco. Ils ont constaté que la charge de rupture diminuait avec le temps, notamment la charge de rupture supportée par les fibres après fissuration de la matrice et après un certain nombre de cycles de mouillage et de séchage.

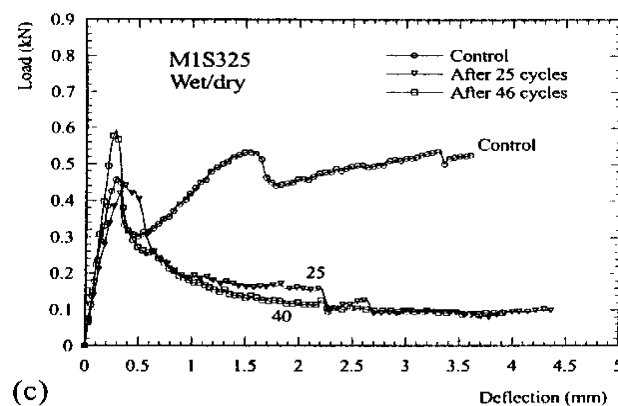


Figure I-27: Effet des cycles de séchage-mouillage sur la charge de rupture pour les matrices renforcées par les fibres de sisal [41].

b. Bétons de fibre de palmier

Les résultats des propriétés mécaniques du béton renforcé de fibres de palmier présentés par **Kriker [10]** ont montré que la résistance à la compression et à la flexion du béton renforcé de fibres stockées dans des environnements chauds et secs pendant une longue période diminuait de manière significative. Par conséquent, ces bétons fibrés ont une faible durabilité pour ce type de cure.

De plus, pour les bétons fibrés conservés dans l'eau, il a montré que si leur résistance à la compression et à la flexion changeait positivement avec l'âge au moment de la première fissuration, leur résistance à la flexion augmentait après la première fissuration. **Kriker [10]** a constaté que la durabilité du béton de fibres de palmier conservé dans un agent de cure diminuait. La chaleur sèche est le ralentissement du processus d'hydratation dû à l'évaporation rapide de l'humidité et à la croissance de microfissures qui augmentent le volume global des vides dans le béton à long terme et provoquent une chute d'adhérence fibres-matrice et par la suite une chute de résistance. Il est donc nécessaire de trouver une solution pratique pour maintenir l'humidité dans le béton surtout durant les premiers jours de conservation. Par ailleurs, la chute de durabilité des bétons de fibres conservés dans l'eau est dû à la chute de durabilité des fibres de palmier dans le milieu cimentaire alcalin. Cette dernière propriété sera mise en évidence dans ce qui suit [10].

c. Béton de fibre de PSE :

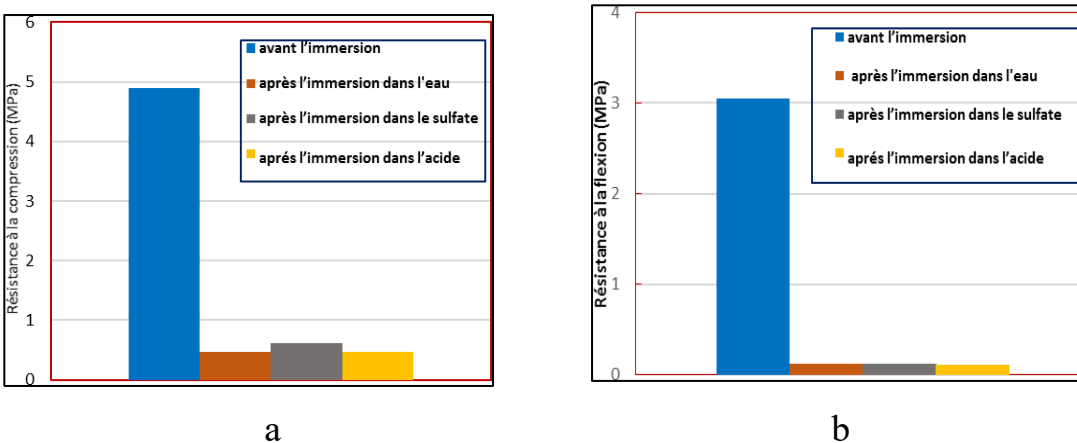


Figure I-28: Résistance mécanique de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux étudiés [42].

Laoubi [42] montre d'après ces essais sur propriétés mécaniques, après l'immersion d'échantillons à base de plâtre dans les solutions (acide de sulfate, sulfate de magnésium et l'eau pure).

- La résistance à la compression du mortier de plâtre à base de polystyrène a été réduite d'environ 90% lorsque l'échantillon a été immergé dans l'eau pure.
- Lorsque l'échantillon était immergé dans des solutions (acide de sulfate et sulfate de magnésium). Il trouve que il y a une diminution de 67%.

Donc **Laoubi [42]** trouve que l'eau seule a une grande influence sur les matériaux par rapport à une solution acide, ce qui confirme que la présence d'acide dans l'eau améliore la résistance à la compression des composites de plâtre à base de PSE **Figure II-32(a)**, c'est-à-dire, l'acide diminue l'effet négatif de l'eau sur le matériau de plâtre. Alors que la présence de sulfate de magnésium dans l'eau n'a pas d'effet supplémentaire sur le matériau de plâtre par rapport à l'eau seule.

D'autre part ;

- La résistance à la flexion du mortier de plâtre à base de polystyrène a été réduite d'environ 96% lorsque l'échantillon immergé dans l'eau pure.
- Par rapport à l'eau, le sulfate de magnésium et les solutions acides n'ont aucun effet supplémentaire sur le plâtre **Figure I-32 (b)**.

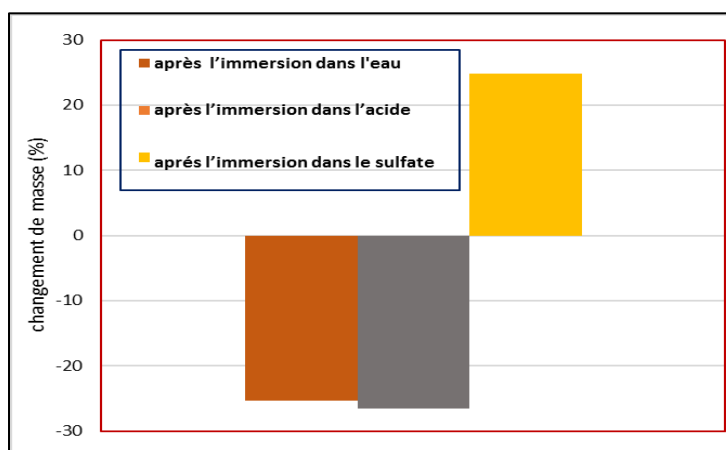


Figure I-29: La perte de masse pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux [42].

Les résultats de la perte de la masse pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux présentés par le chercheur :

Laoubi [42] ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre la conservation dans l'eau et dans la solution acide. En fait, juste une différence d'environ 1% qui peut être expliquée par l'érosion superficielle du plâtre observée après immersion dans une solution acide. Alors, que les plâtres de gypse ne sont pas affectés par la présence de sulfate de magnésium dans l'eau. Généralement, a un effet négatif dans le cas d'un enduit à base de ciment ou de chaux (c'est-à-dire alcalin). Parmi ses effets, la cristallisation du sulfate de magnésium, dans les plâtres de gypse, se produit à la surface du plâtre et apparaît comme une efflorescence et provoque, par conséquent, un gain masse [42].

Djoudi et al. Ont étudié l'effet de la fibre de palmier dattier sur les propriétés thermiques du gypse (béton plâtre) ; ils ont ajouté du DPF aux dosages de 1 %, 1,5 % et 2 % en volume en utilisant différentes longueurs de fibres de 2 cm, 3 cm et 4 cm. La conductivité thermique augmentait avec l'augmentation de la longueur des fibres et diminuait avec l'augmentation du volume des fibres en raison de l'augmentation de la teneur en vides dans la matrice de ciment. Le meilleur matériau de béton isolant a été obtenu en utilisant 2 % de DPF avec une longueur de 2 cm avec une réduction de la conductivité thermique d'environ 40 %. De plus, la capacité thermique spécifique a augmenté tandis que la diffusivité thermique du béton a diminué avec l'augmentation de la teneur en fibres et la diminution de la longueur des fibres, ce qui a été attribué au comportement structurel alvéolaire de la fibre de palmier dattier qui était opposé au flux de chaleur. Enfin, ils ont rapporté sur la base d'une évaluation microstructurale qu'une bonne liaison existait entre les cristaux de gypse hydraté, les couches de calcite et les cellules fibre de palmier dattier [43].

I.8. Conclusion

Le domaine de la valorisation des ressources naturels est vaste, et la valorisation de ces ressources dans le domaine de la construction a suscité de nombreux intérêts de recherche. Ces dernières années, des recherches ont été menées pour valoriser les fibres végétales dans les composites avec différentes matrices afin d'améliorer leurs performances (leur comportement mécanique en flexion) et leur durabilité. Cet ajout peut être influé sur :

- La distribution uniforme et l'orientation adéquate des fibres dans la matrice de composite, donne des résultats mieux que lui sans fibre .
- Il y a certaines précautions à prendre quant à la mise en œuvre de ce matériau, puisque les fibres modifient la maniabilité.
- Les propriétés mécaniques des matériaux composites à charges végétales sont très sensibles à différents Paramètres notamment : la nature et la quantité des constituants,leur morphologie, le taux de fibres, ainsi que leur orientation et leur état de dispersion dans la matrice, en plus de l'humidité et de la température.

Chapitre II

**Caractérisation des
matériaux et
méthodes
expérimentales**

II.1. Introduction

Dans le cadre du développement durable et afin de protéger notre environnement, on a utilisé des matériaux locaux produits tels que : le plâtre qui ne produit que de l'eau lors de fabrication, la chaux aérienne comme retardateur de prise à la place d'un adjuvant industriel et le sable de dune qui occupe plus de 60% de la superficie de l'Algérie et en fin les fibres de sisal disponible sur le marché avec faible cout.

L'objectif principal de ce chapitre est de faire une caractérisation générale des matériaux utilisés.

II.2. Caractéristiques des différents matériaux utilisés

II.2.1. Plâtre

Le plâtre utilisé dans cette étude, provenant de l'usine SPA **Oasis Ghardaïa** et disponible sur le marché (**Figure II-1**).



Figure II-1: Sac de plâtre commercialisé.

a) Composition minéralogique du plâtre

D'après la fiche technique de l'usine, la composition chimique de ce plâtre est présentée dans le **tableau II-1** :

Tableau II-1: Analyse chimique du plâtre.									
Constituants	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	KO	CL
Teneur en (%)	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,03	0,002

Le **tableau II-1** montre que les espèces les plus prépondérantes sont le CaO et SO₂, ce qui affirme que le constituant le plus essentiel est le CaSO₄. L'analyse minéralogique montre que la teneur en CaSO₄.2H₂O du plâtre utilisé est d'environ 96 %, donc il est de classe I d'après la recommandation de C.N.E.R.I.B[42].

b) Masse volumique (NFP 18-555)

❖ Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée ρ_{app} et exprimée en (g/cm³ ; kg/m³ ; t/m³).

La masse volumique donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_1 - M_0)/V \dots \dots \dots (II-1)$$

- **M₁** = masse totale.
- **M₀** = masse de récipient vide.
- **V** = volume apparent.



Figure II-2 Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.

❖ Masse volumique absolue (NFP 18-555)

➤ Equipements nécessaires

Pour réaliser cet essai on a besoin de :

- Une balance avec précision.
- Papier filtres.
- Un densimètre de Chatelier minimale de 50 cm³.
- Quantité de plâtre, un liquide non réactif (Ethanol) ;



Figure II-3:Dispositif pour l'essai de la masse volumique absolue.

La formule de la masse volumique est :

$$\rho_{abs} = (M_{dem} - M_{de}) / (V_2 - V_1) \dots \dots \dots (II-2)$$

- 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.

c) Taux de gâchage (NFB 12-401)

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

❖ 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 **E/P** pour le gâchage à saturation est égal à **0.6**. Cette valeur donne une meilleure maniabilité, ce qui est en accord avec les travaux de Djoudi [43] et recommandé par **CNERIB [10]**.

d) Finesse de mouture (NF B 12.401)

❖ Mode opératoire

- Etuve de séchage.
- On sèche 150 g de plâtre pendant 1 heure à une température 105 degrés °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 ,1 g.

✓ On calcule la finesse de mouture du plâtre de construction par la formule suivante :

$$f = \frac{M_1}{M_2} \% \dots\dots\dots (II-3)$$

- **M₁**: Masse de refus du plâtre sur le tamis g.

- **M₂** : Masse d'échantillon, 50g.

✓ D'après les résultats obtenus dans le **tableau II-2** et en utilisant le **tableau II-3**, le plâtre utilisé est gros de construction et cela d'après sa finesse de mouture trouvée :

✓ Tamis 0.8→5 < r = 7.1 < 20

✓ Tamis 0.4→20 ≤ 33 < 40

Tableau II-2:Résultats de la finesse de plâtre.

Tamis		Refus r (en %) de la masse initiale		
Ouverture (mm)	Module	Essai 1	Essai 2	Moyenne
0.8	30	8.80	5.40	7.10
0.4	27	28.10	37.8	33
0.2	24	11.20	16.00	13.6

Tableau II-3:Finesse de plâtres de construction distinguée par la norme NFB 12-301.

Tamis		Refus r (en %) de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	PGC	PFC
0.8	30	5 ≤ r ≤ 20	r ≤ 2
0.4	27	20 ≤ r ≤ 40	r ≤ 15
0.2	24		r ≤ 35

Les résultats des propriétés physiques du plâtre sont regroupés dans le **tableau II-4**.

Tableau II-4: Propriétés physiques du plâtre.	
Masse volumique apparente	892 kg/m ³
Masse volumique absolue	2512 kg/m ³
Mouture de finesse	Gros construction
Porosité	35 %
Temps de prise	6.5 min

II.2.2.Sable de dune

Le sable de dune est le résultat de l'érosion et du dépôt de différentes roches, transporté des rivières et parfois du vent. La plupart des formations de sable sont composées de quartz. Il se caractérise par un grain fin et très dense. Dans notre étude, nous avons utilisé le sable de dunes de la ville de Laghouat (**figure II-4**).



Figure II-4: Sable de dune.

a) Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption (*Abs*) est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h à 20°C, définie par l'équation suivante :

$$Abs (\%) = ((M_h - M_s) / M_s) * 100 \dots \dots \dots (II-4)$$

M_h : Masse d'échantillon après le séchage par l'étuve a 105°C (g).

M_s : Masse d'échantillon imbibé (g).

D'après les résultats obtenus, le coefficient d'absorption d'eau du sable de dune utilisé est 1.68 %, donc le sable a une moindre capacité d'absorption.

b) Analyse granulométrique

L'analyse s'effectue par tamisage avec un jeu normalisé de tamis, selon la norme EN 933-1. On superpose les tamis par dimensions croissantes. Après tamisage, on mesure les refus de chaque tamis ainsi que le tamisât ayant passé à travers le tamis le plus fin. Les résultats obtenus sont résumés sur le **tableau II-5** et la **figure II-5**.

Tableau II-5: Résultats d'analyse granulométrique de sable de dune utilisé.

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.63	16,91	16,9	3,4	96,6
0.315	147,06	164	32,8	67,2
0.16	202,31	366.3	73,3	26,7
0.08	108,39	474.7	95	5,06
Fond de tamis	24,33	499	99,8	0,2

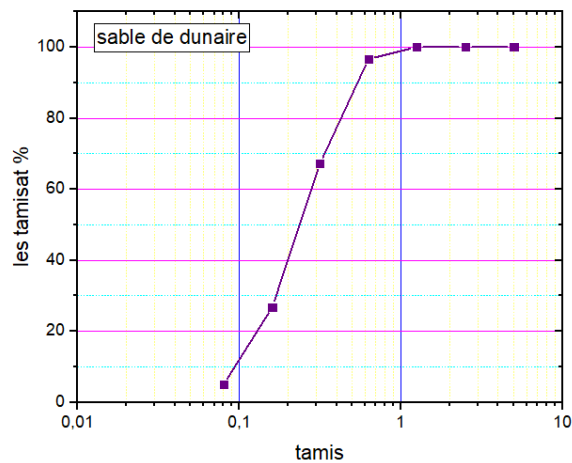


Figure II-5: Analyse granulométrique par tamisage du sable NF (933-1).

D'après les résultats obtenus, notre sable est très fin (presque 27 % de grains inférieurs à 0.16 mm) et à granulométrie continue. Les résultats des différentes propriétés physiques du sable de dunes utilisé sont regroupés dans le **tableau II-6**.

Tableau II-6: Différentes propriétés physiques du sable de dunes.			
Propriété	Valeurs	Norme	Commentaires
Masse volumique apparente	1566 kg/m ³	NFP 18-555	Sable courant
Masse volumique absolue	2501 kg/m ³	NFP 18-555	Sable courant
Module de finesse	2.04	NF P18 304	Le sable utilisé est entre le fuseau du sable fin [1.7- 2.8], donc c'est un sable fin
Coefficient d'absorption	1.68 %	CNERIB [42].	Le sable a une moindre capacité d'absorption
Porosité	38 %	NFP 18-555	
Equivalent de sable visuel, à piston	$E_{sv} = 79$; $E_{sp} = 80$	NF P 18-598	Le sable utilisé est propre et acceptable pour la composition des mortiers de plâtre.

II.2.3. Chaux

La chaux aérienne utilisée comme retardateur de prise du plâtre, en réduisant sa solubilité et en augmentant son temps de travail, provient de l'usine de Berrayen, wilaya de Ghardaïa. La chaux de nomination chimique oxyde de calcium et magnésium est de forme chimique CaO.MgO n'affecte pas les propriétés mécaniques du plâtre [43]. Les espèces les plus prépondérantes sont le CaO et MgO ce qui affirme que le constituant le plus essentiel est la calcite.

Tableau II-7: Analyse chimique de la chaux.

Constituant	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Pourcentage	56%	24%	0.4%	0.08%	0.04%

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau potable de la wilaya de Laghouat ; possédant un PH d'environ 7.5. Le rôle de l'eau dans les mélanges est :

- L'hydratation de plâtre.
- Le mouillage des granulats (sable) et des fibres.
- Le malaxage et la mise en œuvre (améliore la maniabilité du mortier).

II.2.5. Fibres

Les fibres utilisées sont des fibres végétales de sisal disponibles sur le marché. Elles sont découpées en une longueur de 30 mm. Dans le tableau ci-dessous, quelques caractéristiques générales sont données.

Tableau II-8: Caractéristique générale des fibres végétales de sisal utilisées.

Nom	Origine	Diamètre (mm)	Couleur	Provenance
Sisal	Mexique	1-1.13	Jaunâtre	Marché

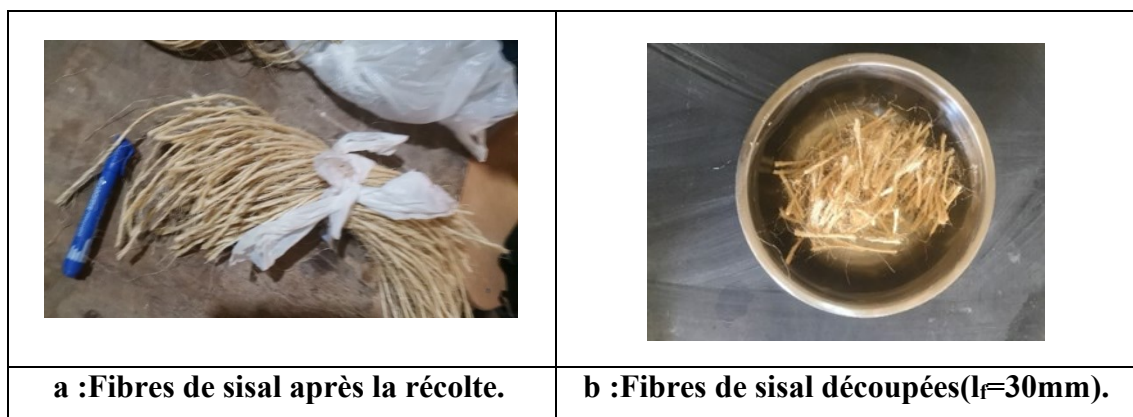


Figure II-6: Fibre de sisal.

1. Propriétés physiques des fibres

a) Absorption d'eau des fibres

Des mesures ont été effectuées sur des échantillons de fibres de sisal. Les essais d'absorption d'eau ont été déterminés en immergeant une quantité de sisal préalablement pesée $M(0) = 5g$. Le test est effectué jusqu'à ce que la masse absorbée soit stable. (Figure II-7) Le taux d'absorption (W%) est déterminé par la relation :

$$W (\%) = \frac{M(t) - M(0)}{M(0)} * 100 \dots \dots \dots (II-5)$$

M (t) : : Masse des fibres après immersion dans un temps (g).

M (0) : Masse sèche (g).

Les résultats des pourcentages relatifs des absorptions des fibres de sisal sont reportés sur la figure (Figure II-8) :

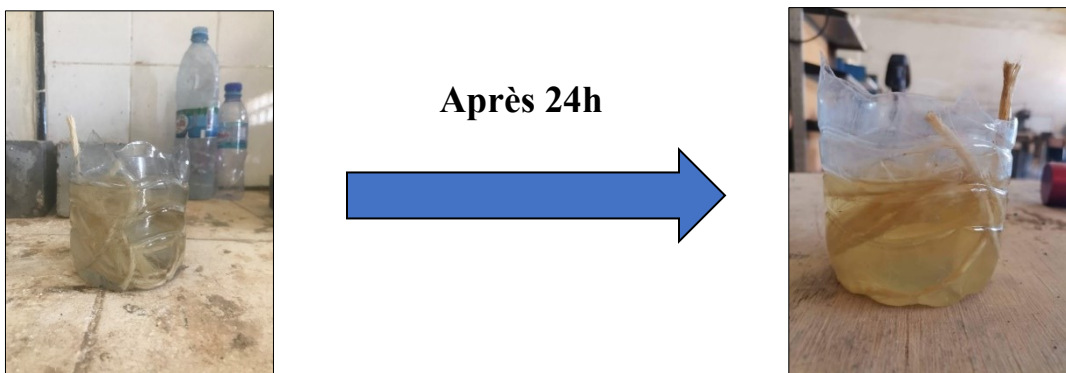


Figure II-7: Test d'absorption des fibres de sisal.

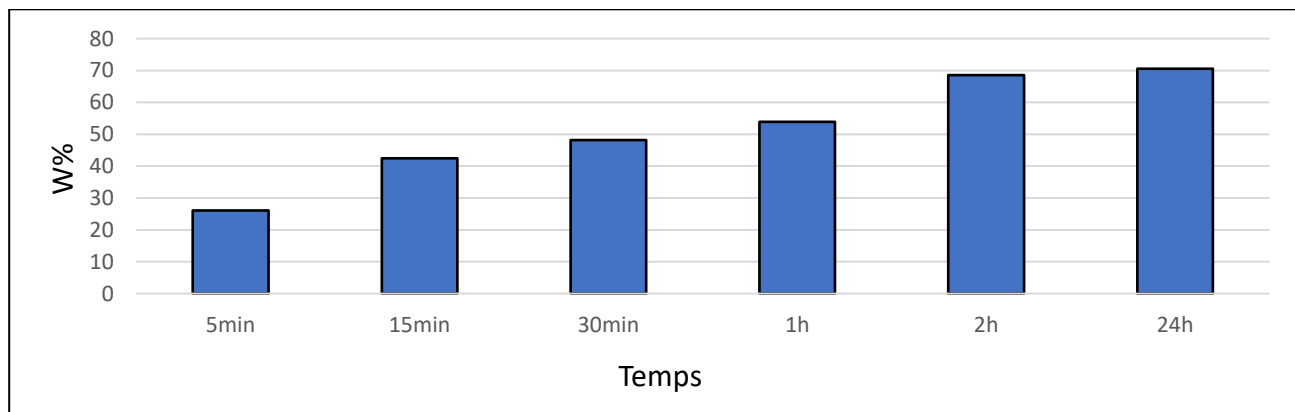


Figure II-8: Taux d'absorption des fibres.

D'après la **figure II-8** on remarque que l'absorption d'eau des fibres de sisal croît dans le temps et elle se stabilise après deux heures.

b) Masses volumiques des fibres

❖ Masse volumique apparente

$$\rho_{app} = (M_1 - M_0)/V \dots\dots\dots(II-6)$$

- M_1 = masse totale(g).
 - M_0 = masse de récipient vide(g).

 - V = volume apparent(m^3) .
- ✓ Masse volumique apparente : $\rho_{app} = 69 \text{ kg/m}^3$



Figure II-9: Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique apparente.

❖ Masse volumique absolue NFT 51 063

➤ Mode opératoire

- Poser le pycnomètre sur la balance, faire le zéro.
- Remplir le pycnomètre de liquide jusqu'au repère.
- Peser le volume de liquide (m_0).
- Vider le pycnomètre.
- Introduire le lot de matière à tester dans le pycnomètre.
- Peser le lot (m_1).
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec le liquide.
- Peser l'ensemble eau + matière.



Figure II-10: Pycnomètre rempli d'eau + Fibre.

On utilise la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{M_4 - M_2 - M_1 - M_3} \dots\dots\dots (II-7)$$

- M_1 : masse de pycnomètre(g).
- M_2 : masse de (pycnomètre + fibre) (g).
- M_3 : masse de (eau+ pycnomètre+ fibre) (g).
- M_4 : masse de (pycnomètre+ eau) (g).
- ✓ Masse volumique absolue : 1,18 g /cm³

c) Taux d'humidité des fibres

La teneur en humidité des fibres végétales est une propriété importante à prendre en compte, car elle peut altérer les propriétés des fibres et perturber le processus de moulage. Par conséquent, la teneur en humidité des fibres de sisal est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$TH (\%) = (M_H - M_S / M_S) * 100 \dots\dots\dots (II-8)$$

M_H : Poids de fibres à l'état naturel (g).

M_S : Poids de fibres à l'état sec (après séchage dans une étuve à 40°C pendant 24h jusqu'à la stabilisation du poids) (g).

- ✓ Taux d'humidité : TH= 1 %

Ce résultat montre que la fibre utilisée est très sèche à cause de plusieurs choses :

- La condition de stockage

- De plus, en raison de la période au cours de laquelle le sisal a été récolté, cela indique l'âge du produit et le produit considéré comme importé.

Les propriétés physiques des fibres de sisal sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Masse volumique apparente	69 kg/m ³
Masse volumique absolue	1.18 kg/cm ³
Taux d'humidité	1 %
Taux d'absorption (après 24 H)	61.53 %
Diamètre (mm)	1.1 – 1.13 mm

2. Propriétés chimiques des fibres

Le tableau ci-dessous montre le pourcentage de composition chimique de fibre de sisal :

Tableau II-10: Caractéristiques chimiques des fibres de sisal [38].

Cellulose (%)	Hemicellulose %	Lignin %	Pectine %	Pentosanes%
49 à 78,8	10 à 24	8 à 11	2	24

D'après le **tableau II-10**, les principaux constituants de fibre de sisal sont, le cellulose 50% et hémicellulose 20%, Aussi lignin et pentosane avec faible pourcentage de pectine 2%.

a) Mesure de la teneur en cendre des fibres

La teneur en cendre des fibres végétales est le pourcentage des matières minérales contenues dans le matériau. La mesure de la teneur en cendre se fait par calcination des fibres dans un four à 400°C pendant 1 heure. Après la calcination, les fibres sont refroidies jusqu'à température ambiante. Le résidu est pesé pour déterminer la variation du poids des fibres. Le taux de cendre est calculé d'après la formule suivante :

$$MO\% = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 = 75\% \dots \dots \dots (II-9)$$

$$MM\% = M_0\% - MO\% = 25\% \dots \dots \dots (II-10)$$

M_0 : Masse de la matière organique.

M_0 : Masse de l'échantillon avant la calcination(g).

MM : Masse de la matière minérale.

M_1 : Masse de l'échantillon après la calcination(g).

La calcination des fibres végétales montre que la composition principale de ce type de fibre et la matière organique (75%) avec un petit pourcentage du matière minérale (25%). Cela confirme le pourcentage de cellulose et d hémicellulose dans les fibres végétales indique dans le tableau ci-dessus.

3. Propriétés mécaniques des fibres

Les essais de traction ont été effectués sur une machine universelle de type **MTS** qui est pilotée par ordinateur (**Figure II-11, II-12**). Les fibres subissent un étirement sous une vitesse constante (2 mm/min). Le dépouillement des résultats, nous permet d'obtenir le module d'Young, la contrainte à rupture et l'allongement à la rupture.

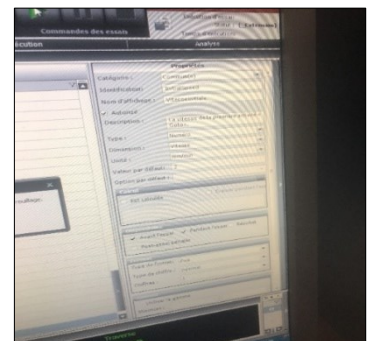
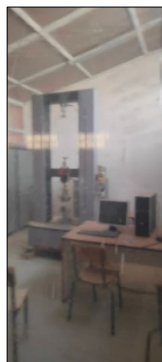


Figure II-11: Machine universelle de type MTS pilotée par ordinateur.

Fibre de sisal

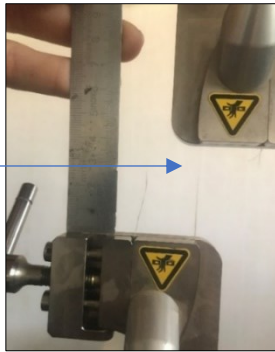


Figure II-12: Dispositif de l'essai de traction de fibre végétale de sisal.

Les courbes de traction de différents longueurs de fibre sont illustrées sur les figures et le tableau ci-dessous :

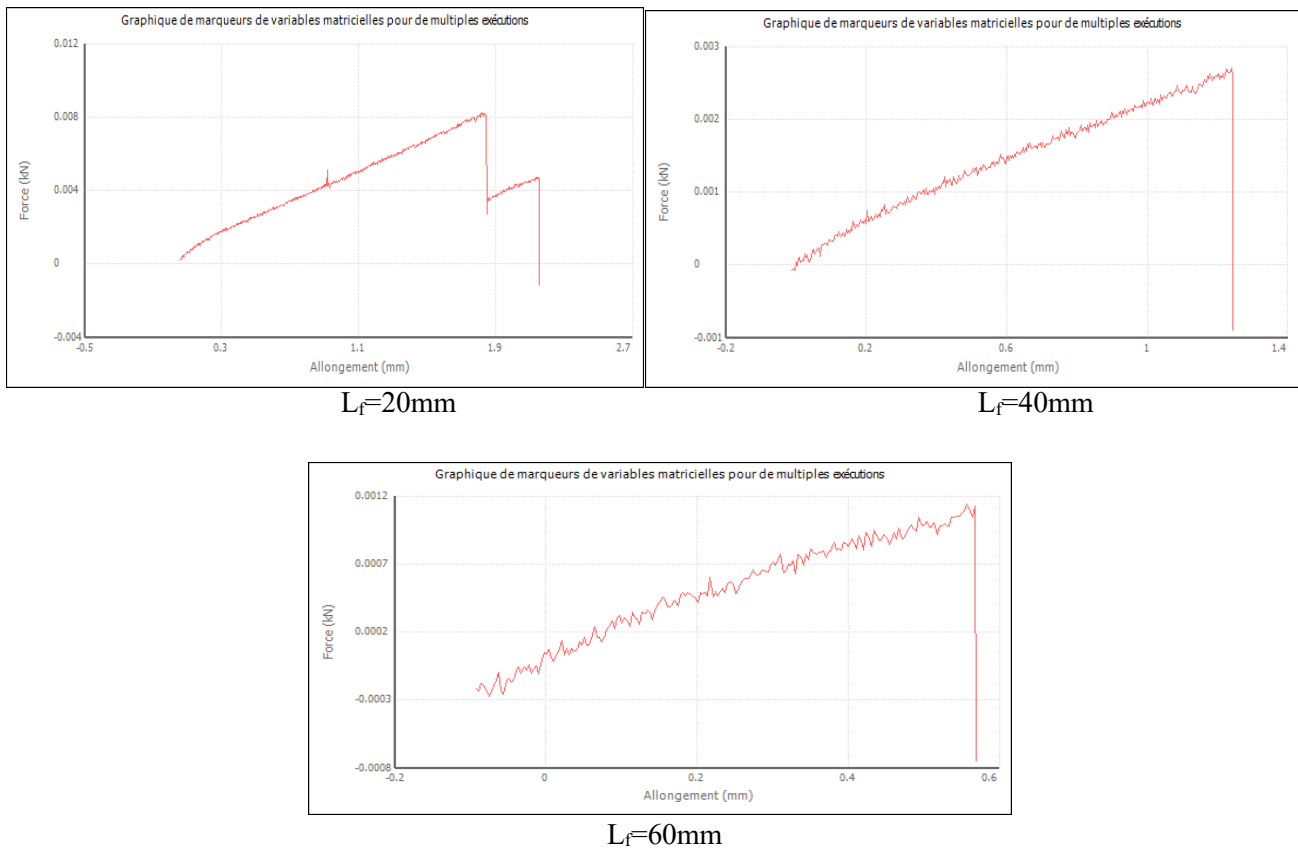
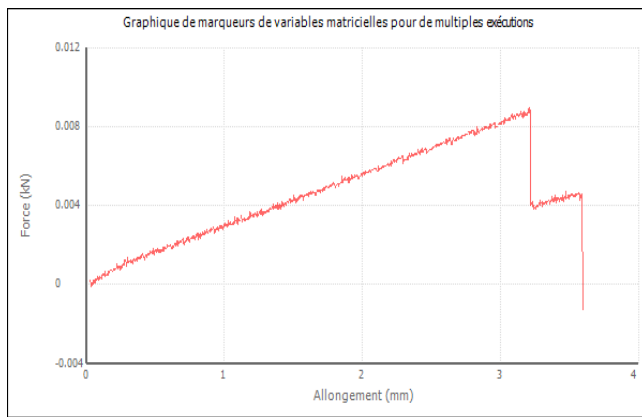


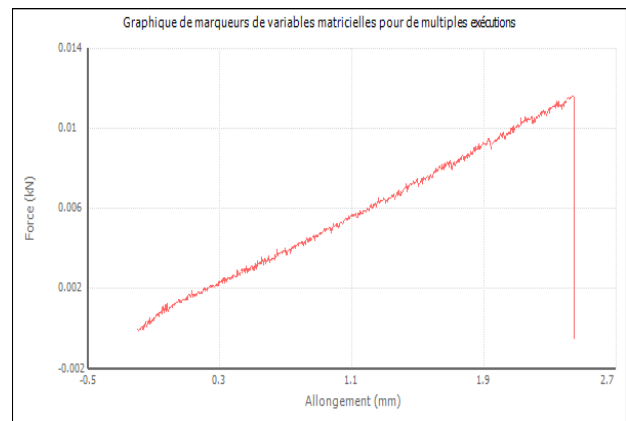
Figure II-13: Comportement des fibres de sisal à l'état naturel à la traction directe.

Tableau II-11, montre les résultats à la traction de fibre de sisal non saturé.

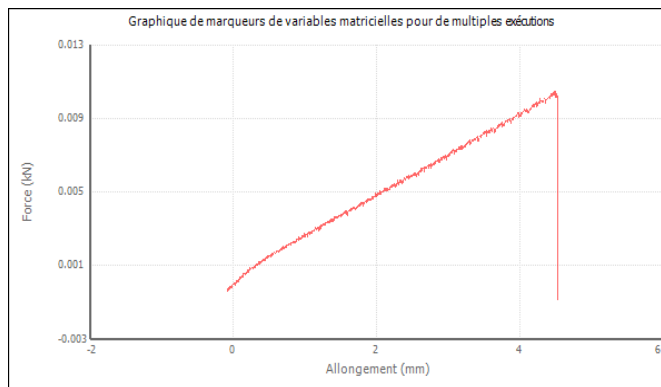
Tableau II-11: Propriétés mécaniques des fibres à l'état naturel.			
Résistance à la traction (MPa)	L=60 mm	L=40 mm	L=20 mm
		100	200
Déformation à la rupture %	d=1.1	d=2.4	d=3.6
Module de Young (MPa)	E=18.059	E=12.626	E=23.265



$L_f=20\text{mm}$



$L_f=40\text{mm}$



$L_f=60\text{mm}$

Figure II-14: Comportement des fibres de sisal à la traction directe à l'état saturée.

- Le tableau ci-dessus montre les résultats à la traction de fibre sisal à l'état saturé.

Tableau II-12: Propriétés mécaniques des fibres l'état saturé.			
Résistance à la traction [MPa]	L=60 mm	L=40mm	L=20 mm
	500	700	900
Déformation à la rupture %	d=8.9	d=6.3	d=4.8
Module de Young (MPa)	E=11.581	E=13.481	E=18.337

D'après le **tableau II-12**, on remarque que les fibres à l'état saturé sont supérieures à celle obtenue pour l'état naturel, par contre le module de Young de fibre de sisal a l'état saturé diminue par rapport à l'état naturel. On remarque aussi que la résistance à la traction diminue en augmentant la longueur de fibre, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Djoudi [43].

II.2.6. Formulation et caractérisation des mortier de plâtre

Quatre formulations ont été étudiées dans ce présent travail :

- Composition 1 : plâtre.
- Composition 2 : plâtre avec fibres.
- Composition 3 : mortier de plâtre.
- Composition 4 : mortier de plâtre avec fibres.

On ajoute 6 % de la chaux (par rapport à la masse du plâtre) pour retarder la prise du plâtre.

$$\frac{S}{P} = 0.5 \text{ recommandée par CNERIB [11].}$$

$$\frac{E}{P} = 0.6. \text{ Taux de gâchage à saturation.}$$

La longueur de la fibre utilisée est de 30 mm, selon la littérature [10], cette longueur donne les meilleures propriétés mécaniques pour le plâtre et pour les composites de plâtre avec fibre de sisal. Le pourcentage utilisé de fibres est de 0.5% de la masse du plâtre.

a) Malaxage et mise en œuvre de plâtre

- On mélange le plâtre, la chaux et le sable et les fibres à sec.
- On prend en considération que l'orientation des fibres est aléatoire.

- On saupoudre le mélange dans le récipient qui contient l'eau, avec un malaxage manuel et rapide.
- En verse rapidement le produit dans les moules de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$
- Le démoulage est fait après 24h.

b) Confection et cure des éprouvettes

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées à l'air du laboratoire sous une température de $T = 20 \pm 2 \text{ °C}$ et une humidité de $45 \pm 5 \%$, jusqu'à l'âge de 28 jours.

c) Milieux de conservation

La conservation des éprouvettes après 28 jours se fait dans les 6 milieux suivants :

- Air ambiant du laboratoire ($T = 20 \pm 2 \text{ °C}$, $HR = 45 \pm 5\%$), durant 30 jours.
- Enceinte climatique ($T = 20 \pm 2 \text{ °C}$, $HR = 95\%$), durant 30 jours.
- Cycles de séchage-humidification : conservation pendant 24 heures dans une enceinte ($T = 20 \pm 2 \text{ °C}$, $HR 95 \%$) et 24 heures dans une étuve à une température de 70 °C , durant 24 jours.
- L'eau déminéralisée, comme référence.
- Une solution de 1 % de H_2SO_4 (acide sulfurique), durant 30 jours.
- Une solution de 5 % de sulfate de magnésium MgSO_4 (sulfate de magnésium), durant 30 jours.



Figure II-15: Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs.



Figure II-16 : Conservation des éprouvettes dans les milieux hygrométriques.

II.2.7. Essais mécaniques

a) Résistance mécanique de rupture par flexion 3 points (R_f) :

Après 28 jours les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ des composites étudiés sont soumises à un essai de flexion 3 points, la résistance à la flexion est donnée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{3 F L}{2b \times h \times h} \dots\dots\dots (II-11)$$

R_f : Résistance à la flexion (N / mm^2).

F : La force appliquée (N).

L : La distance entre les appuis (mm).

b : L'arrêt de la section carrée de prisme (mm).

h : La hauteur d'éprouvette.

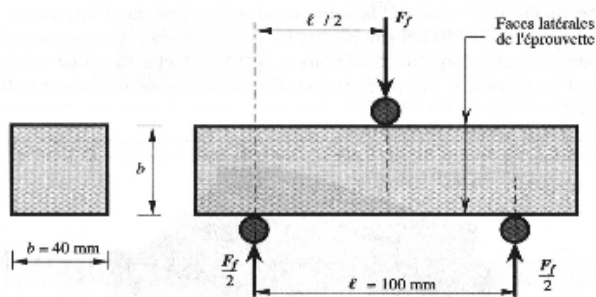


Figure II-17 : Dispositif pour l'essai de résistance à la Flexion trois points.

b) Résistance à la compression (R_C)

L’essai de compression consiste à soumettre l’éprouvette à l’écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d’une manière continue jusqu’à la rupture du cube $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ la résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$R_C = \frac{F_C}{S} \dots \dots \dots \text{(II-12)}$$

R_C : La résistance mécanique à la compression (N/mm^2).

F_C : Charge à la rupture (N).

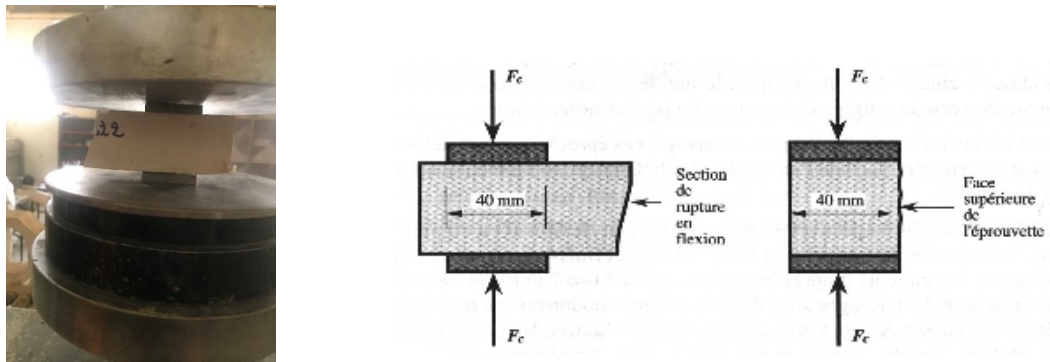


Figure II-18 : Dispositif pour l’essai de rupture en compression.

Les résultats obtenus dans notre étude comme référence pour la pâte ou pour le mortier de plâtre à l’âge de 28 jours sont présentées dans le **tableau II-14** :

Tableau II-13:Comportement mécanique des composites de plâtre.

Les compositions	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
Plâtre	3.24	9.87
Plâtre avec fibre	5.15	7.60
Mortier de plâtre avec fibre	5.71	8.19
Mortier de plâtre	3.74	11.30

II.2.8.Observation par microscope optique

On a examiné les surfaces de rupture des échantillons étudiés par Microscopie optique. (**Figure II-19**).



Figure II-19: Microscope Optique.

II.3. Conclusion

Dans le présent chapitre on a étudié les propriétés physico- mécaniques et chimiques des matières utilisées. L'analyse des résultats montre que :

- ✓ Le plâtre est un plâtre de qualité et cela d'après sa teneur en sulfate de calcium élevée.
- ✓ Le sable utilisé est (fin ; propre et à granulométrie continue).
- ✓ Les fibres de sisal ont une bonne résistance qui est dans l'intervalle 600 à 700 MPa donné par la littérature. Cette résistance due au pourcentage élevé de cellulose, avec une déformation à la rupture supérieure par rapport aux autres fibres végétales excepte les fibres de coco et coton.
- ✓ La chaux utilisée augmente le temp d'emploi du composite à base de plâtre.
- ✓ L'eau de gâchage utilisée a une potabilité moyenne.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau composite. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité sera augmentée.

Dans ce chapitre, nous allons examiner l'effet de l'ajout de fibres de sisal sur les propriétés physiques et mécaniques du composite de plâtre. Nous étudions l'impact de différents milieux sur les caractéristiques de composite de plâtre.

III.2. Influence des différents milieux hygrométriques sur les propriétés mécaniques

Les éprouvettes ont été conditionnées à l'air ambiant du laboratoire jusqu'à l'âge de 28 jours, afin d'atteindre leurs résistances caractéristiques, après elles ont été conservées dans :

- Les conditions du laboratoire ($T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 65\pm 5\%$), durant 30 jours .
une enceinte sous les conditions climatiques ($T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 95\%$), durant 30 jours.
- Pour des cycles de séchage-humidification : conservation pendant 24 heures dans une enceinte ($T=25\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 95\%$) et 24 heures dans une étuve à une température de 70°C , durant 24 jours (12 cycles).

III.2.1. Résistance mécanique des éprouvettes conservées à l'air ambiant du laboratoire

a) Résistance à la compression

D'après la **figure III-1**, on remarque que la résistance à la compression de plâtre et de mortier de plâtre (témoins) croît dans le temps. Cette évolution est due à la carbonatation de la chaux utilisée comme retardateur de prise. Nos résultats sont en accord avec les travaux de Laoubi [42] et Djoudi [43].

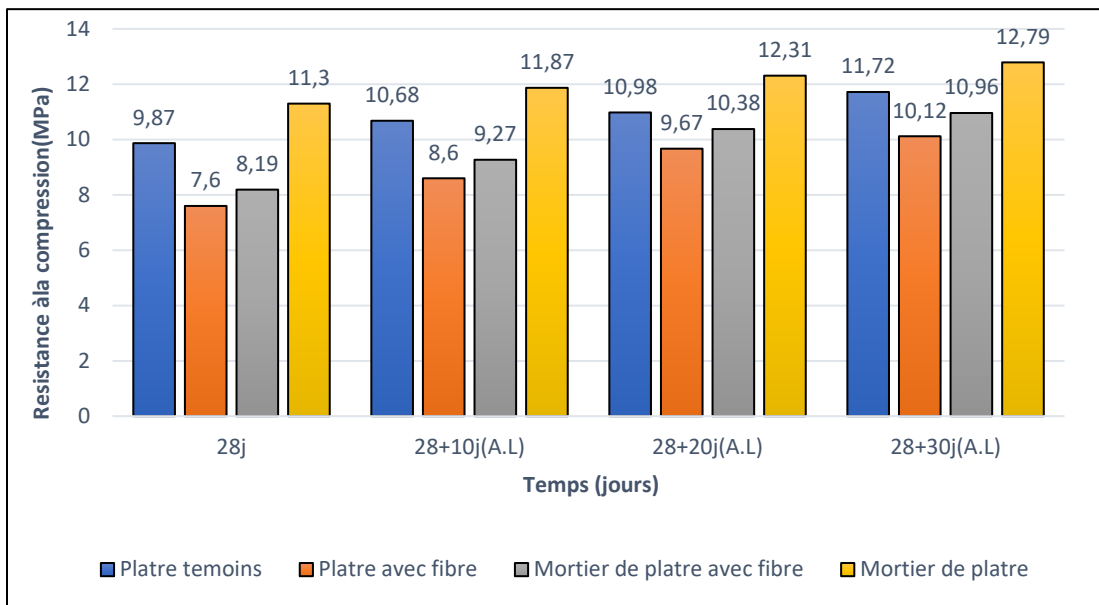


Figure III-1: Variation de la résistance à la compression dans le temps à l’air de laboratoire.

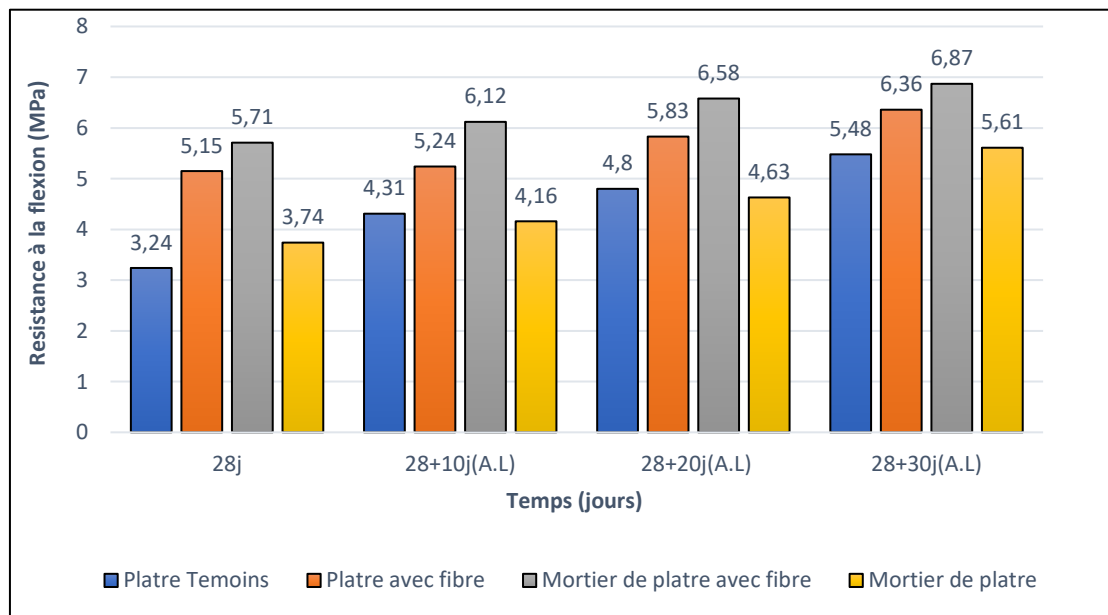


Figure III-2: Variation de la résistance à la flexion dans le temps à l’air de laboratoire.

b) Résistance à la Flexion

La **figure III-2**, montre que la résistance à la flexion croît rapidement pour tous les éprouvettes. La résistance de plâtre avec fibres et mortier de plâtre avec fibres sont supérieures à celles de plâtre et mortier de plâtre témoins, cette amélioration due à l'ajout des fibres de sisal.

La meilleure résistance a été obtenue pour le plâtre et mortier de plâtre renforcés par les fibres de sisal et elles sont respectivement, 6.36 MPa pour le plâtre avec fibres et 6.87 MPa pour le mortier de plâtre avec fibres.

III.2.2. Résistance mécanique des éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité

a) Résistance à la compression

La **figure III-3**, montre que la résistance à la compression pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité diminue et cela peut être due au l'effet de la tenue de plâtre à l'état saturé, assuré par liaison de type tenon-mortaise, ces dernières ne sont pas affectées à court terme et peuvent cependant être modifiées à long terme. Donc la morphologie des cristaux influe sur le comportement mécanique de la cohésion du plâtre.

Donc cette diminution, peut être expliqué de point de vue microstructure à l'augmentation des tailles des cristaux, sachant que les petits cristaux améliorent la résistance mécanique.

b) Résistance à la flexion

On constate d'après la **figure III-4**, une légère augmentation de résistance à la flexion pour les éprouvettes conservées pendant 30 jours dans un milieu humide, ce qui en accord avec les résultats de Djoudi [43] et reste à vérifier la variation de la résistance à la flexion après 30 jours.

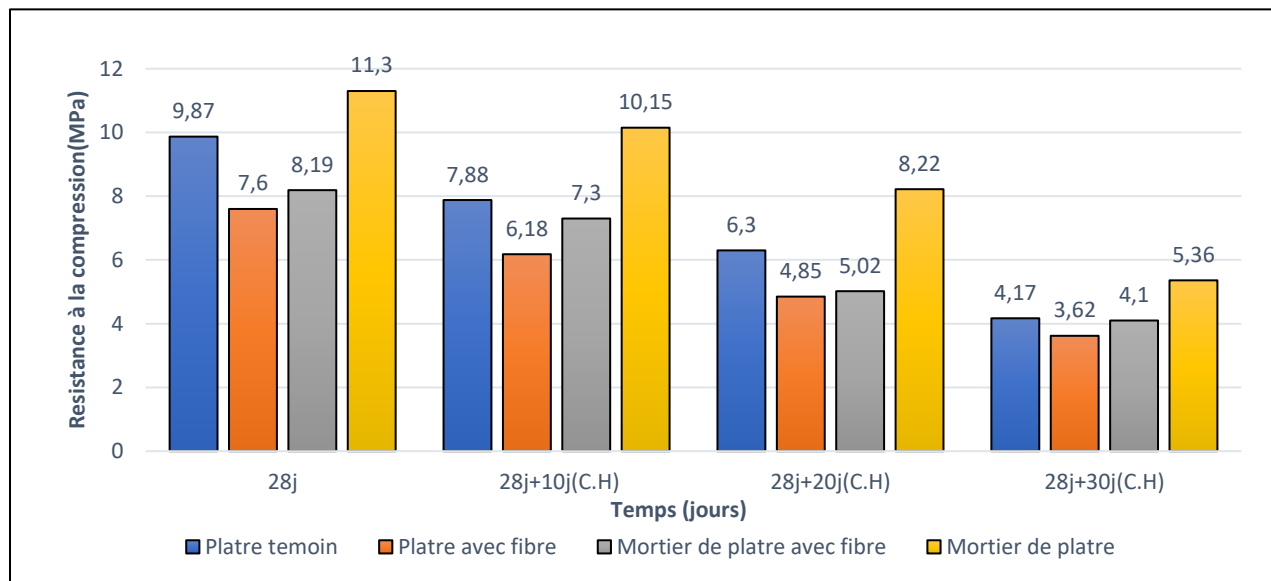


Figure III-3: Variation de la résistance à la compression dans le temps pour les éprouvettes conservées continuellement dans l’humidité.

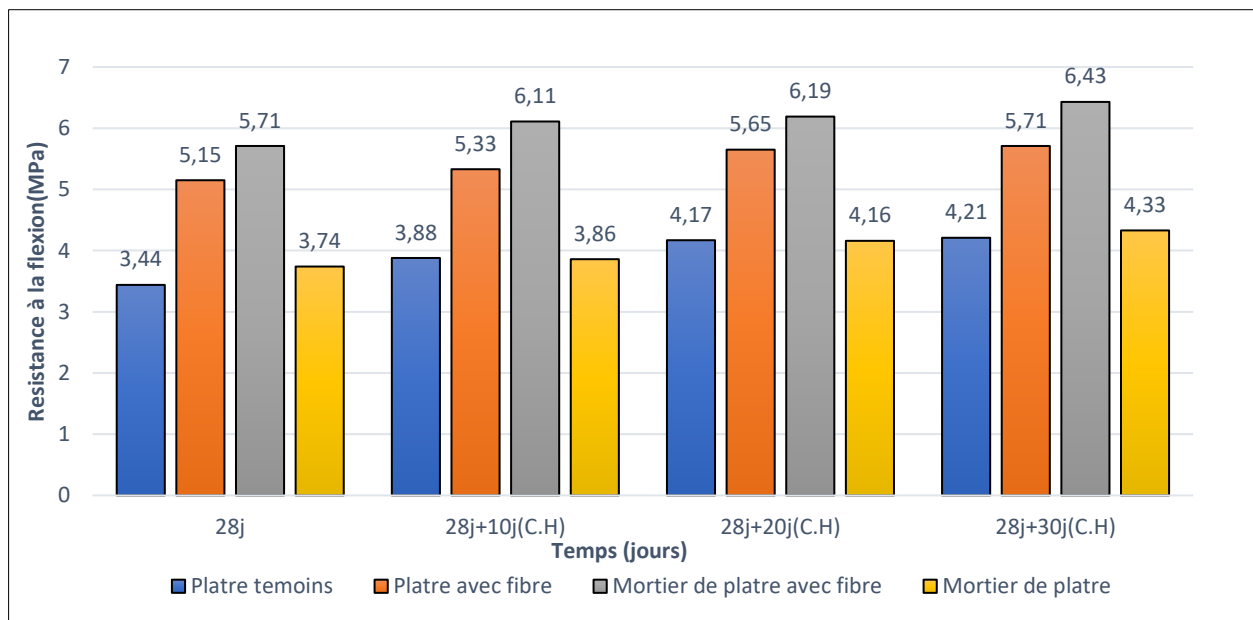


Figure III-4: Variation de la résistance à la flexion dans le temps pour les éprouvettes conservées continuellement dans l’humidité.

III.2.3. Résistance mécanique des éprouvettes soumises à des Cycle de séchage/humidification

Tableau III-1: Résultats de la variation de la résistance mécanique des éprouvettes soumis à des cycles séchage/humidification.

Échantillant Propriétés	Resistance à la compression (MPa)		Resistance à la flexion (MPa)	
	Avant	Après 12 cycles	Avant	Après 12 cycles
Plâtre	9.87	4.90	3.24	2.24
Plâtre avec fibre	7.60	3.81	5.15	3.12
Mortier de plâtre	11.30	5.10	3.74	2.46
Mortier de plâtre Avec fibre	8.19	4.29	5.71	3.30

a) Résistance à la compression

D'après le **tableau** ci-dessus on remarque, après 12 cycles de séchage- humidification que la résistance à la compression diminue pour toutes les éprouvettes, cette diminution est due au vieillissement du matériau à cause du gonflement et l'altération de la matrice. Nos résultats sont en accord avec les résultats trouvés dans d'autres travaux [42, 43].

b) Résistance à la flexion

Le **tableau III-1** montre que la résistance à la flexion décroît rapidement et cela est due au phénomène de dissolution et recristallisation du gypse et par conséquent, une variation dimensionnelle du matériau.

III.3. Etude des propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans des différents milieux agressives

Après 28 jours, les composites étudiés sont conservés dans trois environnements :

- L'eau déminéralisée, comme référence.
- Une solution de 1% de H₂SO₄.
- Une solution de 5 % de sulfate de magnésium MgSO₄.

III.3.1. Propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans un milieu acide

Le **tableau III-2** présente les résultats de la variation des propriétés physico- mécaniques des éprouvettes conservées dans le milieu acide.

Tableau III-2:Résultats de la variation des propriétés physico- mécaniques des éprouvettes conservées dans le milieu acide.

Échantillon Propriétés	Résistance Avant l'immersion		Resistance à la Compression (MPa)		Resistance à la Flexion (MPa)		Perte de masse %	
	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Eau	Acide	Eau	Acide	Eau	Acide
Plâtre	9.87	3.24	3.73	5.11	1.2	2.40	25.5	24.92
Plâtre avec fibre	7.60	5.15	2.59	4.44	2.29	3.69	24.62	23.31
Mortier de plâtre	11.3	3.74	4.60	5.88	1.86	2.21	26.76	25.88
Mortier de plâtre avec Fibre	8.19	5.71	2.01	4.97	2.63	3.84	23.04	25.34

D'après le **tableaux III-2** il est clair qu'une grande diminution des propriétés mécaniques a été enregistrée après immersion des échantillons à base de plâtre dans l'eau par rapport au milieu acide. Cette immersion conduit, en effet, à la solubilité du gypse qui diminue généralement la résistance mécanique du plâtre, donc l'eau seule a une grande influence sur les matériaux par rapport à une solution acide.

On a enregistré des pertes de masse remarquables pour les éprouvettes conservées dans les deux milieux acides et eau. Nos résultats sont en accord avec les travaux de Djoudi [43].

III.3.2. Propriétés physico-mécaniques des éprouvettes conservées dans un milieu Sulfatique

Le **tableau III-3** résume les résultats obtenus après l'essai de la résistance aux sulfates.

Tableau III-3: Résultats de la variation des propriétés mécaniques et l'aspect superficiel des éprouvettes conservées dans un milieu sulfatique dans la solution de sulfate.

Échantillon / Propriétés	Résistance Avant l'immersion		Résistance a la Compression (MPa)	Résistance a la Flexion (MPa)	Aspect superficiel de l'échantillon
	Compression (MPa)	Flexion (MPa)			
Plâtre	9.87	3.24	4.88	1.36	Dégradation de la surface superficielle de l'échantillon
Plâtre avec fibre	7.60	5.15	3.56	2.21	Apparition des fibres
Mortier de plâtre	11.3	3.74	5.02	1.87	Apparition des granulats
Mortier de plâtre Avec fibre	8.19	5.71	4.76	2.54	Apparition des granulats et des fibres

D'après le **tableau III-3**, on remarque qu'une diminution des propriétés mécaniques pour les échantillons étudiés et cela peut être expliqué par l'élévation de la pression superficielle du liquide utilisé qui affecte les liaisons entre les cristaux, ce qui a été constaté et affirmé par microscopie électronique par Djoudi [43].

III.4. Visualisation des surfaces de rupture des échantillons par microscope optique



Figure III-5 : Matrice de plâtre.



Figure III-6 : Matrice mortier de plâtre.

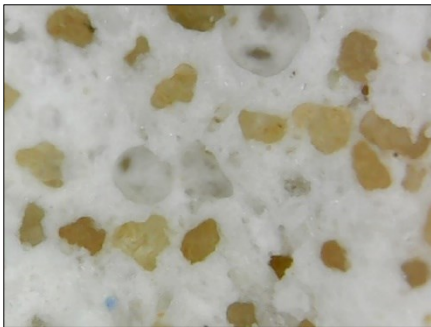


Figure III-7 : matrice de mortier de plâtre soumise au cycle de séchage / humidification.



Figure III-8 : matrice mortier de plâtre avec fibres conservée continuellement dans l'humidité.



Figure III-9 : l'échantillon de mortier de plâtre avec fibres conservé dans l'eau.



Figure III-10 : l'attaque de $MgSO_4$ à la matrice de plâtre.

La figure III-5 montre la matrice poreuse du plâtre, par contre la figure III-6, présente le mortier de plâtre et les vides de plâtre comblés par le sable de dune.

D'après la figure III-7 on remarque l'effet de cycle séchage/humidification par la dégradation de la matrice mortier de plâtre. Le phénomène de séchage/humidification a fait travailler la fibre.

La figure III-8 montre l'échantillon de la matrice mortier de plâtre avec fibres conservé continuellement dans l'humidité. On a observé une dégradation légère du plâtre et changement de volume de fibres par gonflement.

La figure III-9 montre l'effet de l'eau sur la matrice de plâtre avec fibres par une dégradation du plâtre et l'apparition et le changement de la couleur de certaines fibres.

La figure III-10 montre l'attaque chimique de la solution $MgSO_4$ à la matrice plâtre.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la durabilité à court terme (vieillessement accéléré) d'un composite de plâtre renforcé par les fibres végétales de sisal dans différents milieux hygrométriques et chimiques.

L'analyse des résultats montre que :

- ❖ Dans l'air de labo. On a enregistré une augmentation de la résistance à la compression et la résistance à la flexion pour tous les composites.
- ❖ La perte de résistance à la compression pour les des éprouvettes conservées dans l'humidité est de l'ordre de 57,75 ,52,56, 52,36 et 49,93% respectivement pour plâtre, mortier de plâtre, plâtre avec fibres et mortier de plâtre avec fibres.
- ❖ La perte de résistance à la compression des éprouvettes soumises aux cycles de séchage/humidification est de l'ordre de 50,36, 54,36 , 49,86 et 47,61% respectivement pour plâtre, mortier de plâtre, plâtre avec fibres et mortier de plâtre avec fibres. Cette perte est due aux phénomènes de dissolution - recristallisation du gypse.
- ❖ La perte de résistance à la flexion des éprouvettes soumises aux cycles de séchage /humidification est de l'ordre de 30,86, 34,22, 39,41 et 42,20% respectivement pour plâtre, mortier de plâtre, plâtre avec fibres et mortier de plâtre avec fibres Cette perte due au dissolution et recristallisation du gypse. Cette perte est due à la dégradation du gypse et le vieillissement de la fibre de sisal par l'effet répété de cycles séchage/humidification.
- ❖ La conservation des composites étudiés dans le milieu acide a fait diminuer les propriétés mécaniques de ces derniers.
- ❖ Le sulfate de magnésium attaque les composites étudiés et change leur microstructure et fait diminuer leur propriété mécanique.

Conclusions Générales
et
Recommandations

L'objet de cette étude consistait à évaluer l'importance des ajouts de fibres dans la matrice de plâtre conservée en différents milieux. L'étude comportait une évaluation de la résistance mécanique et de la durabilité. Le type de fibre utilisé : fibres végétales de sisal. Les composites étudiés sont confectionnés et conservés dans les différents environnements (Air du laboratoire, humidité, cycles séchage/humidification, milieu acide et milieu sulfatique). Le dosage en fibres est fixé à 0,5% pour toutes les formulations avec rapport E/P=0.6. Les caractéristiques mécaniques telles que la résistance à compression, la résistance à la flexion 3 points et les pertes de la résistance sont comparés pour les milieux agressives pour toutes les compositions. Nous avons réalisé et analysé l'étude du comportement mécanique et la durabilité des composites

Ce travail de recherche a été présenté en trois chapitres :

La recherche bibliographique a montré que le plâtre et ses dérivés est peu étudié dans son ensemble et que les recommandations de CNERIB peut être suivies avec avantage. Concernant les matériaux composites renforcés par différentes natures de fibres, leurs propriétés sont influées par la géométrie et le dosage de fibres et leurs orientations dans la matrice.

Le deuxième chapitre traite l'identification et la caractérisation des différents matériaux retenus dans le programme expérimental, et présente la méthodologie des essais et les mesures. Il a été montré que :

- ✓ Le plâtre est un plâtre de qualité et cela d'après sa teneur en sulfate de calcium élevée.
- ✓ Le sable utilisé est fin, propre et à granulométrie continue.
- ✓ Les fibres de sisal ont une bonne résistance à la traction qui est due au pourcentage élevé de la cellulose contenue dans la fibre, avec une déformation à la rupture supérieure aux autres fibres végétales à part les fibres de coco et coton.
- ✓ La chaux utilisée augmente le temps d'emploi.

Dans le troisième chapitre on a étudié la durabilité d'un composite de plâtre renforcé par les fibres végétales de sisal dans différents milieux hygrométriques et chimiques.

- ✓ L'augmentation des propriétés mécaniques des composites conservés dans l'air du laboratoire est due d'après la littérature à la carbonatation de la chaux donc reste à vérifier

la présence de calcite dans le composite par MEB équipé d'une microanalyse, DRX, ATD ect.

✓ La perte de la résistance pour les échantillons conservés dans l'humidité et soumises aux cycles de séchage- humidification est due au changement de la taille des cristaux donc il faut vérifier ces dernières par MEB.

❖ En fin on recommande le complètement de ce travail par :

- Mesure des propriétés thermiques.
- Etude du comportement phonique.
- Etude de la résistance au feu.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Sylvain meille. “Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure“, thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquees de lyon, 2001.
- [2] Hamida mohamed lamine. “les Effet de l’humidité et caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction“, thèse de magister, Universite Mentouri de Constantine, page 6,2017.
- [3] <https://www.lesindustriesduplatre.org/du-gypse-au-platre/origine-platre-gypse/2022>.
- [4] Mermat fares.kiche abdnoure. “ Etude et caractérisation physique et mécanique de plâtre recyclé “, mémoire de master, Universite Boumerdess, page 10,2017.
- [5] W. De Jong and J. Bouman. Zeitschrift für kristallographie. 100:275, p 40,1938.
- [6] Secret de fabrication du plâtre, “ Le plâtre industriel- L’Entrevous“, numéro 23 – page 13.
- [7]<https://french.alibaba.com/product-detail/Manufacturer-Calcined-Gypsum-Rotary-Kiln-Calciner-62169280805.html> 2022.
- [8] Amitouche Nissa. “ Contribution à l’étude des propriétés physico- mécaniques des plâtres α et β avec l’ajout des fibres et de superplastifiant. CETIM“, mémoire de master, Universite Boumerdess,2016.
- [9] Rachedi mokhtar. “Contribution à l’étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier“, Université Kasdi Merbah ouargla, page 21 ,2013.
- [10] Gesmia amel kenza. “étude de propriété physique mécanique d’un composite de plâtre a base des fibres de sisal”, Université Amar Theliji Laghouat, page 20,2019.
- [11] CNERIB : Recommandations pour la construction en plâtre“, Centre National D’études et de Recherche Intégrées au Bâtiment.Ministère de l’habitat, 2003.
- [12] A. L. Lavoisier. “ Extrait de deux mémoires sur le gypse lus a l’académie royale des sciences“, Mémoires de Lavoisier, [http://www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765,pah\\$ge.Page106-125](http://www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765,pah$ge.Page106-125).
- [13] Henry gohor. Document “Technologie des bâtiments“, page 1.
<https://fr.scribd.com/document/472169825/Le-platre> 2022.

- [14] W. Michaelis. "The hardening process of hydraulic cements", these doctorat, cement & Engineering News 1907, universite de michigan, 25 sept. 2007.
- [15] E. Karmazin. "Cinétique et mécanisme d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratés – études par calorimétrie en régime isotherme", Thèse doctort, INSA. Université de Lyon I, 1978.
- [16] Ben djillali khadra. "Cours MDC". Université Amar Theliji laghouat, 2021.
- [17] Hamida mohamed lamine. "Les Effet de l'humidité caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction", thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, page 12, 2017.
- [18] <https://www.systemed.fr/maconnerie-facades/materiaux-construction-polyvalent-platre,7188.html> 2022
- [19] <https://www.actusenegalbtp.com/les-cloisons-en-plaques-de-platre-solution-efficace-a-lamenagement-et-a-la-decoration-des-pieces-de-votre-batiment/2022>
- [20] <https://www.toupret.com/enduit-professionnels/enduit-de-facade-egalissr-facade-poudre.html> 2022
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite 2022
- [22] http://www.physique-et-matiere.com/materiau_composite.php 2022
- [23] <https://www.amazon.fr/En-sisal-corde-sur-bobine/dp/B008GQZFQY> 2022
- [24] <http://www.peuplescavaliers.be/peuplescavaliers/photos/arc4.jpg>
- [25] Belaidi salah eddine. "Cours matériaux composites", Université Amar Theliji laghouat, 2021.
- [26] Marc marzano - Action Composite Pascal Celle - GNFA. "matériaux composites", Édité avec le concours de l'Éducation nationale, pages 38-40.
- [27] Lionel gendre, "Cours matériaux composites et structure composites", Université de PARIS-SACLAY, Édité le 17/05/2011.
- [28] Debabi, Zahra. bouguerra, Afaf. "Effet de traitement chimique sur la morphologie structural des fibres végétal Utilise dans un matériau composite". Mémoire de master, Université de Msila, 2019, page 25.

[29] Mohamed Dallel. “ Evaluation du potentiel textile des fibres d’Alfa “ (Stipa Tenacissima L.) : “Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil“.Memoire de master . Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2012. Français.

[30] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellulose> 2022

[31] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-lignine-4161/2022>

[32] https://fr.wikipedia.org/wiki/Lignine#/media/Fichier:Monolignols_general.svg 2022

[33] Jean-Luc WERTZ. “ Les hémicelluloses “, Agro-Bio Tech, Université de Liège, 15 novembre 2011.

[34] Hassan S.El Khadem ,”Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)”, Pages 369-416,2003.

[35] Rakotomanana michaël et al. “Etude et évaluation des constantes élastiques des deux plis unidirectionnelles Sisal/Polystere ; Bimbo/Polyster. “, Mémoire de fin d’études, page 31,2014.

[36] <https://deguisement.buttinette.com/shop/a/fibres-de-sisal-deco-ecru-50-g-36842> 2022

[37] <https://www.alamyimages.fr/photos-images/close-up-sisal-agave-sisalana.html> 2022

[38] <https://www.amazon.fr/En-sisal-corde-sur-bobine/dp/B008GQZFQY>2022

[39] Fabien betene ebanda. “ Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforce de fibres végétales tropicales “, Thèse de doctorat, 2015.

[40] Mokhtari abdessamed. “Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés deFibres Végétales de Palmier Dattier“, thèse Doctorat, 2006.

[41] Koffi Clément et al. “ Influence de l’incorporation des mèches synthétiques usagées sur les propriétés thermo physiques et mécaniques d’un matériau composite à base de plâtre “, Thèse doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny Cocody,2020.

[42] Lahoubi hamza. “ Etude du comportement thermo-mécanique et durabilité d’un béton àbase de plâtre allégé par des granulats de polystyrène “, Thèse de Doctorat,2021.

[43] Amina djoudi. “ Etude de la durabilité et du comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier “, Thèse de Doctorat. Université de Laghouat,2015.

Résumé