

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Construction&Environnement

L C E

Thèse de Doctorat en Sciences

Option : Matériaux

Présentée par

DJOUDI Amina

Ingenieur d'état en Génie civil de l'Université de Laghouat
Magister en Matériaux de l'Université de Laghouat

Intitulé :

Etude de la durabilité et du comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier

Soutenu publiquement le 22 /10 / 2015 devant le jury composé de :

M. ^{me} KETTAB Ratiba	Professeur, ENP, Alger	Présidente
M ^f . BALI Abderrahim	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
M ^f . KHENFER Mohamed Mouldi	Professeur, Université de Laghouat	Directeur de thèse
M ^f . ABADLIA Mohamed Tahar	Professeur, Université de Blida	Examineur
M ^f . KENAI Said	Professeur, Université de Blida	Examineur
M ^f . BOUHICHA Mohamed	Professeur, MESRS, Alger	Examineur

ENP 2015

À la mémoire de mes très chers parents;
À la mémoire de ma grande sœur.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Construction et Environnement à L'ENP d'Alger, en collaboration avec le laboratoire de Recherche de Génie Civil à l'université Amar Telidji de Laghouat et le laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale à L'INSA de Lyon.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, professeurs BALI Abderrahim, Directeur du laboratoire Construction et Environnement à L'ENP d'Alger et KHENFER Mohamed Mouldi, Directeur du laboratoire de Recherche de Génie Civil à l'université de Laghouat. Je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour leurs conseils et le soutien qu'ils m'ont accordé durant ce travail.

Que M^{ef} DEBICKI Gérard trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance d'avoir m'accueilli au laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale de L'INSA de Lyon et d'avoir suivi attentivement et efficacement le travail de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au professeur KETTAB Ratiba, Chef de département de Génie Civil à L'ENP d'Alger, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également aux professeurs, ABADLIA Mohamed Tahar, Recteur de l'université de Blida, KENAI Said, Directeur du laboratoire Géomatériaux et Génie Civil à l'université de Blida et BOUHICHA Mohamed, Directeur de l'Administration et de Financement de la Recherche Scientifique au Ministère d'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier M^{ef} AMBROISE Jean et CHABANNET Michèle d'avoir m'accueilli au laboratoire des Matériaux Minéraux de L'INSA de Lyon.

Je remercie également M^{ef} MEZIANE Mokhtar, Chef de gestion des projets au CNERIB, d'avoir m'aidé lors des mesures des propriétés thermo-phoniques des matériaux élaborés.

Je remercie enfin mes collègues au sein du laboratoire de Recherche de Génie Civil et du laboratoire des matériaux et réhabilitation des structures de l'université de Laghouat pour leur aide et leurs encouragements.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المساهمة في تطوير مواد بناء مبتكرة تتوافق مع التشريعات والاحتياجات الحالية للمستخدمين، لاسيما ما يخص تأثيرها على البيئة والصحة وكذلك توفير الراحة مثل العزل الحراري و العزل الصوتي.

تم في هاته الدراسة مقارنة بين الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة الجص و تلك المدعمة بألياف النخيل المثمرة، من اجل ضمان ديمومتها و ذلك بحفظها في اوساط مختلفة كتجفيفها في الهواء ووضعها في الرطوبة، كما أجريت تجارب أخرى كتعرضها لدورات من التجفيف و الترطيب، الذوبان والتجميد، الكشط، التآكل، مقاومة الأحماض، الكبريت والطفح الناتج عن تواجد أملاح . العزل الحراري و الصوتي كانا أيضا محورا من محاور هاته الدراسة

تحليل النتائج بين انه لم يسجل انخفاض معتبر في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لخرسانة الجص وتلك المدعمة بألياف النخيل وذلك من خلال دراسة ديمومتها، كما أن ألياف النخيل تلعب دورا هاما من أجل ضمان ديمومة خرسانة الجص على المدى الطويل.

كما اثبت أن هاته المواد المركبة و المدروسة، يصلح استخدامها كألواح ممتصة للصوت و عازلة حراريا، بل يمكن أن يستبدل بها بعض العناصر التي تخضع للانحناء في ميدان البناء.

كلمات مفتاحية: الجص، خرسانة الجص، ألياف النخيل المثمرة، ديمومة، عزل حراري، امتصاص الصوت.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de contribuer au développement des matériaux de construction innovants conformes à la législation et aux exigences actuelles des utilisateurs concernant les impacts sur l'environnement et sur la santé ainsi que sur le confort thermique et acoustique. Une étude comparative a été réalisée entre les propriétés physico-mécaniques des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier dattier et cela en étudiant leur durabilité dans différents milieux hygroscopiques, tels que l'air et l'humidité et en les exposant aussi aux cycles de séchage – humidification et au gel – dégel. Une étude complémentaire a été aussi abordée afin de tester la résistance du matériau aux attaques des acides, abrasion, érosion, agressions de sulfate, efflorescence. Le comportement thermique et acoustique a été également étudié. L'analyse des résultats montre qu'on n'a pas enregistré une baisse significative des propriétés physiques et mécaniques à long terme des matériaux étudiés. Les fibres du palmier jouent un rôle très important dans la durabilité des bétons de plâtre. On a pu aussi trouver que les composites étudiés peuvent être utilisés comme des panneaux insonorisants et isolants thermiques et peuvent remplacer quelques éléments soumis à la flexion.

Mots clés : Plâtre, Béton de plâtre, fibre du palmier dattier, durabilité, isolation thermique, absorption du son.

Abstract

The main aim of this work is to contribute to the development of an innovative building materials that comply with legislations and the users requirements concerning environmental and health impacts as well as thermal and acoustic comfort. A comparative study has been conducted between physical and mechanical properties of plaster concrete and those reinforced with date palm fibers for the improvement of their durability in different medium (air, humidity) and subjected to humidifying-drying cycles. Furth more an investigation has been carried out to analyze the material resistance to acid attack, freezing and thawing cycles, abrasion, erosion, sulphate aggressions and efflorescence against thermal and acoustical behaviors were also studied. The analyze of results shows that no very important reduction in the physical and mechanical properties at long term of these materials was recorded. The date palm fibers play an important role for the improvement of durability of plaster concrete. These composites were found to be suitable for use as sound absorbing and thermal insulation; they are able to be used as substitute for insulation boards and some flexural elements in construction.

Key words: Plaster, Plaster concrete, date palm fibres, durability, thermal insulation, sound absorption.



Table des Matières

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Notations utilisées.....	III

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

Chapitre I: Recherches bibliographiques

Partie A: Etude du plâtre, mortier et béton de plâtre

I. Introduction.....	3
II. Caractérisation des poreux :	3
II.1. Les poreux.....	3
II.2. Gypse.....	4
II.2.1. La Pierre à plâtre.....	4
II.2.2. Formes du gypse.....	5
II.2.3. Types de gypse naturel.....	6
II.2.4. Exploitation du gypse.....	7
II.2.5 Plâtre.....	9
III. Conditions de mise en œuvre du plâtre.....	17
III.1. Pâte pure de plâtre.....	18
III.2. Plâtre avec ajouts.....	20
III.3. Mortier de plâtre.....	20
III.3.1. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier.....	21

III.3.2. Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier.....	21
III.3.3. Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du mortier.....	22
III .3.4. Méthode de composition du mortier de plâtre.....	22
III.4. Béton de plâtre.....	23
III.4.1. Méthode de composition du béton de plâtre.....	23
III.4.2.Mode opératoire.....	24
III.4.3. Influence du rapport S/P sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre.....	24
III.4.4.Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du béton de plâtre.....	25
III.4.5. Influence des granulats de liège sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre...	26
III.4.6.Influence des granulats de liège sur les propriétés thermiques du béton de plâtre.....	27
III.4.7.Influence des granulats de liège sur les propriétés acoustiques du béton de plâtre.....	27
III.4.8. Durabilité des bétons de plâtre.....	28
III.5. Domaine d'application des éléments à base de plâtre.....	29
III.5.1. Dans la construction.....	29
III.5.2. Dans la Réhabilitation.....	31
IV. Coût.....	31
V. Conclusions.....	32

Partie B : Généralités sur les bétons de fibres

I. Introduction.....	33
II. Définition d'un matériau composite.....	33
III. Généralités sur les fibres.....	34
III.2. Principales catégories.....	34
III.2.1. Fibres naturelles.....	34
III.2.2. Fibres artificielles.....	48
III.3. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres.....	48
IV. Composition du béton de fibres.....	49
IV.1. Ouvrabilité.....	49
IV.1.1. Influence de la géométrie des fibres.....	50

IV.1.2. Influence du dosage et de la longueur de fibres.....	50
IV.2. Méthodes de formulation des bétons de fibres.....	53
IV.2.1. Adaptation de la méthode de formulation de Baron-Lesage par P. Rossi.....	53
IV.2.2. Adaptation de la méthode de formulation de Baron- Lesage par Serna-Ros.....	54
V. Fabrication et mise en place du béton de fibres.....	55
VI. Comportement mécanique des bétons de fibres.....	56
VI.1. Généralités.....	56
VI.2. Rôle des fibres dans le composite.....	56
VI.3. Orientation des fibres.....	56
VI.4. Longueur des fibres et rapport l/d.....	56
VI.5. Propriétés mécaniques des bétons de fibres.....	57
VI.5.1. Résistance à la compression.....	57
VI.5.2. Résistance à la traction.....	58
VI.5.3. Résistance à la flexion.....	61
VI.5.4. Résistance à l'impact.....	62
VI.5.5. Module de rupture.....	63
VI.5.6. Résistance à la fatigue.....	64
VI.5.7. Résistance à l'abrasion.....	64
VI.5.8. Résistance à l'érosion.....	65
VI.6. Autres propriétés.....	66
VI.6.1. Retrait.....	66
VI.6.2. Fluage.....	66
VII. Comportement thermique et acoustique des bétons de fibres.....	66
VIII. Rupture des matériaux composites à matrice fragile.....	69
X. Durabilité des bétons de fibres.....	69
X.1. Evolution des propriétés des composites de fibres végétales à long terme.....	70
X.2. Identification des mécanismes de dégradation des composites de fibres végétales en milieu alcalin.....	71
XI. Domaine d'application des éléments en plâtre armé de fibres.....	73

XII. Coût	74
XIII. Conclusions	74
XIV. Bibliographies	76

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation des composites

I. Introduction	82
II. Matières premières	82
II.1. Plâtre.....	82
II.1.1. Essais effectués sur le plâtre.....	83
II. 2. Sable.....	85
II.2.1. Essais effectués sur le sable.....	86
II.3. Gravier.....	92
II.3.1. Essais effectués sur gravier.....	92
II. 4. Fibres.....	94
II.4.1. Mode préparatoire de fibres.....	95
II.4.2. Propriétés physiques des fibres de surface du palmier dattier utilisées.....	95
II.4.3. Propriétés chimiques des fibres du palmier dattier utilisées.....	97
II.4.4 Morphologie et structure interne des fibres du palmier utilisées.....	100
II.4.5. Propriétés mécaniques des fibres du palmier dattier utilisées.....	102
II.4.6. Etude de la compatibilité chimique des fibres du palmier dattier avec un milieu non alcalin (cas de gypse).....	106
II.5. Chaux.....	109
II.6. Eau de gâchage.....	110
III. Formulation des bétons de plâtre renforcés avec des fibres du palmier	110
IV. Conclusions	113
V. Bibliographies	114

Chapitre III : Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

I. Introduction	116
II. Détails expérimentaux	116
II.1.1. Mode opératoire.....	116
II.1.2. Méthode d'essai.....	117
III. Présentation et discussion des résultats	119
III .1. Influence des différents milieux hygrométriques sur les propriétés mécaniques des bétons de fibres en fonction du temps.....	119
III .1.1. Résistance à la compression.....	119
III.1.2. Résistance à la flexion.....	121
III.2.Variation de la perte de masse lors de processus séchage – humidification.....	123
III.3. Hypothèses proposées pour l'explication de l'étude de la durabilité des bétons de fibres étudiés.....	124
III.4. Différentes techniques utilisées pour la validité des hypothèses proposées.....	124
III.4.1. Analyse thermique (ATD, ATG).....	124
III.4.2. Diffraction par les rayons X.....	125
III.4.3. Microscopie électronique à balayage équipée d'une microanalyse.....	130
IV. Autres essais complémentaires de durabilité	136
IV.1. Résistance aux cycles de gel –dégel.....	136
IV.2. Résistance à l'abrasion.....	139
IV.3. Résistance à l'érosion.....	141
IV.4. Résistances aux sulfates.....	143
IV.4.1. Interprétation des résultats de la résistance aux sulfates par DRX.....	144
IV.4.2. Interprétation des résultats de la résistance aux sulfates par MEB équipé d'une microanalyse.....	145
IV.5. Résistance aux acides.....	146
IV.6. Résistance aux efflorescences.....	148
IV.6.1. Définition de la conductance spécifique.....	148
IV.6.2. Conduite d'essai.....	149
IV.6.3. Présentation et interprétation des résultats.....	150
V. Conclusions	153

V.I.Bibliographies	154
---------------------------------	-----

Chapitre IV : Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcé par des fibres du palmier dattier

I. Introduction	157
II. Nécessité de l'isolation thermique	157
II.1. Principe.....	157
II.2. Isolation des parois.....	158
II.2.1. Isolation intérieure.....	158
II.2.2. Isolation extérieure.....	158
II.2.3. Isolation intégrée au matériau porteur.....	159
III. Transfert de chaleur	159
III.1. Généralités.....	159
III.2. Différents paramètres thermiques.....	159
III.2.1. Conductivité thermique.....	159
III.2.2. Chaleur spécifique volumique.....	160
III.2.3. Diffusivité thermique.....	160
III.2.4. Effusivité thermique.....	160
III.2.5. Propriétés thermo-physiques effectives.....	161
IV. Méthodes de mesures de la conductivité thermique	161
IV.1. Méthodes de mesure en régime permanent.....	162
IV.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée.....	162
IV.2. Méthodes non stationnaires (variables).....	164
IV.2.1. Méthode du fil chaud.....	164
IV.2.2. Méthode du Hot Disk.....	165
IV.3. Choix d'une méthode de mesure.....	165
V. Détails expérimentaux	166
V.1. Mode préparatoire.....	166
V.2. Méthode d'essai.....	166
V.3. Principe de fonctionnement du CT METRE.....	167
VI. Présentation et commentaire des résultats	168
VI.1. Conductivité thermique.....	168

VI.2. Chaleur spécifique.....	169
VI.3. Diffusivité thermique.....	171
VI.4. Effusivité.....	172
VI.5. Modélisation des conductivités thermiques des composites étudiés.....	173
VI.5.1. Echelle de modélisation.....	174
VI.5.2. Cas des milieux bi phasiques.....	176
VI.5.3. Cas des milieux tri phasiques.....	178
VII. Comparaison avec d'autres matériaux.....	181
VII.1. Plâtre.....	181
VII.2. Béton de plâtre témoin.....	181
VII.3. Béton de plâtre renforcé de fibres végétales du palmier dattier.....	182
VIII. Conclusions.....	183
IX. Bibliographies.....	185

Chapitre V : Etude du comportement phonique des bétons de plâtre renforcés par les fibres du palmier dattier

I. Introduction.....	189
II. Généralités sur les bruits dans les habitations.....	190
II.1. Bruits aériens.....	190
II.2. Bruits solidiens.....	190
II.3. Différents types de bruits.....	191
II.4. Le décibel "A".....	191
II. 5. Comportement du bruit à la rencontre d'une paroi.....	191
II. 5.1. Isolation et absorption.....	191
II.5.2. Transmission directe et transmission latérale.....	192
II.5.3. Isolement et indice d'affaiblissement.....	192
III. Rappels sur les ondes acoustiques.....	194
III.1. Définitions.....	194
III.2. Isolation et correction acoustique.....	195
III.3. Lien entre porosité, perméabilité et comportement acoustique.....	196
III.4. Choix des matériaux absorbants.....	197
IV. Détails expérimentaux.....	197

IV.1. Tube de Kundt.....	197
V. Présentation et discussion des résultats.....	199
V.1. Courbes continues d'absorption du son.....	199
V.2. Comparaison avec d'autres matériaux.....	202
VI. Conclusions.....	203
VII. Bibliographies.....	204
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>205</i>
<i>Recommandations et perspectives.....</i>	<i>209</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>210</i>



LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I: Recherches bibliographiques, partie A

Partie A : Etude du plâtre, mortier et béton de plâtre

Tableau I.1 : Classification de la porosité selon l'IUPAC [2].

Tableau I.2 : Classification de la pierre à plâtre [3].

Tableau. I.3 : Quelques exploitations du gypse en Algérie [7].

Tableau I.4 : Les différents composés obtenus en fonction des températures de cuisson [3].

Tableau I.5 : Caractéristiques thermiques du plâtre [8].

Tableau I.6 : Résistance thermique utile des plaques de plâtre (1) (2) [8].

Tableau I.7: Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier de plâtre 4 x 4x 16 cm³ [18].

Tableau I.8 : Résultats des essais mécaniques sur éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³[20].

Tableau I.9 : Résultats de chargement sur voûtains [20].

Partie B : Généralités sur les bétons de fibres

Tableau I.10 : Composition chimique par masse de quelques fibres végétales [34].

Tableau I.11 : les propriétés usuelles des fibres végétales [35].

Tableau I.12 : Propriétés de quelques fibres végétales [36]

Tableau I.13 : Avantages et inconvénients des fibres végétales [31].

Tableau I.14 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [31].

Tableau I.15 : Quelques caractéristiques des fibres de l'amiante [43].

Tableau I.16 : Comparaison de prix et des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres [35].

Tableau I.17 : Techniques de mise en œuvre des bétons de fibres [55].

Tableau I.18 : Résistance de compression des bétons de fibres [30].

Tableau I.19 : Propriétés physico- mécaniques de fibres de roselle [59].

Tableau I.20 : Test d'Abrasion [73].

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation des composites

Tableau II.1 : Analyse chimique du plâtre utilisé.

Tableau II.2 : Propriétés physiques des fibres de surface du palmier dattier utilisées.

Tableau II.3 : Propriétés physiques de quelques fibres données par la littérature [13].

Tableau II.4 : Absorption d'eau de quelques fibres végétales [13].

Tableau II.5 : Les principaux constituants organiques de fibres du palmier utilisées.

Tableau II.6 : Analyse chimique des fibres du palmier utilisées par MEB.

Tableau II.7 : Propriétés mécaniques des fibres à l'état sec et saturé.

Tableau II.8 : Variation des propriétés mécaniques des fibres du palmier immergées dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ dans le temps.

Tableau II.9 : Analyse minéralogique et chimique de la chaux utilisée.

Tableau II.10: Propriétés de la chaux utilisée.

Tableau II.11: Résultats de la variation de la maniabilité en fonction de la composition granulaire optimale $(S/G)_{\text{opt}}$ pour différents pourcentages et longueurs de fibres [28].

Chapitre III : Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Tableau III.1 : Résultats de l'essai de la résistance aux cycles gel- dégel.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai d'abrasion.

Tableau III.3 : Résultats de l'essai de l'érosion.

Tableau III.4 : Résultats de l'essai de résistance aux sulfates de magnésium.

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques et la perte de masse pour les bétons de plâtre renforcés de fibres du palmier dattier pour des éprouvettes conservées continuellement dans l'eau et dans l'acide sulfurique.

Tableau III.6 : Valeurs de la quantité de mortier dégradé+sel, conductivité spécifique et l'état de surface des échantillons testés.

Chapitre IV : Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier.

Tableau IV.1 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [2].

Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients des méthodes de mesure de la conductivité thermique en régime stationnaire et variable [15].

Tableau IV.3 : Variation de la chaleur spécifique massique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Tableau IV.4: Variation de la diffusivité thermique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Tableau IV.5: Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Tableau IV.6 : Variation de la porosité des composites étudiés en fonction du pourcentage et la longueur de fibres du palmier dattier.

Tableau IV.7 : Propriétés thermo physiques de différents types de plâtre [40].

Tableau IV.8 : Propriétés thermo physiques de différents types des bétons en granulats courants [40].

Tableau IV.9 : Propriétés thermo physiques de différents types de béton légers.

Chapitre V : Etude du comportement phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Tableau V.1 : Définition normalisée des octaves et tiers d'octaves.

Annexes

Annexe I

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de l'eau utilisée.

Annexe II

Tableau 1 : Valeurs des températures Θ en °C.

Tableau 2 : Pertes de poids et les températures de démarrage des différents échantillons étudiés.



LISTE DES Figures

Chapitre I: Recherches bibliographiques

Partie A : Etude du plâtre, mortier et béton de plâtre

Figure I.1 : Exemple de structure poreuse (coupe 2D) [2].

Figure I.2 : Morphologie du cristal de gypse[2].

Figure I.3 : Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman[2].

Figure I.4 : Formes du gypse [4].

Figure I.5 : Gypse, saccharoïde [5].

Figure I.6 : Gypse, Pied d'alouette [4].

Figure I.7 : Gypse, la macle en fer de lance [4].

Figure I.8 : Gypse, variété sélénite [5].

Figure I.9 : Gypse, Sebkha d'Ouargla [5].

Figure I.10 : Gypse, variété anhydrite [5].

Figure I.11 : Galeries souterraines à Vaujourns [6].

Figure I.12 : Schéma montrant l'exploitation des trois masses de gypses reliées par des puits d'extraction [6].

Figure I.13 : Exploitation à ciel ouvert [4].

Figure I.14 : Images MEB des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge) obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche (β) [2].

Figure I.15 : Solubilité des différentes phases du sulfate de calcium en fonction de la Température [2].

Figure I.16 : Variation volumique du plâtre au cours de la prise [2].

Figure I.17 : Image MEB (Microscope JEOL 5800LV / 15 kV) d'une fracture de plâtre pris ($e/p=0.8$) montrant des points d'ancrages mécaniques entre plusieurs cristaux [2].

Figure I.18 : Evolution de la porosité du plâtre pris en fonction du taux de gâchage initial (e/p), mesurée par porosimétrie au Mercure (Prosimètre Micromeritics Autopore III) [2].

Figure I.19 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre [3].

Figure I.20 : l'influence du rapport E /P sur la résistance à la compression [15]

Figure I.21 : l'influence du rapport E /P sur la résistance à la flexion [15]

Figure I.22 : Fuseau granulométrique des sables. Analyse granulométrique NF P 18 – 804[3].

Figure I.23 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier [3].

Figure I.24 : Influence du rapport S/P sur la résistance à la compression [15].

Figure I.25 : Influence du rapport S /P sur la Résistance à la flexion [15].

Figure I.26 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton [19].

Figure I.27 : Variation de la résistance à la compression des BPL(8/15) en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

Figure I.28 : Variation de la résistance à la compression des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

Figure I.29 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

Figure I.30 : Coefficient d'absorption du son des composites plâtre –liège [22].

Figure I.31 : Vue extérieur des coupoles de la mosquée de Sidi Ahmed Amar de Zaouïa Tidjania de Guemar de la wilaya de l'Oued (1870) [15].

Figure I.32 : Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre.

Figure I.33 : Voutains en mortier de plâtre.

Figure I.34 : Détection de la température à l'intérieur et à l'extérieur du prototype avec une grande efficacité énergétique.

Figure I.35 : Utilisation du mortier de plâtre pour le jointement des murs de Zaouïa de Guemar (Wilaya de l'oued) [15].

Figure I.36 : Utilisation du mortier de plâtre pour le crépissage des murs de Zaouïa de Guemar (Wilaya de l'oued) [15].

Figure I.37 : Nivellement du mortier de plâtre sur la surface de mur [15].

Partie B : Généralités sur les bétons de fibres

Figure I.38 : Comportement mécanique d'un matériau composite [30].

Figure I.39 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine [32].

Figure I.40 : Structure complète d'une fibre de lin dans un faisceau [31].

Figure I. 41: Quelques exemples de tissus de fibres végétales [35].

Figure I.42 : Essai de traction sur fibre unitaire. Exemples de courbes contrainte – déformation d'une fibre de verre E (diamètre : 12,41 μ m) et d'une fibre de lin (diamètre : 14,62 μ m). Longueur libre : 10 mm. Vitesse de sollicitation : 1 mm/min [37].

Figure I.43 : Fibres de chanvre. Développement de défauts transversaux par microflambage dans les zones en compression [31].

Figure I.44 : Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale [31].

Figure I.45 : Exemples de courbes contrainte-déformation pour des essais de traction réalisés sur des fibres de verre, de lin, de ver à soie (*Bombyx mori*) et d'araignée (*Argiope trifasciata*) [40].

Figure I.46 : Fibres de basalte [35].

Figure I.47 : Affaissement au cône d'Abrams en fonction du module de finesse [47].

Figure I.48 : Influence du pourcentage et de la longueur de fibres du palmier dattier sur la maniabilité des bétons de plâtre [28].

Figure I.49 : Influence du pourcentage et la longueur de fibres sur la maniabilité des bétons de fibres métalliques [43].

Figure I.50 : Variation du temps d'écoulement des mortiers en fonction des paramètres de fibres de polypropylène [51].

Figure I.51 : Détermination du rapport S/G optimal d'après Rossi [54].

- Figure I.52** : Détermination du rapport S/G optimal d'après **Serna-Ros** [47].
- Figure I.53** : Répartition des efforts de traction dans une fibre de part et d'autre d'une fissure centrale.
- Figure I.54**: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre en fonction du pourcentage de fibres du palmier dattier et pour différentes longueurs [19].
- Figure I.55** : Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité de fibres de durian avec différentes longueurs et les dimensions de grains de sable [58].
- Figure I.56** : Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour différents dosages en volume de fibres [59].
- Figure I.57** : Résistance à la traction de MDF(medium density fibers board) [60].
- Figure I.58** : Résultats de l'essai de traction par compression diamétrale [61].
- Figure I.59** : Variation de la résistance en traction par flexion des mortiers en fonction des paramètres de fibres de polypropylène [51].
- Figure I.60** : Variation de la résistance à la flexion du plâtre renforcé avec différentes longueurs de fibres [62].
- Figure I.61** : Comportement à la flexion de la matrice ciment renforcé avec les fibres de polypropylène (\square 7 jours, \times 28 jours) et des additions de polypropylène avec mélanine formaldéhyde (\circ 7 jours, \triangle 28 jours) [63].
- Figure I.62** : Variation du module de Young en fonction du pourcentage de fibres de coconut [70].
- Figure I.63** : Variation du module de Young en fonction de la concentration en fibres [71].
- Figure I.64** : Evolution de la résistance en flexion et du module d'élasticité d'une pate de ciment renforcée par des fibres de chanvre en fonction de la teneur en fibres [72].
- Figure I.65** : Panneau de dalle en Sol-ciment, quantité érodée 1.32 g. [73].
- Figure I.66** : Panneau de dalle en Sol ciment-fibre de sisal, quantité érodée 0.89 g. [73].
- Figure I.67** : Panneau de dalle en Sol ciment- fibre de polypropylène, quantité érodée 2.31g. [73].
- Figure I.68** : Conductivité thermique à sec de différents plâtres A, B,C et D renforcés avec différents type de fibres [77].

- Figure I.69 :** Evolution de la conductivité thermique avec la quantité et le traitement de fibres de bagasse [78].
- Figure I.70 :** Evolution de la chaleur spécifique avec la quantité et le traitement de fibres de bagasse [78].
- Figure I.71 :** Variation de la diffusivité thermique en fonction de volume de fibres d'ananas [79].
- Figure I.72 :** Variation de la chaleur spécifique en fonction de volume de fibres d'ananas [79].
- Figure I.73 :** Coefficients d'absorption des panneaux en composites à base de fibres de riz (30 wt.% of rice straw) [80].
- Figure I.74 :** Surface de rupture correspondante à une longueur de fibres $L = 25$ mm [49].
- Figure I.75 :** Surface de rupture correspondante à une longueur de fibres $L = 30$ mm [49].
- Figure I.76 :** Comportement mécanique en flexion 3 points d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de chanvre brutes (FIB) et des fibres de chanvre traitées avec une solution de soude (FIBNA), de chlorure d'aluminium (FIBAL) et de chaux (FIBCA) à 28 jours (A) et après 12 mois de vieillissement naturel (B) [72].
- Figure I.77 :** Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion 3 points de ciment renforcé par des fibres de conifères [81].
- Figure I.78 :** Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation des composites

- Figure II.1 :** Perméabilmètre de Blaine.
- Figure II.2 :** Dispositif utilisé de l'ATD et l'ATG couplée.
- Figure II.3 :** Analyse thermique différentielle des fines de sable.
- Figure II.4 :** Diffractomètre BRUKER, D₈ Advance.
- Figure II.5 :** Diffractogramme du sable de dune utilisé.
- Figure II.6 :** Essai d'équivalent de sable.

Figure II.7 : Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.

Figure II.8 : Courbe granulométrique du gravier utilisé.

Figure II.9 : Plaques en treillis de fibres de surface du palmier dattier.

Figure II.10 : Variation de l'absorption moyenne des fibres du palmier utilisées en fonction de la durée d'immersion dans l'eau.

Figure II.11 : Analyse chimique à l'état naturel de la fibre du palmier obtenue par MEB.

Figure II.12 : Diffractogramme de la poudre à l'état naturel de la fibre utilisée par les rayons X.

Figure II.13 : Observation d'une coupe transversale de la fibre du palmier par MEB.

Figure II.14 : Observation longitudinale des faisceaux de la fibre du palmier par MEB.

Figure II.15 : Observation des pores dans la fibre du palmier par MEB.

Figure II.16 : Observation d'une vue tangentielle de la fibre du palmier par MEB.

Figure II.17 : Machine universelle d'essai de traction des fibres de type INSTRON au sein du laboratoire LGCIE à L'INSA de Lyon.

Figure II.18 : Préparation des fibres du palmier dattier pour l'essai de traction.

Figure II.19 : Dispositif de traction de la fibre.

Figure II.20 : Comportement mécanique de la fibre du palmier dattier lors de l'essai de traction. (a) Déformation de la fibre par traction, (b) Rupture de la fibre par traction.

Figure II.21 : La fibre du palmier après l'essai de traction.

Figure II.22 : Evolution de la résistance à la traction de fibres de lin en fonction de la longueur des échantillons testés (losange : fibres techniques, triangle : fibres élémentaires séparées de manière standard, carré : fibres élémentaires Séparées à la main) [21].

Figure II.23 : Structure en faisceau d'une fibre de lin [21].

Figure II.24 : Microscope électronique à balayage Hitachi 800 équipé d'une microanalyse.

Figure II.25 : Etat de surface de la fibre du palmier Avant l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$.

Figure II.26 : Etat de surface de la fibre du palmier après l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$.

Figure II.27 : Dépôt des cristaux de gypse sur la fibre du palmier.

Figure II.28 : Pénétration du gypse dans les alvéoles de la fibre.

Figure II.29 : Influence du pourcentage de la chaux sur le temps de prise du plâtre utilisé [28].

Figure II.30 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton de plâtre témoin sans fibres [28].

Chapitre III : Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Figure III.1 : Presse de l'essai de compression.

Figure III.2 : Presse de l'essai de flexion.

Figure III.3 : Dispositif de la flexion 4 points.

Figure III.4 : Variation de la résistance à la compression du béton de plâtre en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques.

Figure III.5 : Variation de la résistance à la compression du béton de plâtre renforcé avec 1,5% de fibres de 30 mm de longueur en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques.

Figure III.6 : Variation de la résistance à la flexion du béton de plâtre dans le temps et pour différents milieux hygroscopiques.

Figure III.7 : Variation de la résistance à la compression du béton de plâtre renforcé avec 1,5% de fibres de 30 mm de longueur en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques

Figure III.8 : Variation de la perte de masse en fonction de nombre de cycles de séchage – humidification.

Figure III.9 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres à 28 jours (cœur de l'échantillon).

Figure III.10 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres à 28 jours (surface de l'échantillon).

Figure III.11 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres conservé 208 jours à l'air ambiant du laboratoire (cœur de l'échantillon).

Figure III.12 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres conservé à 208 jours à l'air ambiant du laboratoire (surface de l'échantillon).

Figure III.13 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres soumis à des cycles de séchage-humidification (90 cycles, cœur de l'échantillon).

Figure III.14 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres soumis à des cycles de séchage-humidification (90 cycles, surface de l'échantillon).

Figure III.15 : La calcite amorphe au milieu et le gypse qui l'entoure. (air ambiant du laboratoire).

Figure III.16 : Microanalyse de la partie calcite (air ambiant du laboratoire).

Figure III.17 : Microanalyse de la partie gypse par MEB (air ambiant du laboratoire).

Figure III.18 : Interface gypse- calcite (air ambiant du laboratoire).

Figure III.19 : Interface gypse-granulats (air ambiant du laboratoire).

Figure III.20 : Microanalyse des granulats siliceux par MEB (air ambiant du laboratoire).

Figure III.21 : Orientation aléatoire des cristaux de gypse (interface gypse-granulats).

Figure III.22: Cristaux de gypse sous forme d'aiguille avec une orientation préférentielle (air ambiant du laboratoire).

Figure III.23: Dégradation du gypse après du séchage –humification, Interface (gypse- granulats).

Figure III.24 : Dépôt de cristaux de gypse sur la surface des granulats siliceux (air ambiant du laboratoire).

Figure III.25 : Bonne adhérence fibre-gypse après le processus séchage –humidification.

Figure III.26 : Liaison performante entre la calcite - gypse avec la fibre utilisée (air ambiant du laboratoire).

- Figure III.27 :** Calcite peu cristallisée après le processus séchage –humidification.
- Figure III.28 :** Calcite plus cristallisée après la conservation à l’air ambiant du laboratoire.
- Figure III.29 :** Microanalyse de la partie calcite lors du processus séchage – humidification.
- Figure III.30 :** Vue générale sur la matrice du béton de plâtre fibré conservée 208 jours à l’air ambiant du labo.
- Figure III.31 :** Vue générale sur la matrice du béton de plâtre après 90 cycles de séchage-humidification.
- Figure III.32 :** Juxtaposition des cristaux bien enchevêtrés pour le béton de plâtre conservé 208 jours (28j à l’air ambiant du labo. et 180j dans l’humidité).
- Figure III.33 :** Les cristaux de gypse sont mal enchevêtrés pour le béton de plâtre soumis aux cycles de séchage- humidification.
- Figure III.34 :** Points de contact entre les cristaux de gypse lors du processus séchage-humidification.
- Figure III.35 :** Interface gypse-granulats après 90 cycles de séchage-humidification.
- Figure III.36 :** Fibre bien étirée après le processus séchage – humidification.
- Figure III.37 :** Etat de surface de la fibre du palmier soumise à 90 cycles de séchage humidification.
- Figure III.38 :** Aspect et état de surface des prismes en béton de plâtre témoin sans fibres et le béton de plâtre renforcés avec les fibres du palmier dattier avant l'essai de gel-dégel.
- Figure III.39 :** Etats de surface des prismes en béton de plâtre sans fibres et le béton de plâtre renforcés avec les fibres du palmier dattier (a) Après 1 mois de gel dégel, (b) après 2 mois de gel dégel.
- Figure III.40 :** Etats de surface après l’essai d’abrasion des échantillons de béton de plâtre et le béton de plâtre renforcé par les fibres du palmier dattier.
- Figure III.41:** Dispositif d’essai d’érosion à l’eau.
- Figure III.42:** Etats de surface après l’essai d’érosion des éprouvettes en béton de plâtre (a) et les éprouvettes en béton de plâtre renforcé de fibres du palmier (b).

- Figure III.43:** Etats de surface des échantillons immergés pendant deux semaines dans la solution $MgSO_4$.
- Figure III.44:** L'attaque de $MgSO_4$ de la matrice gypse pendant une semaine.
- Figure III.45:** Vue générale sur la matrice conservée à l'air ambiant du labo.
- Figure III.46:** Microanalyse de l'échantillon du béton de plâtre renforcé de fibres conservé une semaine dans la solution $MgSO_4$.
- Figure III.47 :** Etats de surface des échantillons après conservation, (a) 6 mois dans l'eau (a) 6 mois dans la solution de 1% de H_2SO_4 .
- Figure III.48 :** a-e Dégradation du plâtre due à l'effet de sel [33].
- Figure III.49 :** Effet des sels et des eaux de pluies sur la construction (Zaouïa de Ghemar) [34].
- Figure III.50 :** Essai de mesure de la conductivité spécifique sur l'échantillon béton de plâtre (sans fibres).
- Figure III.51 :** Etats de surface des échantillons avant l'essai d'efflorescence.
- Figure III.52 :** Etats de surface des échantillons après l'essai d'efflorescence.
- Figure III.53 :** Dépôt de chlore de sodium sur la fibre du palmier.
- Figure III.54 :** Pénétration du gypse dans l'alvéole de la fibre du palmier.
- Chapitre IV : Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier.**
- Figure IV.1:** Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.
- Figure IV.2:** Principe de la plaque chaude gardée.
- Figure IV.3 :** Dispositif de la plaque chaude gardée et la plaque chaude avec fluxmètres.
- Figure IV.4 :** Dispositif expérimental du fil chaud.
- Figure IV.5 :** Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk.
- Figure IV.6 :** Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «CT METRE» avec ses accessoires.
- Figure IV.7 :** (a) Sonde anneau utilisée, (b) essai de mesure de la conductivité thermique et la chaleur spécifique volumique des composites étudiés par le «CT METRE».

Figure IV.8 : Variation de la conductivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

Figure IV.9 : Variation de la conductivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

Figure IV.10: Variation de la chaleur massique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

Figure IV.11: Variation de la diffusivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

Figure IV. 12 : Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction pourcentages de fibres pour différentes longueurs.

Figure IV.13 : Variation de la porosité des composites étudiés en fonction du pourcentage et pour différentes longueurs de fibres.

Figure IV. 14 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle de **Assaad** ; (a) $L = 20$ mm , (b) $L = 30$ mm, (c) $L = 40$ mm.

Figure IV.15: Schéma représentative du modèle d'homogénéisation auto-cohérente dans le cas d'un matériau constitué de 3 composants.

Figure IV.16 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 20 mm de longueur de fibres.

Figure IV.17 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 30 mm de longueur de fibres.

Figure IV.18 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 40 mm de longueur de fibres.

Chapitre V : Etude du comportement phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Figure V .1 : Bruits aériens intérieurs.

Figure V.2 : Bruits solidiens intérieurs.

Figure V.3 : Différents types de bruits.

Figure V.4 : Comportement d'un bruit à la rencontre d'une paroi.

Figure V.5 : Transmission directe et transmission latérale.

Figure V.6 : Mesure de l'isolement acoustique entre deux locaux.

Figure V.7 : Les différents types de transmissions du bruit.

Figure V.8 : Comportement d'une onde en incidence oblique à la surface d'un matériau.

Figure V.9 : Comportement d'une onde en incidence normale à la surface d'un matériau.

Figure V.10 : (a) Déroulement de l'essai d'acoustique à l'aide de tube de Kundt,
(b) échantillons utilisés lors de l'essai.

Figure V.11 : Comparaison des coefficients d'absorption du son α du plâtre et béton de plâtre avec ceux du béton de ciment et du plâtre donnés par la littérature.

Figure V.12 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 20 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

Figure V.13 : Pénétration du gypse dans les alvéoles ouvertes de la fibre du palmier.

Figure V.14 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 30 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

Figure V.15 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 40 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

Annexes

Annexe I

Figure 1: Diagramme de potabilité de l'eau

Annexe II

Figure 1: Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre avec fibres du palmier conservée dans la solution $MgSO_4$.

Figure 2: Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre soumis à l'essai d'efflorescence.

Figure 3: Microanalyse de l'échantillon du béton de plâtre soumis à l'essai d'efflorescence.



NOTATIONS UTILISEES

ρ_{abs} : Masse volumique absolue.

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

M : Masse de l'échantillon.

V : Volume total de l'échantillon.

M_T : Masse totale de l'échantillon.

M_R : Masse du récipient.

M_0 : Masse du récipient et de l'eau.

M_1 : Masse du récipient, de l'eau et du plâtre introduit ;

P/E : Rapport plâtre eau.

E/P : Taux de gâchage.

h_1 : hauteur des grains solides sableux.

h_2 : hauteur des grains solides sableux + des impuretés argileuses.

EsV : Equivalent de sable visuel.

EsP : Equivalent de sable au piston.

C_A : Capacité d'absorption d'eau.

M_h : Masse de l'échantillon après imbibition par l'eau.

M_s : Masse sèche de l'échantillon.

M_f : Module de finesse.

R_{cu} : Refus cumulé en % sur les tamis.

M_1' : Masse de l'échantillon du gravier avant lavage.

M_2' : Masse de l'échantillon du gravier après lavage et séchage.

I (%): Degré d'impureté du gravier.

L_a : Coefficient de Los-Angeles.

m: Masse des éléments inférieurs à **1.6 mm** produits au cours de l'essai.

HR : Humidité relative.

σ_t : Résistance à la traction.

F : Charge maximale enregistrée lors de l'essai de traction sur la machine.

S : section moyenne de la fibre.

S/G : Rapport sable gravier.

S/P : rapport sable plâtre.

(S/G)_{opt} : Composition granulaire optimale.

A : Affaissement au cône d'Abrams.

σ_f : Résistance à la flexion.

F : La charge de rupture en flexion 04 points.

R_{ci} : Résistance à la compression initiale (avant l'essai de gel- dégel).

R_{cg} : Résistance à la compression finale (après l'essai de gel- dégel).

λ_R : Perte en résistance à la compression.

M_i : Masse initiale de l'éprouvette (avant l'essai de gel- dégel).

M_g : Masse finale (après l'essai de gel- dégel).

τ_m : Perte en masse.

ΔV : Variation du volume de l'échantillon.

M₁ : Masse de l'éprouvette avant l'immersion dans l'acide sulfurique.

M₂ : Masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'acide sulfurique.

λ : Conductivité thermique.

Q : Densité de flux de chaleur.

T : Température.

C : Chaleur spécifique.

a : Diffusivité thermique.

b : Effusivité thermique.

ρ : Masse volumique du béton.

Φ : Porosité.

λ_{eff} : Conductivité thermique effective.

λ_s : Conductivité thermique de la phase solide.

λ_f : Conductivité thermique de la phase fluide.

c : Coefficient de correction.

Θ : fraction volumique des fibres du palmier.

δ : fraction volumique de la matrice solide.

L : Longueur de fibres.

α : Coefficient d'absorption du son.

Introduction Générale

Introduction générale

Le plâtre est un matériau de construction très répandu qui résulte de la déshydratation du gypse par un processus industriel et qui ne produit que de l'eau comme résidu. C'est donc un matériau de construction qui s'intègre parfaitement à la logique du développement durable.

Le plâtre se présente sous la forme d'un matériau poreux à texture désordonnée. Sa microstructure est formée d'un assemblage de cristaux de gypse aléatoirement enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions intercrystallines. Les points forts du plâtre, pris, par rapport aux autres matériaux de construction, sont essentiellement sa faible densité apparente et sa grande porosité (~50%) qui lui confèrent de très bonnes propriétés d'isolation thermique et phonique. La conductivité thermique du plâtre est de l'ordre de 0.26 W.m-1, contre 1.15 W.m-1 pour le ciment et 50 W.m-1 pour l'acier. Par ailleurs, ce matériau présente un pouvoir de régulation hygrométrique à l'intérieur des maisons et une bonne résistance au feu (présence d'eau de structure) et tout cela pour un faible coût de production.

Longtemps utilisé comme enduit ou élément décoratif, les techniques d'utilisation ont évolué et son emploi s'est diversifié. L'avenir est dans la réalisation de produits préfabriqués nouveaux et performants avec un cahier de charges toujours plus contraignant. Il est donc nécessaire de développer des nouvelles techniques de caractérisation permettant de faire une corrélation entre sa microstructure et son comportement à court et à long terme.

Pourtant, de nombreux reproches sont faits à ce matériau et ils relèvent tout de ses propriétés mécaniques et de sa sensibilité à l'eau. Le gypse a un comportement défini comme élastique fragile, c'est à dire que sa rupture survient pour des déformations relativement minimes et provoque en plus des fissurations assez étendues. L'amélioration de la résistance à la fissuration du gypse est donc un problème essentiel auquel la science des matériaux composites est venue, tout naturellement, apporter une réponse puisqu'il s'agit de sa principale préoccupation. L'idée directrice est d'introduire un matériau sous forme de fibres dans un liant appelé matrice. Il est donc possible d'obtenir des matériaux extrêmement résistants à partir d'une fibre et d'une matrice élastique fragile.

La fibre de verre a d'abord fait son apparition dans le plâtre, mais il s'agit d'un renfort onéreux car il alourdit considérablement les plaques, ce qui les rend moins pratiques d'utilisation sur les plus gros chantiers. Il est donc intéressant d'étudier d'autres fibres susceptibles de jouer le rôle de renfort. Les fibres naturelles, comme celles du palmier dattier provenant d'une source renouvelable, sont une voie de recherche importante.

Les objectifs visés par cette étude est la formulation d'un matériau durable et isolant tout en étudiant l'influence de l'ajout des agrégats et des fibres du palmier dattier sur les propriétés du matériau à long terme pour une meilleure exploitation d'une part et pour apporter des performances d'isolation thermique et acoustique d'autre part.

Ce travail comporte cinq chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre est une recherche bibliographique qui se divise en deux parties :

- La première partie est une description du plâtre, de ses caractéristiques et de ses conditions de mise en œuvre comme étant pâte pure, mortier ou béton de plâtre. On décrit aussi leurs méthodes de composition ainsi que leurs domaines d'application;
- La deuxième partie rassemble une diversité des recherches effectuées dans le monde et cela dans le but de formuler et de caractériser le comportement physico- mécanique, thermique et acoustique des bétons et des matrices minérales renforcés avec différents types de fibres.

Le deuxième chapitre concerne la caractérisation des matières premières utilisées et regroupe des résultats issus de la bibliographie et des résultats expérimentaux obtenus durant cette étude. Les constituants minéraux de la matrice liante, à savoir le plâtre et la chaux ajoutée comme retardateur de prise, seront analysés. Leurs compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les mécanismes de prise, qu'ils induisent, seront notamment décrits. Les propriétés chimiques, physiques et mécaniques des fibres végétales sélectionnées ainsi que leur comportement dans un milieu gypse à long terme seront étudiés. Les granulats utilisés tels que le sable de dune et le gravier concassé ont été également caractérisés dans ce chapitre. Le choix de la méthode de formulation des composites adaptée dans nos précédentes études a été présenté.

Le troisième chapitre étudie la durabilité des composites élaborés par la vérification de leurs propriétés à long terme après leur exposition à un vieillissement par des cycles de séchage-humidification, en les conservant dans des différents milieux hygroscopiques. On s'est également intéressé à l'examen de leur tenue vis-à-vis des cycles gel –dégel et la résistance aux sulfates, acides, efflorescences, l'abrasion et l'érosion.

Le quatrième chapitre est consacré à la mesure des propriétés thermo- physiques du plâtre, béton de plâtre et les bétons de plâtre renforcés avec les fibres du palmier dattier tout en étudiant l'influence du dosage et de la longueur des fibres sur ces dernières et aussi à la validation de quelques modèles mathématiques estimant la conductivité thermique de ces matériaux par comparaison avec les valeurs expérimentaux.

Dans le dernier chapitre, nos études se penchent sur l'étude du comportement phonique, il est orienté vers la détermination des coefficients d'absorption du son des composites étudiés en les comparant avec d'autres matériaux de construction.

Enfin, on présente une conclusion générale sur l'étude élaborée et cela d'après les résultats expérimentaux obtenus tout en donnant des recommandations à prendre en considération dans les futures recherches pour une meilleure exploitation de ce matériau.

CHAPITRE I

Recherches Bibliographiques

*Partie A: Etude du plâtre, mortier et
béton de plâtre*

Partie A : Etude du plâtre, mortier et béton de plâtre

I. Introduction

Le plâtre est connu depuis la plus haute antiquité. Il a été utilisé dans les travaux de jointement des cloisons montées en plâtre pur ou mêlé de matériaux fibreux tel que de la paille ou du crin et dans les travaux de revêtement des parois intérieures etc. L'emploi du plâtre n'a cessé de se répandre en s'étendant au revêtement des plafonds et à la décoration et en mélange avec de la chaux au revêtement extérieur. A l'heure actuelle, outre ses emplois traditionnels, le développement du plâtre est entré dans une phase industrielle, avec en particuliers la production d'éléments préfabriqués d'une part et la mise en œuvre par projection d'autre part [1].

II. Caractérisation des poreux

II.1. Les poreux

Dans cette étude, nous définissons les matériaux poreux comme étant des systèmes interraciaux, poly phasiques, dont l'une des phases est solide (Figure I.1). Par « solide », nous entendons un ensemble d'atomes ou de molécules ayant une mobilité restreinte et possédant un chemin de percolation continu d'un bout à l'autre de l'échantillon. Par exemple, un gel de polymère sera considéré comme solide, vu qu'une molécule de polymère prise au hasard ne peut pas explorer tout l'espace à cause des liaisons avec ses voisins. Un verre, même s'il est par définition « un liquide sous-refroidi figé », constitue pour nous un solide. Au contraire, les molécules d'eau dans un bécher peuvent explorer tout l'espace par mouvement brownien : elles constituent donc un liquide. Pour nous, une suspension colloïdale, pourtant constituée d'une phase solide et d'une phase liquide, ne constitue pas un milieu poreux par absence de chemin de percolation solide continu. Par contre, un empilement de billes constitue un milieu poreux grâce à la présence de ce chemin de percolation.

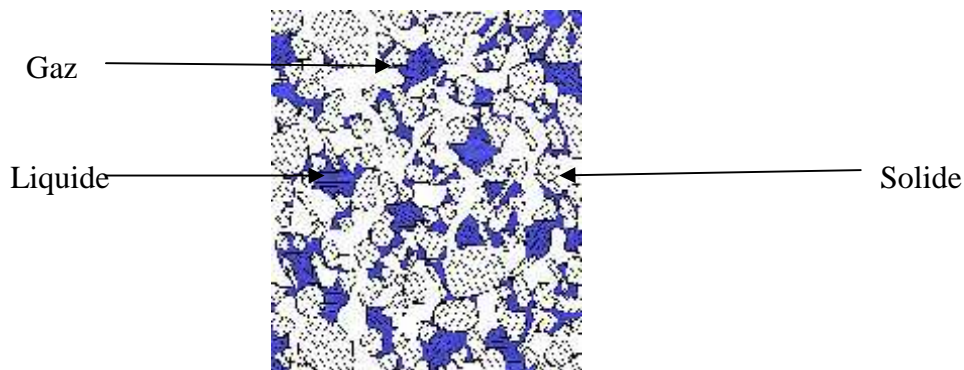


Figure I.1 : Exemple de structure poreuse (coupe 2D) [2].

La plupart des propriétés macroscopiques d'un matériau poreux (résistances mécaniques, isolation thermique ou phonique) sont gouvernées par le nombre, la taille et la forme des pores

ainsi que leur connectivité. Selon l'IUPAC (*), la classification des pores en fonction de leur taille est la suivante :

Tableau 1.1 : Classification de la porosité selon l'IUPAC [2].

Diamètre des pores	Classe
< 2 nm	microporosité
de 2 à 50 nm	mésoporosité
> 50 nm	macroporosité

(*) IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry.

II.2. Gypse

II.2.1. La Pierre à plâtre

La pierre à plâtre est une roche sédimentaire de structure cristalline, 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 déshydraté très abondant, qui répond à la formule chimique $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ correspondant à 79,07 % de sulfate de calcium associé à 20,93 % d'eau [1]. Cette formule s'applique aussi à la phase artificielle que constitue le gypse cuit et réhydraté [3]. Il peut provenir de gisements exploités sous forme de carrières, ou bien récupéré sous forme de sous-produit (phosphogypse).

La classification de la pierre à plâtre se fait selon sa composition minéralogique (teneur en gypse T_g) et chimique (teneur en eau de cristallisation T_c). Tableau I.2.

Tableau I.2 : Classification de la pierre à plâtre [3].

Classe	Composition minéralogique	Composition chimique
	T_g : % en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	T_c : % en eau de cristallisation
I	$T_g \geq 90$	$T_c \geq 18,83$
II	$80 \leq T_g \leq 90$	$16,74 \leq T_c \leq 18,83$
III	$75 \leq T_g \leq 70$	$14,65 \leq T_c \leq 16,74$
IV	$0 \leq T_g \leq 80$	$11,51 \leq T_c \leq 14,65$

Pour la production du plâtre, il est recommandé d'utiliser la pierre à plâtre dont la teneur en gypse est supérieure à 70 % (classe I, II et III).

Le sulfate de calcium déshydraté ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) cristallise dans le système monoclinique (Figure I.2).

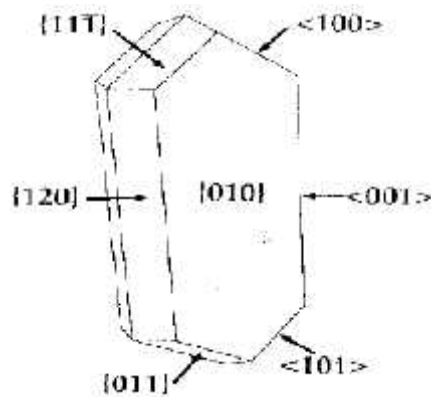


Figure I.2 : Morphologie du cristal de gypse [2].

Sa structure révèle un édifice cristallin construit sur un empilement de deux types de feuillets qui s'alternent parallèlement au plan (010). Les doubles feuillets d'ions calcium Ca^{+2} et sulfate SO_4 (tétraèdre avec un atome de soufre au centre des atomes d'oxygène) sont séparés par des doubles feuillets de molécules d'eau. Cet arrangement explique le clivage très aisé des cristaux de gypse d'orientation (010). Le gypse comporte des liaisons ioniques dans les feuillets ($\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4$) dues aux différences de charges électriques, (liaisons fortes), et des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions sulfate, l'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion calcium. Figure I.3 montre la structure cristalline du gypse.

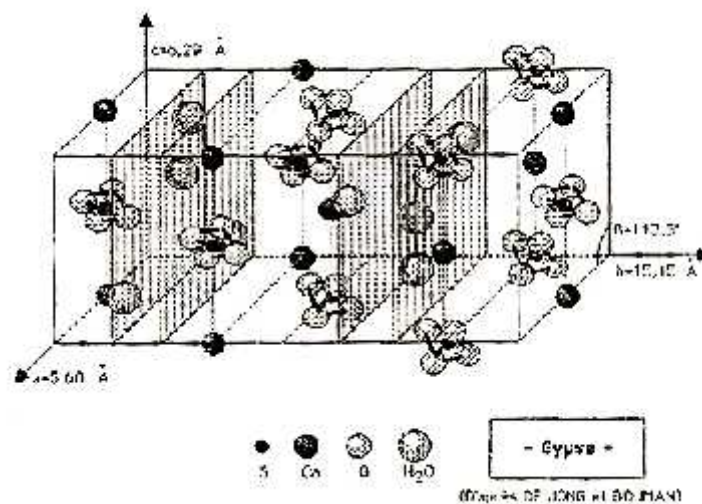


Figure I.3 : Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman [2].

II.2.2. Formes du gypse

Il existe différentes formes de gypse comme : gypse cristallisé (sélénite) fibreux, massif ou saccharoïde albâtre (Figure I.5), Pied d'alouette (Figure I.6), Les cristaux souvent gros, généralement aplatis ou prismatiques et allongés, la macle en fer de lance (Figure I.7) [9].

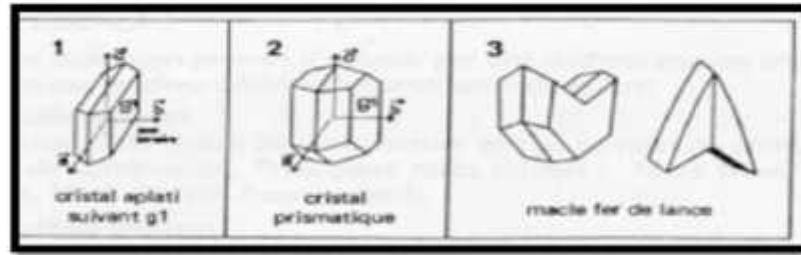


Figure 1.4 : Formes du gypse [4].



Figure 1.5 : Gypse, saccharoïde [5].



Figure 1.6 : Gypse, Pied d'alouette [4].



Figure 1.7 : Gypse, la maclé en fer de lance [4].

II.2.3. Types de gypse naturel

Parmi les variétés du gypse on peut citer :

II.2.3.1. Sélénite : Nom venant du grec Sélène, signifiant Lune. Ce terme désigne un gypse en cristaux transparents, bien formés, isolés ou groupés, pouvant atteindre plusieurs mètres de développement.

II.2.3.2. Ordite : Qui est une pseudomorphose de gypse d'un minéral inconnu, découverte à Orda, Permskaya Oblast, Oural, Russie.

II.2.3.3. Albâtre : Qui est un gypse en masses compactes très finement grenues. Son nom viendrait peut être de la ville égyptienne de Alabaston également l'albâtre lorsqu'il est pur est translucide et utilisé traditionnellement comme vitrage au Yémen.

II.2.3.4. Gypse saccharoïde : Dont le nom dérive du grec saccharose, sucre, qui est un gypse en masses granulaires pulvérulentes grains fins, blancs ou délicatement ombrés, souvent colorée contenir des traces d'argile, d'oxyde de fer, de calcite (Ca CO_3) ou d'anhydrite (Ca SO_4).

II.2.3.5. Gypse fibreux : Qui est un gypse en couches à fibres parallèles, ou en concrétions à fibres courbées et agrégats cohérents avec une structure fibreuse.

II.2.3.6. Rose des sables : Gypse en cristaux lenticulaires, plats, à inclusions sableuses, disposés en rose et mêlés au sable du désert (dune) [5].



Figure 1.8 : Gypse, variété sélénite [5].



Figure 1.9 : Gypse, Sebkhah de Ouargla [5].



Figure 1.10: Gypse, variété anhydrite [5].

II.2.4. Exploitation du gypse

Il est exploité de deux manières, selon la structure des gisements : Soient exploitations souterraines ou à ciel ouvert, sont pour des raisons juridiques, liées à la propriété du sous-sol, dénommées carrières.

II.2.4.1. Exploitation souterraine

Lorsque celui-ci se trouve à un niveau trop profond, une exploitation souterraine est privilégiée de façon classique selon la méthode des chambres et piliers. Il s'agit d'extraire les couches inférieures en creusant des galeries, qui sont ensuite comblées par des matériaux inertes une fois l'exploitation terminée. Mais cette méthode permet seulement d'exploiter un tiers du gypse avec un taux de récupération de 30%, qui se déploie en plusieurs couches [6].



Figure 1.11 : Galeries souterraines à Vaujours [6].

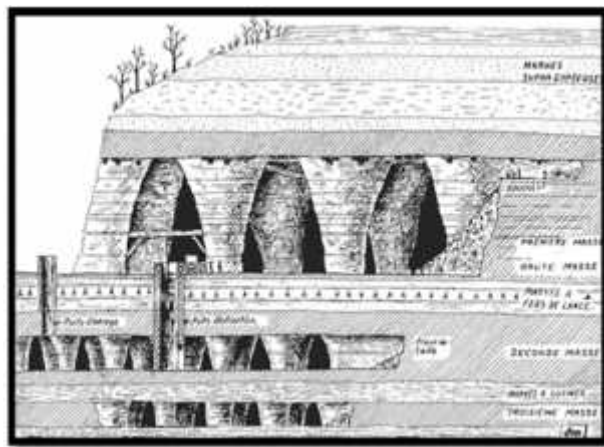


Figure 1.12 : Schéma montrant l'exploitation des trois masses de gypses reliées par des puits d'extraction [6].

II.2.4.2. Exploitation à ciel ouvert

Lorsque le gisement est à une petite profondeur, l'exploitation se fait à ciel ouvert, dans les carrières, pour extraire les différentes couches en étages, dont la hauteur est en fonction de l'épaisseur de la couche de gypse. Cette méthode permet d'exploiter la totalité du gypse. Lorsqu'un gisement est épuisé, la carrière est réhabilitée pour recréer un ensemble le plus proche possible de l'état initial du terrain.



Figure 1.13 : Exploitation à ciel ouvert [4].

Le tableau I.3 présente quelques exploitations du gypse en Algérie.

Tableau. I.3 : Quelques exploitations du gypse en Algérie [7].

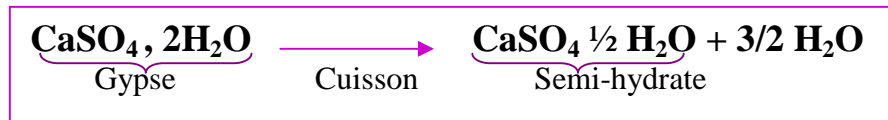
Wilaya	Nom de l'exploitation	Activités
ALGER	SCAL SPA SOCIÉTÉ DES CIMENTS	Extraction et préparation du gypse
	ZIDANE MARBRE	Exploitation de marbre et gypse
BATNA	CARRIÈRE DE PLÂTRE BOUCHARÈB HEDDA EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
	CARRIÈRE PLÂTRE BELLAHCÈNE	Exploitation de gypse pour plâtre
BÉJAÏA	BENAMARA EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
BISKRA	ENTREPRISE DE PLÂTRE ET DÉRIVÉS SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
	PLÂTERIE EL GHAZAL EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
BOUIRA	ENFA PLÂTRE (GYPSE, PLÂTRE) SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCC SPA	Exploitation de gypse pour ciment
CONSTANTINE	SPDE SPA	Exploitation de gypse pour ciment
GHARDAÏA	GHARDAÏA PLÂTRE SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	PLÂTRE DU SUD SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
	SPDC SPA PLÂTRERIE DE GHARDAÏA FILIALE ERCC	Exploitation de gypse pour plâtre
GUELMA	GYPSE EN NADOR EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
KHENCHELAA	IKHLASSE SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
MASCARA	E.MA.COEPE (UNITÉ PLÂTRIÈRE D'OGGAZ)	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCO EPE/SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
MILA	BOUSBAË ET AÏSSAOUI (GYPSE EL HASSI AÏSSAOUI ET ASSOCIÉS) SNC	Exploitation de gypse pour plâtre
	SOPLAT SPASOCIÉTÉ DES PLÂTRES DE GRAREM GOUGA	Exploitation de gypse pour plâtre
M'SILA	CHALLA PRODUCTION DE PLÂTRE SARL	Exploitation de gypse pour construction
	EL DJABES (DOKMANE ABDELATIF) EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
ORAN	ERCO PLÂTRE (SODEPAC) SPA	Exploitation de gypse pour plâtre et ciment
SÉTIF	GUELLAL PLÂTRE D'OR SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	GUESMIA D'EXTRACTION ET PRÉPARATION DE GYPSE EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
TÉBESSA	CARRIÈRE DYR EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
	MANDRA SOUTIRAGE ET PRÉPARATION DE SOL SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
TISSEMSILT	PLÂTRIÈRE DE SIDI BOUTOUCHENT SARL	Exploitation de gypse pour plâtre

II.2.5. Plâtre

Le plâtre résulte de la déshydratation et la pulvérisation plus ou moins poussée du gypse, mis en contact avec l'eau, le plâtre se réhydrate pour reformer le sulfate de calcium déshydraté qui a la même composition chimique que le gypse dont il est issu.

II.2.5.1. Principe de fabrication

Le principe de fabrication du plâtre est simple, il est défini par la réaction chimique suivante :



Après broyage et cuisson (110-140 °C), le gypse naturel conduit à la formation de la poudre d'hémihydrate (appelée aussi semihydrate) de formule brute ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Ce matériau possède une structure cristalline très proche de celle du gypse, formé d'empilements de feuillets de ($\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4$ et de molécules d'eau). Selon les conditions de pression et de vapeur d'eau imposées, deux phases hémihydratées peuvent être obtenues.

Le procédé par voie humide s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau, dans des autoclaves, sous 2 à 7 bars, pendant quelques heures. Dans ce cas, la formation d'hémihydrate est régie par un mécanisme de dissolution/recristallisation en milieu liquide. Une phase très bien cristallisée, non poreuse, constituée de cristaux bien individualisés et facilement indexables est obtenue (Figure I.14). C'est l'hémihydrate β . Il nécessite un taux de gâchage faible ($e/p \sim 0.4$) et donne lieu à des plâtres dits « durs », ayant de très bonnes résistances mécaniques (jusqu'à ~ 35 MPa). Ils sont souvent utilisés pour la formulation de plâtres spéciaux (ex. moulages dentaires, fabrication des céramiques...).

Le procédé par voie sèche, le plus utilisé, car moins coûteux est réalisé à la pression atmosphérique. L'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et nous obtenons un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux (Figure I.14). C'est l'hémihydrate α . Il nécessite un taux de gâchage (e/p) important, en général $e/p \sim 0.6$. Il s'agit du composé principal des plâtres courants, de faible résistance mécanique et utilisés en tant que matériaux de construction.

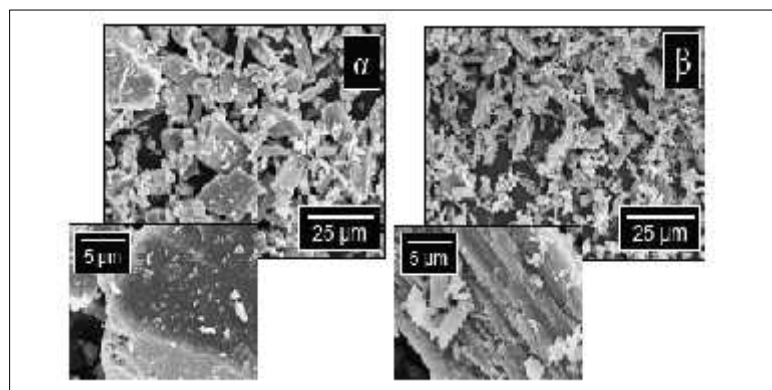


Figure I.14 : Images MEB des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge) obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche (β) [2].

Lorsque la température de cuisson est supérieure à 150°C, la déshydratation plus poussée du gypse provoque la formation d'anhydrite III, de formule brute ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, avec 0.06 0.11). Cette variété est difficile à obtenir à l'état pur. Cette phase s'hydrate très facilement en gypse et peut jouer le rôle de catalyseur de l'hydratation de l'hémihydrate. A plus haute température, d'autres phases peuvent apparaître comme l'anhydrite II et I, très difficilement réhydratables. Ces différentes phases du système $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$, ne possèdent pas la même faculté de dissolution en fonction de la température (Figure I.15). Dans le cas du gypse, il s'agit d'une véritable solubilité que nous pouvons atteindre soit par dissolution, soit par cristallisation. En ce qui concerne l'hémihydrate, les courbes représentées correspondent à la concentration la plus fréquemment atteinte par dissolution et non à un véritable équilibre thermodynamique entre les cristaux d'hémihydrate et la solution saturée qui les entourent.

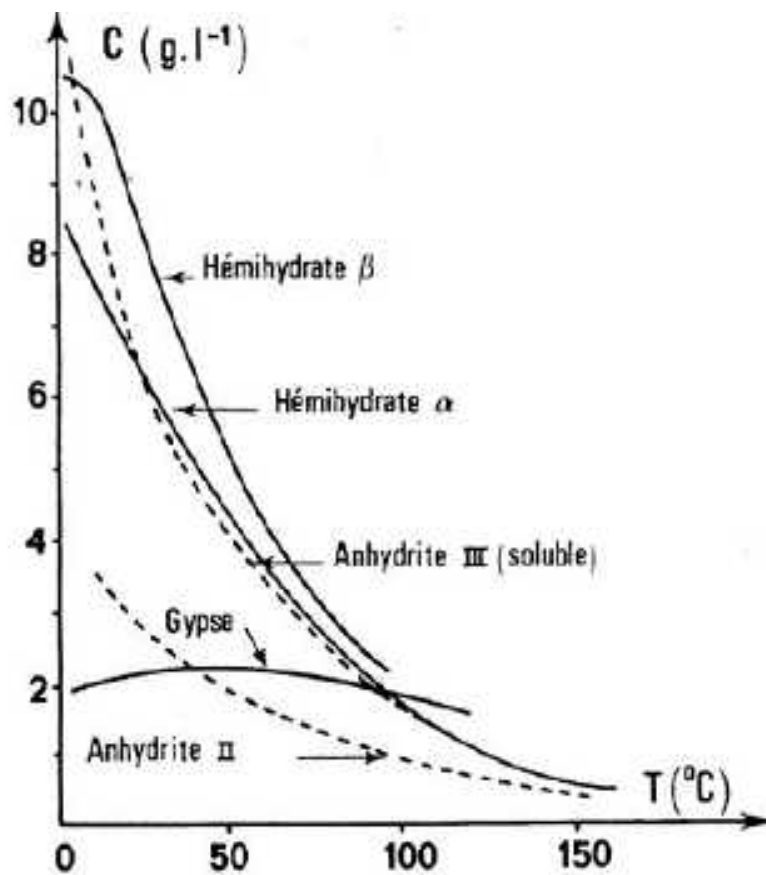


Figure I.15 : Solubilité des différentes phases du sulfate de calcium en fonction de la température [2].

Le phénomène de déshydratation du gypse en fonction de la température est assez complexe. Le tableau I.4 donne les différents composés pour des températures croissantes.

Tableau I.4 : Différents composés obtenus en fonction des températures de cuisson [3].

Nom du produit	Variété chimique	Température d'obtention	Caractéristiques
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Naturelle	$d = 2,31$
Semi-hydrate	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	110 à 180 °C	Selon procédé de cuisson 2 variétés : α : vapeur saturante, forte résistance, stable compact $d = 2,76$ β : vapeur sèche, résistance plus faible, floconneuse $d = 2,62$
Anhydrite	CaSO_4 III	170 à 250 °C	Variété instable à la température ordinaire $d = 2,58$
Anhydrite insoluble	CaSO_4 II	400 à 600 °C	Identique à l'anhydrite naturelle, appelé plâtre hydraulique $d = 2,93$ à $2,97$
Plâtre de plancher	CaSO_4 I	600 à 1200 °C	Plâtre cuit à mort, prise très lente

d : densité absolue des différents composés.

La température de cuisson et les proportions des mélanges des composés permettent d'obtenir les différentes variétés de plâtre, on distingue :

1) Les plâtres pour agglomères gros et fins

Ils sont à la base de semi hydrate pur contenant parfois un pourcentage d'anhydrite soluble très réactif afin d'accélérer le temps de prise

2) Les plâtres gros de construction

Ils contiennent un fort pourcentage de plâtre dit «hydraulique» (anhydrite I) et présentent une nette variation dimensionnelle après 7 et 28 jours.

3) Les plâtres fins de construction

Ils ont les mêmes caractéristiques que les plâtres gros de construction et se différencient par une mouture plus fine due à un broyage peu serré avec tamisage.

4) Les plâtres à mouler et plâtres spéciaux

Ils sont très fins, leur cuisson, leur mélange et leur contrôle de mouture ainsi que leur temps de prise sont faits avec les plus grands soins. La teneur en SO_3 de sulfate de chaux doit être d'au moins 45 % et celle de l'eau combinée inférieure à 8,5 %.

II.2.5.2. Propriétés physiques du plâtre

II.2.5.2.1. 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 suivantes :

- Adsorption d'eau sur le semi hydrate;
- Eclatement des grains du semi hydrate;
- Dissolution d'une partie du semi hydrate;
- Précipitation du gypse, avec dissolution simultanée de semi hydrate jusqu'à consommation complète de celui-ci.

La vitesse de cette réaction est due à la différence de solubilité apparente entre le semihydrate et le déshydrate (respectivement environ 9g/l et 2g/l à 25°C). Pour ce dernier, il s'agit d'une solubilité vraie, dans le sens où elle résulte de l'établissement d'un équilibre thermodynamique. En ce qui concerne le semihydrate, instable dans l'eau, la valeur exacte dépendra de la température et de la vitesse de solubilisation.

L'acide citrique retarde la prise du plâtre avec modification radicale des faciès cristallins du plâtre durci et ses propriétés mécaniques deviennent si faibles.

La chaux aérienne (éteinte) outre son effet retardateur, elle augmente la résistance mécanique et l'imperméabilité du plâtre et protège l'acier contre la corrosion en réduisant l'acidité du plâtre.

Les épaississeurs et rétenteurs d'eau qui augmentent la consistance de la pâte permettant ainsi d'avancer le début d'emploi du plâtre (amidon).

Les fluidifiants qui sont ajoutés au plâtre ont pour effet de lui conférer avec moins d'eau de gâchage une plasticité répondant à l'emploi souhaité. Ils permettent ainsi d'obtenir des plâtres gâchés de forte densité et de haute dureté.

a) Les facteurs agissant sur la prise

- La vitesse de prise est fonction de la constitution du plâtre;
- La prise est retardée par une augmentation de la quantité d'eau de gâchage;
- Un malaxage prolongé diminue le temps de prise, il ne doit pas dépasser une minute.

b) Variations de volume accompagnant la prise

Il est intéressant d'étudier les variations de volume qui accompagnent la prise et d'abord celles qui se rattachent à la phase initiale d'hydratation. Après la phase initiale d'hydratation, il se produit bien, liée aux phases de cristallisation et de durcissement, une augmentation de volume du produit en voie de cristallisation du fait du développement des cristaux de dihydrate formés qui dilatent le squelette de la masse poreuse. Mais ce gonflement est de quelque 0,2 à 1,5 % du volume apparent de la pâte, c'est-à-dire négligeable par rapport aux variations du volume absolu,

et sans influence appréciable sur la porosité finale. Cette porosité de constitution est un important facteur parmi ceux qui rendent compte des propriétés isolantes du plâtre. Par ailleurs, l'expérimentation montre la faible et brève contraction de la pâte qui accompagne la diminution des volumes apparents, dans les premières minutes, avant que l'épaississement ne s'y oppose. Cette contraction est vite annulée et dépassée par le gonflement plus important qui apparaît dès que l'hydratation atteint 5 à 10 %. Disparue avant le temps d'emploi du plâtre, la contraction est sans conséquence pratique. Le gonflement d'hydratation dû à la croissance des cristaux est une caractéristique générale du plâtre favorable à l'adhérence, à la bonne tenue au retrait et au moulage. Quand la pâte est baignée d'eau, la contraction ne se produit pas et le gonflement de la pâte apparaît dès le début de la prise. Le gonflement est facile à observer. Relativement important et prolongé, il est un peu plus fort lorsque l'on opère sur une pâte baignée d'eau, cette eau freinant le tassement du solide. Le gonflement peut d'ailleurs varier sensiblement avec différents paramètres : conditions de gâchage, atmosphère de conservation, etc. Il augmente toujours avec la proportion du plâtre dans la pâte. Le gonflement du semi-hydrate intervient rapidement, comme son hydratation, terminée dans les deux heures suivant le gâchage, alors que celui de l'anhydrite insoluble obtenu à température sensiblement plus élevée est encore négligeable au bout de 2 h et n'intervient que très lentement.

II.2.2.5.2. Séchage

Comme nous l'avons dit, le gâchage du plâtre exige en pratique, une quantité d'eau très supérieure à celle strictement nécessaire à l'hydratation. Le séchage s'effectue soit naturellement en laissant l'eau excédentaire s'éliminer d'elle-même, l'équilibre s'établissant entre le dihydrate obtenu et le milieu ambiant naturel, soit artificiellement en commandant et favorisant cette élimination par exposition de la masse à une ambiance artificielle contrôlée.

Dans les deux cas, il importe naturellement, pour que la prise puisse s'effectuer, que les conditions de séchage ne maintiennent à tout moment et en tout point du produit une quantité d'eau suffisante pour le bon développement de l'hydratation et, par conséquent de la cristallisation et du durcissement [8].

II.2.2. 5.3. Origine des propriétés mécaniques du plâtre pris

Le plâtre pris est un matériau poreux, constitué principalement de cristaux de gypse enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions inter cristallines. Sa microstructure finale dépend de la porosité totale, de l'organisation de son réseau poreux (distribution de tailles de pores), de la texture cristalline (enchevêtrement, taille et faciès des cristaux) et des forces d'adhésion mises en jeu. Par ailleurs, Meille [9] pense que ce sont les points de contacts entre cristaux qui gouvernent la tenue mécanique de ce matériau. Ce phénomène est confirmé par la présence de cristaux de gypses désenchevêtrés et non cassés sur les faciès de rupture des échantillons de plâtre pris. En effet, au cours de la prise, les cristaux de gypse apparaissent, croissent et s'enchevêtrent pour former une structure solide continue et résistante. La prise du plâtre est également associée à des variations volumiques importantes [10] (Figure I.16).

- la transformation de l'hémihydrate en gypse entraîne une diminution volumique, appelée retrait d'hydratation (où retrait Le Atelier). Ce retrait est estimé à ~ 10% du volume initial de la pâte (mélange eau + poudre d'hémihydrate).
- lors de leur croissance, les cristaux s'allongent et se repoussent les uns les autres (au niveau des points de contacts) entraînant une expansion qui souvent compense et dépasse

le retrait d'hydratation, c'est le gonflement de prise, qui crée des contraintes internes et des points d'ancrages mécaniques.

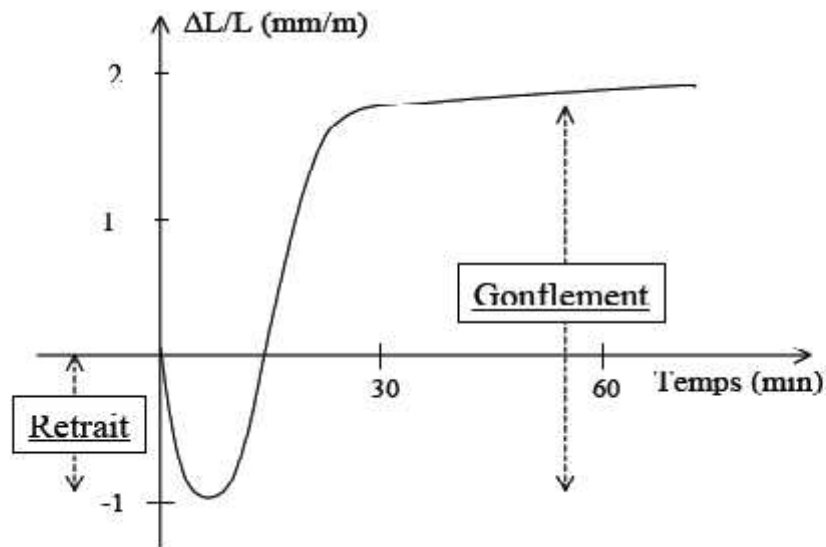


Figure I.16 : Variation volumique du plâtre au cours de la prise [2].

Pour **Finot [11]**, les forces intercrystallines diffèrent selon les faces du cristal de gypse. Ces résultats ont été obtenus par des mesures AFM (Microscopie à Force Atomique) entre un premier cristal de gypse servant de substrat et un deuxième collé sur la pointe du microscope.

- La face (010) dont la surface est tapissée de molécules d'eau, est fortement réactive, avec un réarrangement de matière possible en présence d'eau liquide.
- La face (120) a une densité de charge globalement importante, pouvant induire des liaisons fortes avec d'autres faces.
- Les faces en bout de cristal (-101) ont une charge globalement neutre et de faibles interactions (de type Vander Waals) sont échangées avec les autres faces.

La prise des liants hydrauliques en général (plâtre, ciment,...) est assurée par des forces de corrélation ionique. Des forces plus faibles (Van der Waals et capillaires) peuvent jouer un rôle dans la cohésion, mais ne suffisent pas à elles seules à expliquer la tenue du matériau pris. La présence de forces électrostatiques plus intenses est nécessaire. Par contre, pour **Chappuis [12]**, la cohésion de ce type de matériau peut être assurée par des fines couches d'eau entre les cristaux, dont l'épaisseur varie entre 1.5 nm (à l'état sec) et 10 nm (à 95% d'humidité relative). Dans ce modèle l'épaisseur d'eau est fixée par la théorie DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek). En résumé et selon plusieurs auteurs [9, 13,14], la prise de ce matériau peut être expliquée par l'existence de deux types de liaisons principales :

- les ancrages mécaniques : ce sont des liaisons de type « tenon-mortaise » résultant des contraintes résiduelles suite aux variations dimensionnelles subies par le matériau lors de la prise (Fig. I.17).

- les interactions entre cristaux au sein d'agrégats formés de plusieurs aiguilles ou entre aiguilles de différents agrégats : ce sont des forces d'adhésion de surface qui peuvent être électrostatiques, de corrélation ionique, capillaires ou de Vander Waals.

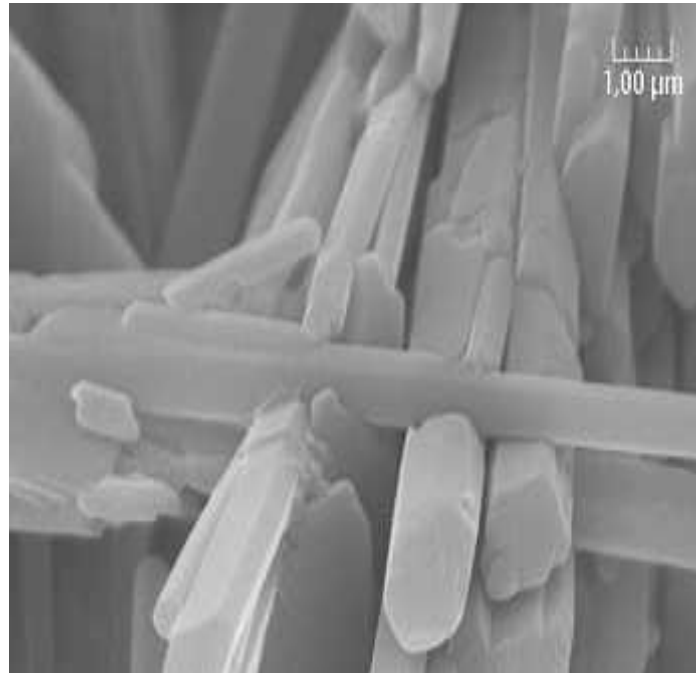


Figure I.17 : Image MEB (Microscope JEOL 5800LV / 15 kV) d'une fracture de plâtre pris ($e/p=0.8$) montrant des points d'ancrages mécaniques entre plusieurs cristaux [2].

II.2.2.5.4. Différentes qualités du plâtre

a) Résistance au feu

L'une des propriétés caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnu et éprouvé de tout temps. Le plâtre est **incombustible**. Il est classé A1 sans essai par décision de la Commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes à « aucune contribution à l'incendie » (anciennement M0 dans la réglementation française) lorsqu'il ne contient pas plus de 1 % en masse ou en volume de matière organique répartie de manière homogène. Il a surtout une propriété spécifique, intéressante pour la protection incendie, par le fait qu'il oppose une action antagoniste au développement du feu. En effet, sous l'action de la chaleur, le plâtre subit une transformation chimique résultant d'une réaction endothermique, réaction qui, en même temps qu'elle absorbe de la chaleur, et de ce fait en neutralise les effets destructeurs, libère de l'eau.

b) Isolation thermique

La capacité isolante d'un matériau est d'autant plus élevée que le coefficient de conductivité thermique } est faible, ce dernier est en fonction de la masse volumique. Du fait de sa faible conductivité thermique , le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois. Le tableau I.5 donne les caractéristiques thermiques du plâtre indiquées dans les Règles [8].

Tableau I.5 : Caractéristiques thermiques du plâtre [8].

Matériau ou application	Masse volumique sèche ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique utile λ (W . m ⁻¹ . K ⁻¹)	Capacité thermique massique c_p (J . kg ⁻¹ . K ⁻¹)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	
				sec	humide
Plâtre	600	0,18	1 000	10	4
Plâtre	900	0,30	1 000	10	4
Plâtre	1 200	0,43	1 000	10	4
Plâtre	1 500	0,56	1 000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1 000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 000	0,40	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 300	0,57	1 000	10	6
Plâtre et sable	1 600	0,90	1 000	10	6

Un enduit plâtre appliqué sur une paroi du béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de 0,18 à 0,20W . m⁻¹ . K⁻¹ sont particulièrement destinés à cet usage. En outre, du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre élimine le phénomène de **paroi froide**.

Pour améliorer l'isolation thermique d'une paroi, seuls (par exemple contre cloison en carreaux de plâtre) ou sous forme de complexes de doublage plâtre-isolant. La résistance thermique utile des plaques de plâtre varie avec l'épaisseur (tableau I. 6) :

$$R = e / \quad \text{(I-1)}$$

Avec R (m² . K . W⁻¹) résistance thermique utile;
 e (m) épaisseur.

Tableau I.6 : Résistance thermique utile des plaques de plâtre (1) (2) [8].

Épaisseur e (mm)	R ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)
9,5	0,04
12,5	0,05
15	0,06

(1) Les résistances thermiques utiles des complexes d'isolation plâtre-isolants sont indiquées dans les avis techniques qui les concernent.
(2) $\rho = 800$ à 900 kg/m^3

c) Isolation phonique

Selon les lois de masse et de fréquence, l'isolation d'une paroi est fonction de sa masse propre et de la fréquence des sons. Pour une fréquence donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique croît proportionnellement au logarithme de la masse par mètre carré de la paroi. De même, pour une masse donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique est proportionnel au logarithme de la fréquence sonore. À l'égard de ces lois, le plâtre n'occupe pas une situation privilégiée puisque sa masse volumique relativement faible le défavorise plutôt, notamment vis-à-vis de la loi de masse.

Le plâtre, grâce à son aptitude au moulage, à la préfabrication comme à la constitution d'éléments décoratifs à reliefs, se prête à la réalisation de panneaux, de structures architecturales ou ornementales capables de supprimer ou d'atténuer les réverbérations gênantes des bruits ou des sons émis dans une pièce. Le coefficient d'absorption phonique (coefficient de Sabine) d'une plaque de parement en plâtre de 12 mm, perforée et posée sur une couche de 18 mm de laine minérale, est de 0,74 alors que celui d'une couche de 50 mm de laine minérale est de 0,93. Cela montre qu'il est aisé de constituer des parois absorbant une fraction importante des sons et n'en renvoyant qu'une faible partie [8].

Les cloisons en carreaux de plâtre présentent des caractéristiques phoniques comparables à celle des cloisons de briques ou de parpaing [3].

d) Régulation hygrométrique

Le plâtre, matériau poreux a la capacité d'absorber et de restituer de petites quantités d'eau lorsque le milieu ambiant est saturé en eau ou asséché. C'est donc un bon régulateur hygrométrique. Il peut aussi retarder les condensations, ce qui permet à la ventilation d'évacuer l'eau excédentaire.

Le stockage du plâtre doit se faire en lieu sec dans des silos ou sacs fermés pour éviter qu'il ne soit éventré. Tous les éléments à base de plâtre doivent être stockés à l'abri de l'humidité.

III. Conditions de mise en œuvre du plâtre

Le plâtre peut être utilisé en pâte pure, en mortier ou en béton de plâtre.

III.1. Pâte pure de plâtre

Contrairement au ciment, la pâte de plâtre pure est obtenue par saupoudrage de la poudre de plâtre dans l'eau jusqu'à saturation de celle-ci. Le taux de gâchage à saturation est le rapport du poids de l'eau utilisée pour la mise en œuvre du plâtre sur le poids de celui-ci et il est déterminé selon la norme (NF B12-401).

Le taux de gâchage (e/p), est une grandeur de première importance dont dépendent en particulier la densité et la porosité du matériau final. Rappelons que la quantité d'eau stoechiométrique nécessaire pour hydrater l'hémihydrate en gypse est de 0.186 g d'eau pour 1g d'hémihydrate (rapport des masses molaires correspondant à l'eau et à l'hémihydrate), ce qui correspond à un rapport massique eau/plâtre(e/p) de 0.186. En réalité, le gâchage du plâtre se fait avec des rapports e/p largement supérieurs au rapport stoechiométrique, dans le but d'obtenir une pâte fluide, homogène et facile à manier. L'eau en excès par rapport à la stoechiométrie, en s'évaporant, provoque la formation de pores. C'est pour cette raison que la quantité d'eau de gâchage initiale fixe la porosité finale du matériau, comme nous l'avons mesurée par porosimétrie au Mercure (Figure I.18) et par conséquent ses propriétés mécaniques.

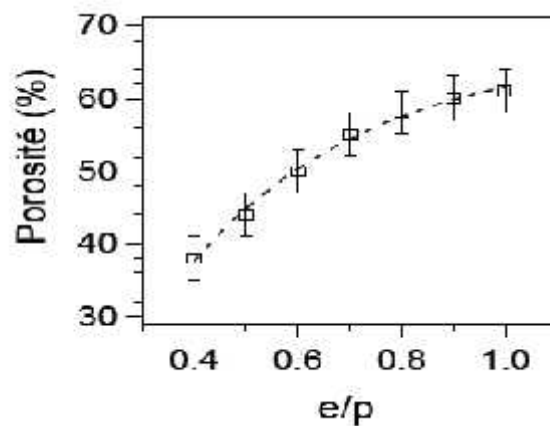


Figure I.18 : Evolution de la porosité du plâtre pris en fonction du taux de gâchage initial (e/p), mesurée par porosimétrie au Mercure (Prosimètre Micromeritics Autopore III) [2].

Les études [3] montrent que la densité du plâtre diminue quand le rapport E/P augmente. (Fig. I.19).

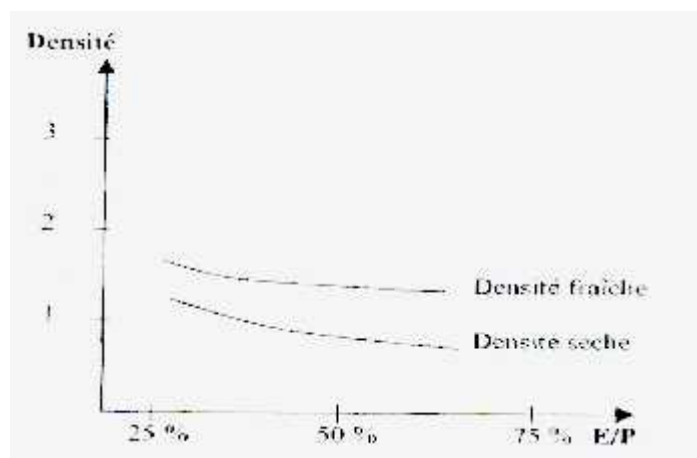


Figure I.19 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre [3].

Les études [3] remarquent qu'un rapport E/P élevé provoque une porosité élevée, le matériau devient moins dense d'où une chute de résistances mécaniques. Elles recommandent l'utilisation d'un rapport E/P = 0,60. Ce qui donne une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante.

Sur les figures ci-dessous, **Ghoulam Allah [15]** montre que la résistance à la compression et la résistance à la flexion du plâtre décroît avec l'augmentation du rapport E /P. Fig. I.20 et I.21.

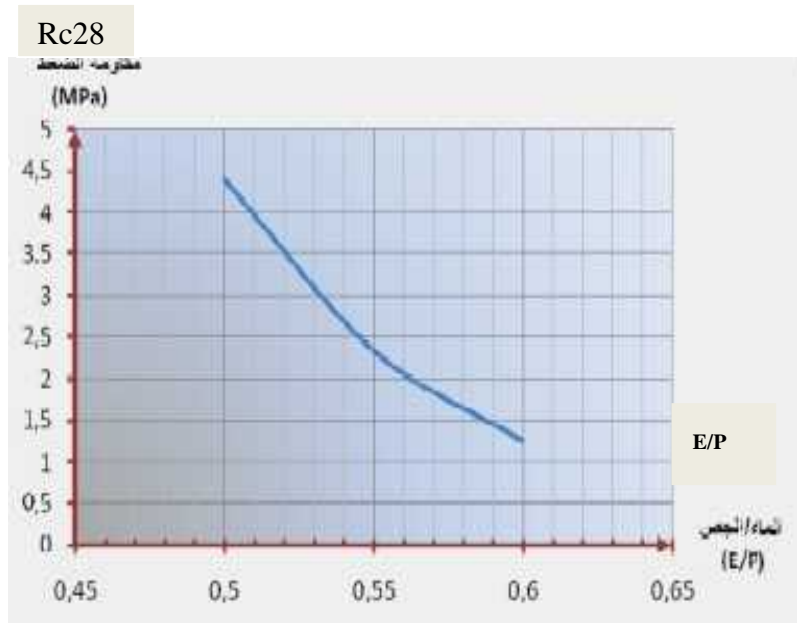


Figure I.20 : l'influence du rapport E /P sur la résistance à la compression [15].

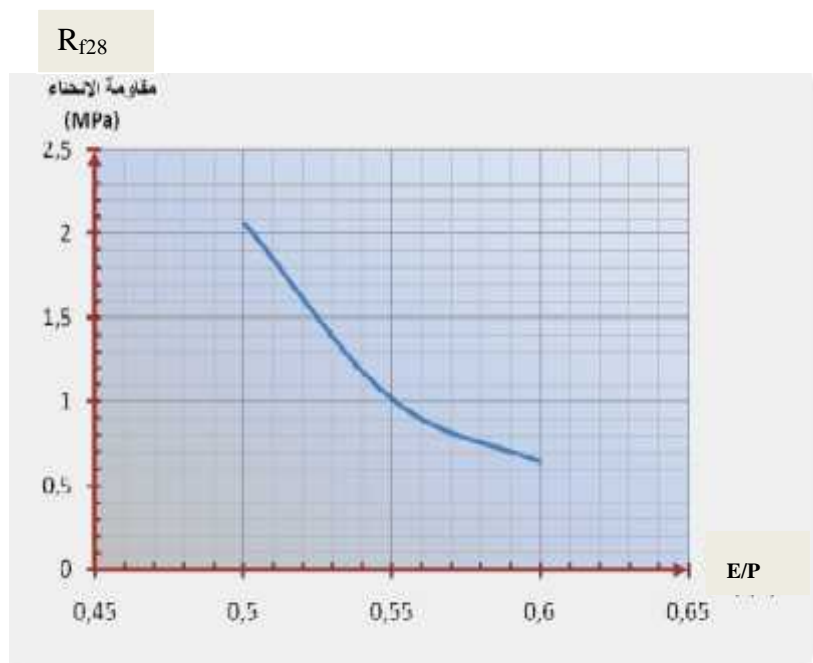


Figure I.21 : l'influence du rapport E /P sur la résistance à la flexion [15].

III.2. Plâtre avec ajouts

Vimmorava et al [16] constatent que l'ajout de 15 % de micro silicate augmente la densité absolue du composite avec plus de 50 % que l'ajout de perlite par contre l'ajout de 20 % de la masse de gypse diminue, la densité a une valeur inférieure à 300 kg / m^3 .

Concernant la résistance à la compression, l'ajout de 15 % de micro silicate, augmente 3 fois la résistance à la compression, alors que l'ajout de 50 % de carbonate de calcium CaCO_3 , la résistance à la compression augmente 2 fois, par contre l'ajout de 20 % de perlite diminue considérablement la résistance à la compression à 0,3Mpa.

III.3. Mortier de plâtre

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau. Les études [3] imposent les limites des caractéristiques que doit avoir le sable utilisé aussi bien dans le mortier que dans le béton de plâtre.

Les sables utilisés doivent être propres et exempts de toutes matières gypseuses et de matières organiques.

Le sable siliceux doit être préféré au sable calcaire en raison de sa moindre capacité d'absorption d'eau. Il doit être à granulométrie régulière et continue, et contenir un faible pourcentage de fines.

Le C.N.E.R.I.B [3] montre que les résistances mécaniques en compression les plus satisfaisantes ont été obtenues pour les sables intégrés dans le fuseau granulométrique donné dans la Fig. I.22 et utilisé avec un rapport S/P = 0,5 en poids équivalent à S/P=0,4 en volume.

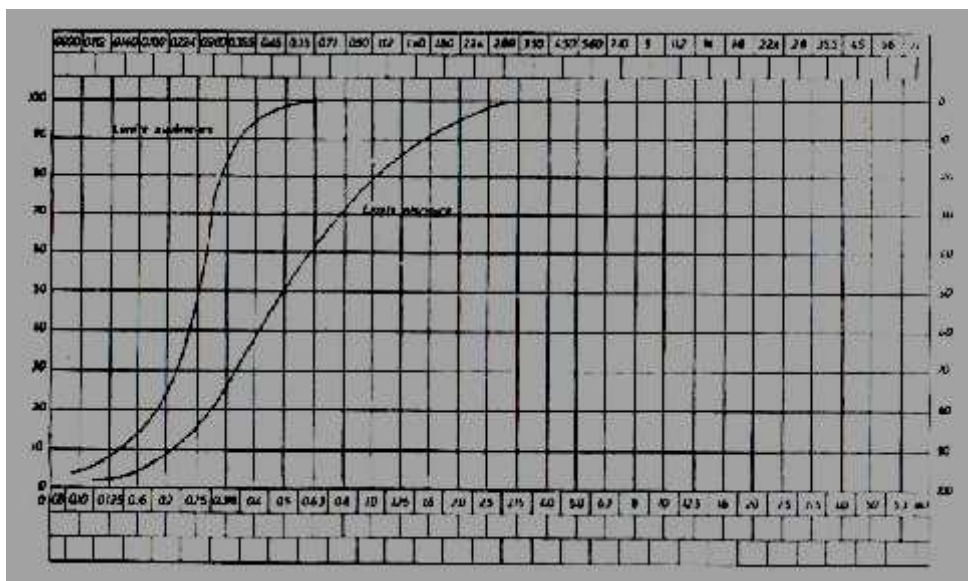


Figure I.22 : Fuseau granulométrique des sables. Analyse granulométrique NF P 18 – 804[3].

III.3.1. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier

La courbe ci-dessous montre la variation de la résistance à la compression, à 28 jours, des mortiers en plâtre (sable de dune + plâtre) en fonction du rapport E/P et avec un rapport S/P = 0,5.

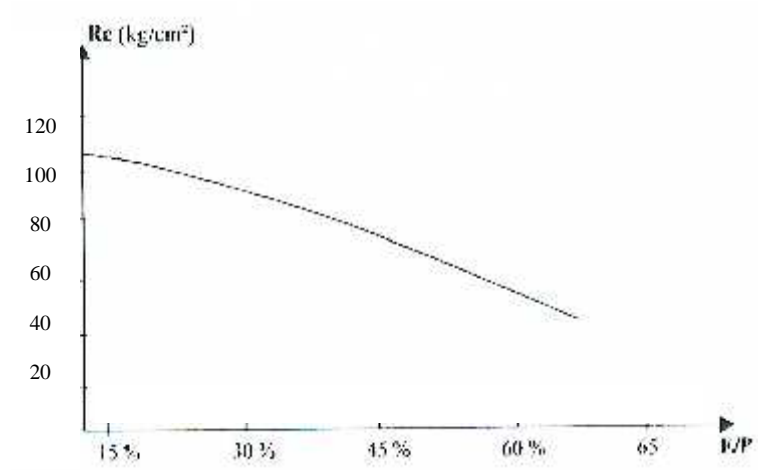


Figure I.23 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier [3].

III.3.2. Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier

Les études [15] constatent que la résistance mécanique du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée puis décroît quand le rapport S/P devient important. Fig. I.24 et I.25.

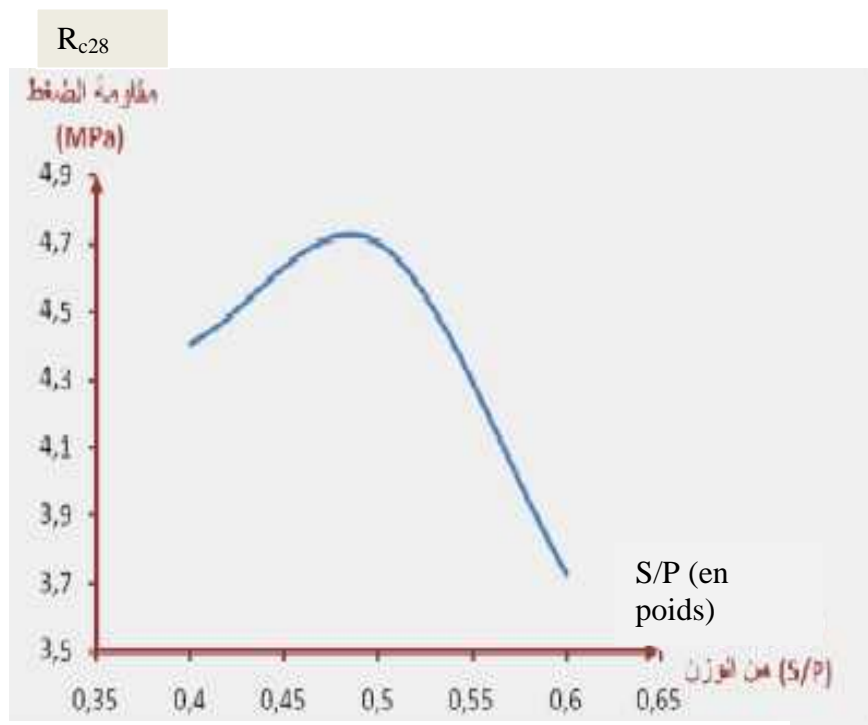


Figure I.24: Influence du rapport S/P sur la résistance à la compression [15].

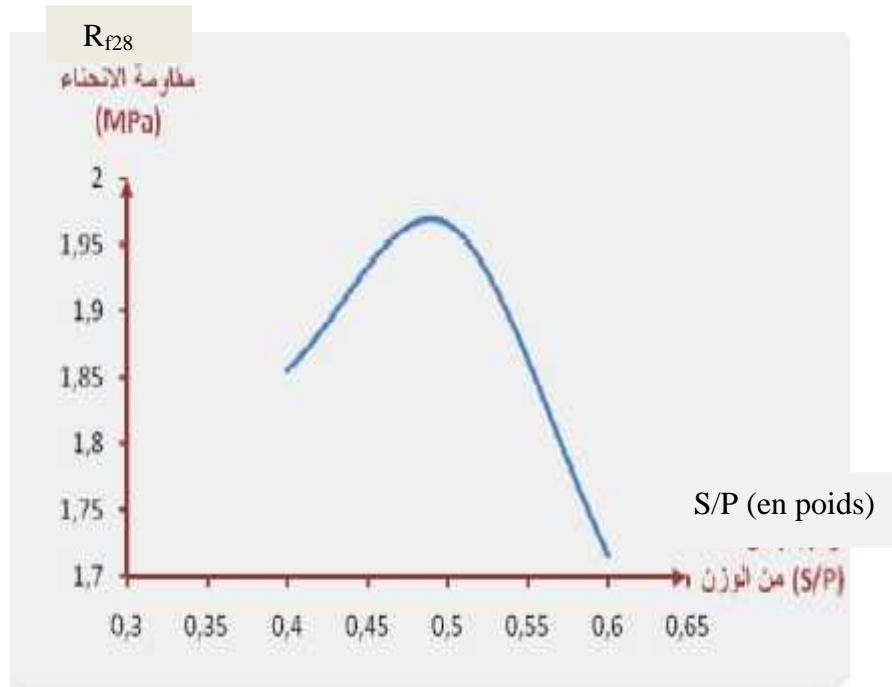


Figure I.25 : Influence du rapport S /P sur la Résistance à la flexion [15].

III.3.3. Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du mortier

Abdelmoune [17] constate que la conductivité thermique du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée.

Les études [17] ont déduit que la diffusivité thermique du plâtre de Hassi khelifa augmente pour de faibles proportions de sable ajouté puis décroît quant le taux S/P devient important. Concernant le plâtre d'Ouled Djellal, qui renferme très peu de silice (2% environ), l'ajout de sable influera considérablement sur la masse volumique du mélange plâtre-sable et donc sur sa chaleur spécifique, il s'ensuit une augmentation de la diffusivité thermique.

III.3.4. Méthode de composition du mortier de plâtre

Le C.N.E.R.I.B [3] donne la méthode de composition du mortier de plâtre comme suit :

- Il faut ajouter le taux de mouillage du sable au taux de gâchage E/P relatif au plâtre pour obtenir un mortier maniable.
- Détermination de la quantité d'eau de gâchage du mortier (eau nécessaire à la saturation augmentée de l'eau de mouillage du sable).

Pour la confection du mortier de plâtre, Il recommande le mode opératoire suivant :

- Mélanger à sec le plâtre et le sable;
- Eteindre complètement la chaux aérienne dans l'eau de gâchage;
- Ajouter progressivement cette eau aux matériaux avec malaxage;

Pour développer la technique de construction du mortier de plâtre banché, des essais [18] de rupture par compression et traction par flexion ont été effectués sur des séries de 06 éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en mortier de plâtre.

Tableau I.7: Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier de plâtre $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ [18].

Durée	2 Heures	3 Jours		7 Jours		28 Jours	
Mode	Mode 2	Mode 1	Mode 2	Mode 1	Mode 2	Mode 1	Mode 2
Rc (bars)	48,03	115,34	105,57	124,49	108,51	132,09	118,93
Rf (bars)	13,88	36,68	32,63	40,70	35,28	43,13	37,90

Rc : Résistance à la compression;

Rf : Résistance à la flexion.

Mode 1 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant et 24 h à l'étuve avant écrasement.

Mode 2 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant.

D'après le tableau I.4, les résistances mécaniques évoluent avec la durée de conservation. et dépendent aussi du mode de conservation.

Les résultats des résistances enregistrées pour le mode (1) de conservation sont supérieurs à celles obtenus pour le mode (2). D'où l'effet de la température sur l'accélération du durcissement.

III.4. Béton de plâtre

Il est Possible d'obtenir un matériau d'excellentes qualités en incorporant à un mortier de plâtre des agrégats ayant une granulométrie étudiée. La résistance d'un tel conglomerat dépasse habituellement la résistance du mortier de plâtre seul. Pour obtenir un béton de plâtre, il faut tout d'abord disposé d'un bon mortier de plâtre, c'est à dire d'un mortier ayant un facteur E/P réduit. Par ailleurs, la mise en œuvre du béton de plâtre par vibration permet d'améliorer les propriétés du béton en épaississant sa pâte.

III.4.1. Méthode de composition du béton de plâtre

La composition des bétons a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (liant, sable, gravier et eau) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possèdent après durcissement les meilleurs caractéristiques (étanchéité, résistances mécaniques).

Les méthodes de composition du béton de ciment ne trouvent pas leur validité dans le cas du béton de plâtre. Pour cette raison, une combinaison des méthodes de Vallette et de Faurry a été proposée par le **C.N.E.R.I.B** [3].

- 01 sac de plâtre : 40 kg;
- Gravier 5/15 : 60 – 80 kg;
- Chaux éteinte : 01 à 1,5 kg;
- Eau : 16 à 24 l.

III.4.2. Mode opératoire

Après la détermination de la composition du béton de plâtre, on procède comme suit :

- Mélanger mécaniquement à sec le plâtre, le gravier et le sable;
- Faire éteindre complètement la chaux ;
- Mélanger la chaux éteinte au reste de l'eau de gâchage;
- Ajouter progressivement ce mélange (eau + chaux) aux constituants (plâtre + gravier + sable);
- éviter un long malaxage, pour ne pas accélérer la prise.

Djoudi [19] montre que la maniabilité croît avec l'augmentation du rapport S/G et que la composition granulaire optimale pour le béton de plâtre témoin (qui donne une maniabilité maximale) correspond à un rapport S/G = 0,29.

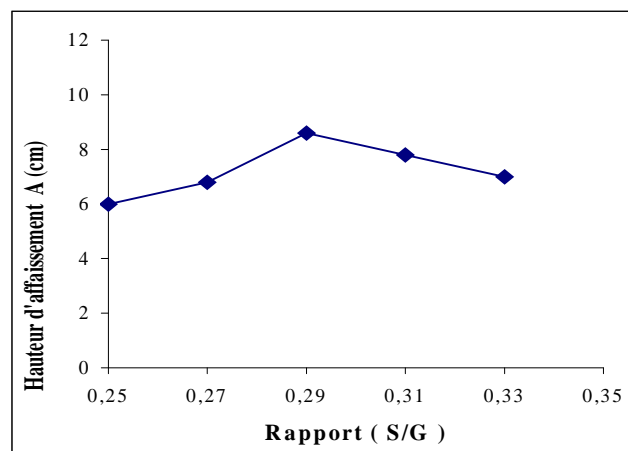


Figure I.26 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton de plâtre témoin [19].

III.4.3. Influence du rapport S/P sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre

Pour chaque type de béton, il apparaît un dosage en sable pour lequel les résistances à la compression R_c et la résistance à la flexion R_f sont maximales. Ce dosage optimum semble être compris dans une fourchette de 60 à 70 % du poids de sable exprimé en rapport du poids du plâtre, pour le plâtre d'Ouled Djellal et un taux de l'ordre de 0,5 pour le plâtre de Hassi khelifa [17].

Amrani et **Chmali** [20] montrent que les voûtains à base de plâtre sous charges concentrées et réparties ont un comportement rigide. Ils présentent une phase élastique linéaire avant la rupture qui se produit dans la section médiane.

Pour étudier l'influence de la composition sur la résistance des voûtains, deux formulations ont été adaptées :

Mortier de plâtre : 54 % plâtre + 6 % chaux + 40 % sable ;

Béton de plâtre : 54 % plâtre + 6 % chaux + 20 % sable + 20 % gravillons.

Les essais mécaniques sont effectués sur des éprouvettes et des voûtains conservés dans les mêmes conditions.

Les essais sur des éprouvettes montrent que le béton de plâtre présente de meilleures performances que le mortier (Tableau I.8).

Tableau I.8 : Résultats des essais mécaniques sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ [20].

Composition	Mortier de plâtre	Béton de plâtre
R_c (MPa)	10,9	11,9
R_f (MPa)	3,76	3,82

- Pour les voûtains, les charges de rupture des voûtains en béton de plâtre sont supérieures à celle des voûtains en mortier de plâtre.

Le tableau I.9 montre que la résistance à la charge répartie est meilleure que pour la charge concentrée.

Tableau I.9 : Résultats de chargement sur voûtains [20].

Composition	Mode de chargement	Ouverture (mm)	Flèche (mm)	charge de rupture	Déplacement de la clé (mm)
Mortier de plâtre	Réparti	50	12	23,330 KPA	0,94
	Concentré	50	12	9,00 KN/ml	0,73
Béton de plâtre	Réparti	50	12	38,33 KPA	0,87
	Concentré	50	12	11,00 KN/ml	0,80

III.4.4. Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du béton de plâtre

En étudiant la variation de la conductivité thermique et la diffusivité a des bétons de plâtre d'Ouled-Djellal en fonction de la proportion de sable ajoutée, les études [17] montrent la présence d'un maximum de conductivité et de la diffusivité pour des teneurs en sable voisines de

0,9. Vraisemblablement ceci est dû à la quantité totale qui conduirait à une matrice en plâtre plus poreuse, pour des valeurs S et P élevées.

III.4.5. Influence des granulats de liège sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre

Zitani [21] a montré que Les variations de la résistance à la compression chute d'une valeur de 12,23MPa pour le béton témoin (sans liège) jusqu'à une valeur de 5,92 MPa pour le dosage le plus faible de granulats de liège, cette chute s'accroît au fur et mesure que le dosage en granulats augmente. Fig. I.27.

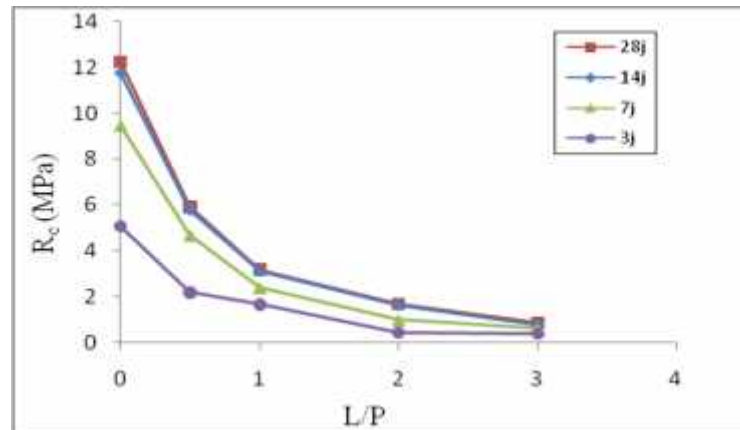


Figure I.27 : Variation de la résistance à la compression des BPL(8/15) en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

Les mêmes études [21] montrent que la résistance à la flexion chute d'une valeur de 4.23 MPa pour le béton de plâtre témoin jusqu'à une valeur de 1.45 MPa pour le dosage le plus faible de liège avec un taux de 65%, cette chute s'accroît au fur et mesure que le dosage en granulats augmente. Fig. I.28.

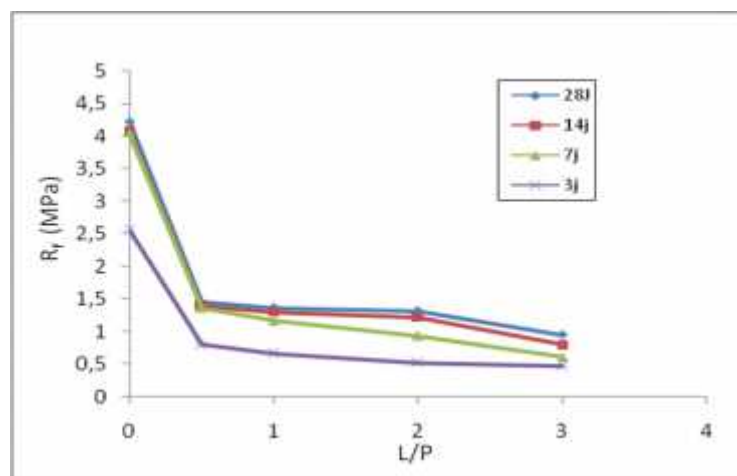


Figure I.28 : Variation de la résistance à la flexion des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

Les études [21] et d'après la figure ci-dessus montrent que la conductivité thermique décroît en fonction du dosage en liège. Les échantillons allégés donnent des valeurs entre 0.18 et 0.47 W/m.C°. En termes de taux d'isolation, le liège permet l'augmentation du pouvoir d'isolation de 75%.

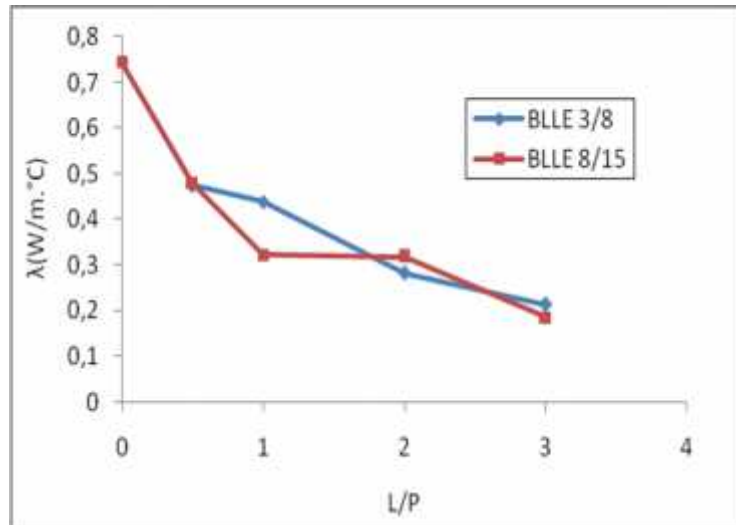


Figure I.29 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre [21].

III.4.7. Influence des granulats de liège sur les propriétés acoustiques du béton de plâtre

Les études [22] montrent que les granulats de liège n'améliorent pas le comportement acoustique des composite à base de plâtre et ils recommandent de faire des perforations pour augmenter le coefficient d'absorption du son, la figure ci-dessous montre la variation du coefficient d'absorption du son en fonction de la fréquence pour des composite plâtre- liège avec épaisseur de 7,5 cm.

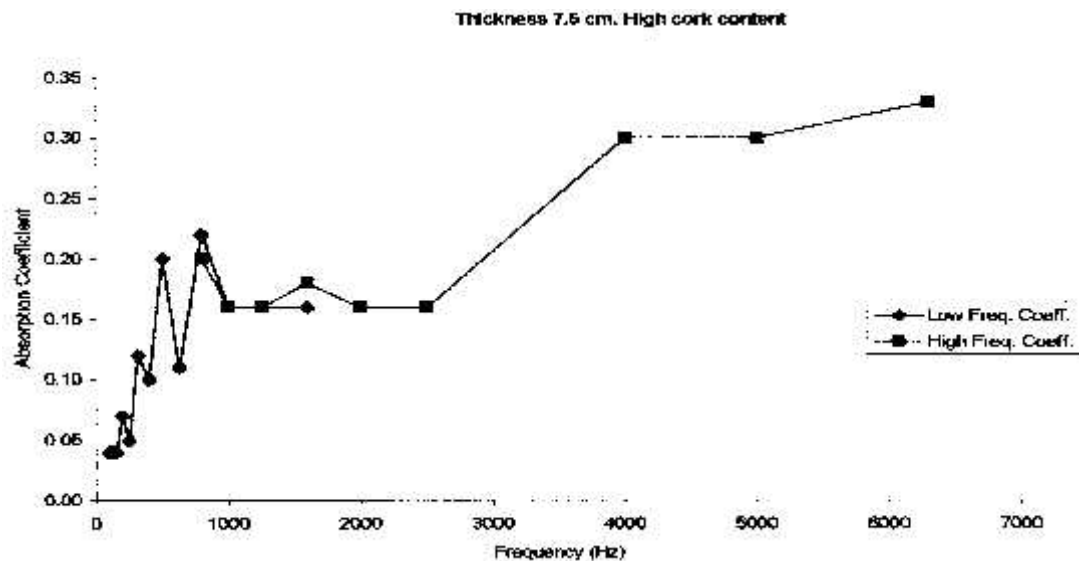


Figure I.30 : Coefficient d'absorption du son du composite plâtre-liège [22].

III.4.8. Durabilité des bétons de plâtre

Parmi les variables influant sur la durée de vie des bâtiments, on peut compter, outre les conditions climatiques et l'entretien, la qualité de la construction et son mode d'utilisation.

Datant de plus d'un siècle, les toitures en formes de voûtes et coupoles et des maçonneries réalisées en pierre de gypse hourdées au plâtre ont conservés leur forme initiale sans fissurations importantes. Mais les matériaux classiques (acier, béton etc...) pour des raisons économiques et technologiques, ont progressivement remplacé l'utilisation des pierres et du plâtre. On prend le cas de Zaouïa Tidjania de Guemar de la wilaya de l'Oued qui a été entièrement construite en gypse et plâtre. Fig. I.31.



Figure I.31: Vue extérieure des coupoles de la mosquée de Sidi Ahmed Amar de Zaouïa Tidjania de Guemar de la wilaya de l'Oued (1870) [15].

Le deuxième point qui limite l'utilisation du plâtre en extérieur et à certains types d'ouvrages est sa faible résistance aux intempéries.

Dans le but de procurer une plus grande durabilité aux matériaux à base de plâtre, différentes études dans ce sens ont été élaborées. On distingue :

Pour modifier certaines caractéristiques du plâtre et utiliser des matériaux localement disponibles. **DEBOUCI et al. [23]** ont envisagé l'utilisation de la chaux compte tenu de son rôle dans les enduits. Il ressort des essais effectués que l'ajout de chaux au plâtre améliore sensiblement ses propriétés.

Les études [23] préconisent, pour l'utilisation d'éléments à base de plâtre dans les murs extérieurs, d'adopter les proportions de chaux suivantes :

- Pour la confection des blocs, 4 à 8 % de chaux par rapport à la masse du plâtre. Cette proportion assure un temps de coulabilité suffisant et une bonne protection contre l'action de l'eau;

- Dans la composition des enduits 10 à 25 % de chaux. Cette composition assure une meilleure maniabilité, une bonne imperméabilité et une plus grande dureté.

Des essais, effectués en Pologne, montrent qu'une chute de résistance à la compression entre 50 à 60 % est enregistrée pour des échantillons du béton de plâtre non imperméabilisés exposés aux conditions atmosphériques. Pour cela il est recommandé d'utiliser une lessive d'hyposulfite pour des teneurs de l'ordre de 2 à 3 %.

Autres études, réalisés en Australie sur des poutres en béton de plâtre armé, montrent que la résistance mécanique du béton de plâtre armé avec ou sans chaux diminue. L'addition de 10 % en poids de chaux au plâtre semble empêcher la réaction de corrosion entre l'acier et le plâtre.

III.5 Domaine d'application des éléments à base de plâtre

III.5.1. Dans la construction

Comme on a déjà vu précédemment, que le plâtre peut être utilisé comme éléments de mur ou de plancher:

- Les blocs pleins ou creux pour murs porteurs ou de remplissage.
- Les hourdis ou voûtains comme élément de plancher.

Soltane [24] présente le prototype réalisé à Biskra avec les éléments suivants :

- Blocs en béton de plâtre;
- Plancher premier niveau et terrasse sont constitués à base de poutrelles semi-préfabriquées en béton armé et d'une dalle de compression en béton coulé sur des voûtains en plâtre comme coffrage perdu. Les parties restantes ont été remplies de béton de plâtre.

Zuber [25], sur la recherche d'un procédé de construction destiné aux zones tropicales sèches dont les composants en mortier de plâtre utilisé et qui sont :

- Un bloc creux $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ pour mur ;
- Une dalle $60 \times 52 \times 8 \text{ cm}^3$ pour les planchers ;
- Une pièce en U armé de $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ utilisable soit en coffrage linteaux, soit en marche qui doit être couverte d'un revêtement anti-abrasion;
- Une poutrelle en plâtre armé de $12 \times 14 \text{ cm}^2$.

Aldeberet [26], pour la rénovation des salles d'exposition du grand Louvre, a choisi le plâtre sous multiples formes :

- Des cloisons destinées à devenir support de cinoises (droites cintrées ou auto-porteuses suspendus à la charpente);
- Des doublages thermiques et acoustiques en plâtre ;
- Des plafonds de staff. Certains ont une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés d'un seul tenant.

Le **C.S.T.B. [27]** montre que l'utilisation des plaques de plâtre permet de remettre à niveau des sols déformés. Lors de la réhabilitation des bâtiments, cette technique de chape sèche apporte des performances d'isolation acoustique et thermique et ne demande pas le renforcement de la structure en raison de son faible poids.

Dernièrement au niveau du **CNERIB**, il a été réalisé un prototype avec une grande performance énergétique (fig. I.32), les murs en béton de terre stabilisée et comme élément de remplissage du plancher des voutains en mortier de plâtre. Fig. I.33.



Figure I.32 : Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre.



Figure I.33 : Voutains en mortier de plâtre.

La figure I.34 montre les températures intérieures et extérieures du prototype



Figure I.34 : Détection de la température à l'intérieur et à l'extérieur du prototype avec une grande efficacité énergétique.

III.5.2. Dans la Réhabilitation

Ghoulam Allah [15] et en s'appuyant sur les travaux de **Djouidi [28]** a utilisé les plâtres, mortiers, béton de plâtre et ceux renforcés par les fibres végétales du palmier dattier. Pour les travaux de réhabilitation d'un monument historique tel que Zaouïa Tidjania de Ghemar, un exemple de ces travaux est montré sur les figures ci-dessous.



Figure I.35 : Utilisation du mortier de plâtre pour le jointement des murs de Zaouïa de Guemar (Wilaya de l'oued) [15].



Figure I.36 : Utilisation du mortier de plâtre pour le crépissage des murs de Zaouïa de Guemar (Wilaya de l'oued) [15].



Figure I.37 : Nivellement du mortier de plâtre sur la surface de mur [15].

IV. Coût

Dans la mesure où le plâtre entre en concurrence avec les matériaux et les procédés traditionnels, le coût de réalisation en plâtre (matériaux + transport et mise en œuvre) doit être nettement inférieur au coût de l'équivalent ciment pour atteindre une diffusion significative.

Camara [29], sur la base de construction des logements en plâtre au Sénégal, montre que le coût de construction peut être baissé à + 20% par rapport au ciment.

D'après les prototypes réalisés au sud Algérien, par rapport au béton de ciment, l'utilisation du béton de plâtre permet de réduire de 25 à 30 % la consommation du liant, tout en assurant, avec les mêmes proportions, une résistance supérieure pour le conglomerat.

V. Conclusions

Il ressort, de l'étude bibliographique de cette partie, que malgré la diversité des actions de recherche dans la filière plâtre dans le monde, il n'existe pas encore des méthodes connues universellement à adapter pour la formulation et la caractérisation des bétons de plâtre. Donc les recommandations de construction avec le plâtre en Algérie sont venues combler un vide existant dans ce domaine. Elles ont été élaborées sur la base des travaux entrepris par le **C.N.E.R.I.B** (essais en labo, prototypes etc...) dont l'essentiel est donné comme suit :

- Présentation de la composition de base du béton de plâtre donnée à titre indicatif dans le règlement [3] :
 - * 40 Kg de plâtre.
 - * 60 à 80 Kg de gravier 5/15
 - * 16 à 24 l d'eau
 - * 01 à 1.5 Kg de chaux.
- Pour l'eau de gâchage, un rapport $E/P = 0.60$ semble être suffisant pour avoir une résistance satisfaisante et une bonne maniabilité.
- Dans le cas d'introduction du sable, il faut prévoir un rapport $S/P = 0.50$ en poids, car un excès du sable diminue les résistances mécaniques.
- Pour faciliter la mise en œuvre des bétons de plâtre, on peut utiliser la chaux comme retardateur de prise, car cette dernière n'affecte pas les propriétés mécaniques du matériau

En utilisant des granulats légers, tel que le liège, il a été constaté que ces derniers améliorent le pouvoir isolant du béton de plâtre léger, mais diminuent ses propriétés mécaniques.

Partie B : Généralités sur les bétons de fibres

Partie B : Généralités sur les bétons de fibres

I. Introduction

Le béton matériau moderne est le plus familier dans le domaine de la construction avec ses qualités reconnues dans le monde, tel que sa bonne tenue au feu, sa rigidité et son excellente résistance à la compression, mais son comportement fragile à la traction reste un handicap. Au lieu de compenser cette fragilité par des armatures ou des câbles surtout pour des cas des pièces qui posent le problème de dimension, on peut renforcer ces éléments par des fibres de différentes natures conduisant à des matériaux composites et cela afin d'augmenter la ductilité du matériau et améliorer son seuil de fissuration, car les armatures classiques ne peuvent s'opposer à la fissuration initiale du matériau à cause de la présence des constituants de différentes rigidités.

II. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite se définit comme un arrangement de fibres – continu ou non – d'un matériau résistant (le renfort), noyé dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice (le liant) conserve la disposition géométrique du renfort et lui transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce. La figure I.38 montre le comportement mécanique d'un matériau composite.

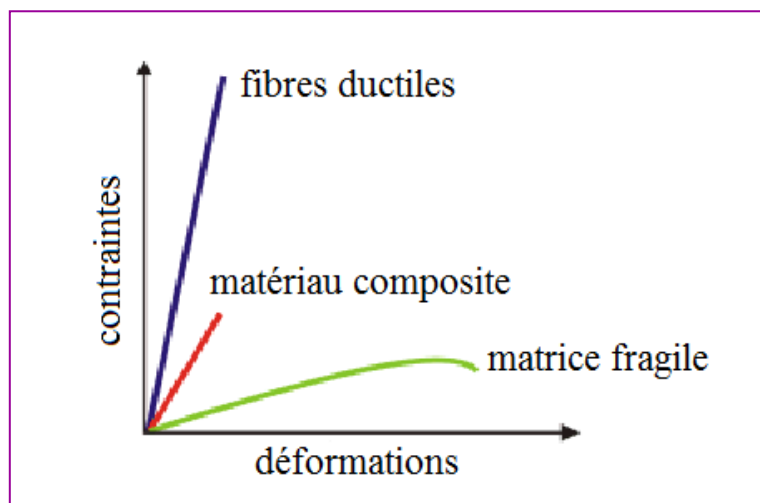


Figure I.38 : Comportement mécanique d'un matériau composite [30].

III. Généralités sur les fibres

III.1. Définitions et vocabulaire

Il est très important de présenter quelques définitions basiques, définies par ailleurs dans des normes existantes de la terminologie textile (NF G00-001).

Le terme **fibres** est tout d'abord un terme générique désignant une matière textile de toute nature (naturelle, artificielle, synthétique...) et est donc souvent utilisé quelle que soit la présentation de cette matière. Cependant, d'une manière plus précise et rigoureuse, une fibre décrit un élément discontinu défini donc par sa longueur et son diamètre. Par exemple, les matières naturelles d'origine végétale se présentent intrinsèquement sous forme de fibres dont la longueur varie en fonction de son origine (de quelques millimètres à quelques centimètres). [31].

III.2. Principales catégories

Les fibres peuvent se classer en deux catégories :

- Les fibres naturelles ;
- Les fibres artificielles.

III.2.1. Fibres naturelles

III.2.1.1. Enjeux

D'une manière générale, l'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie pour :

- Valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles;
- Développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement.

Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture). Dans cet esprit, on envisage de remplacer les fibres de verre par des fibres naturelles, non pour faire des économies, mais parce que les matières premières renouvelables présentent des avantages écologiques.

III.2.1.2 Présentation des différentes fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

- les fibres végétales qui comprennent : les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok); les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie); les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco);
- les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telle que la soie;
- les fibres minérales.

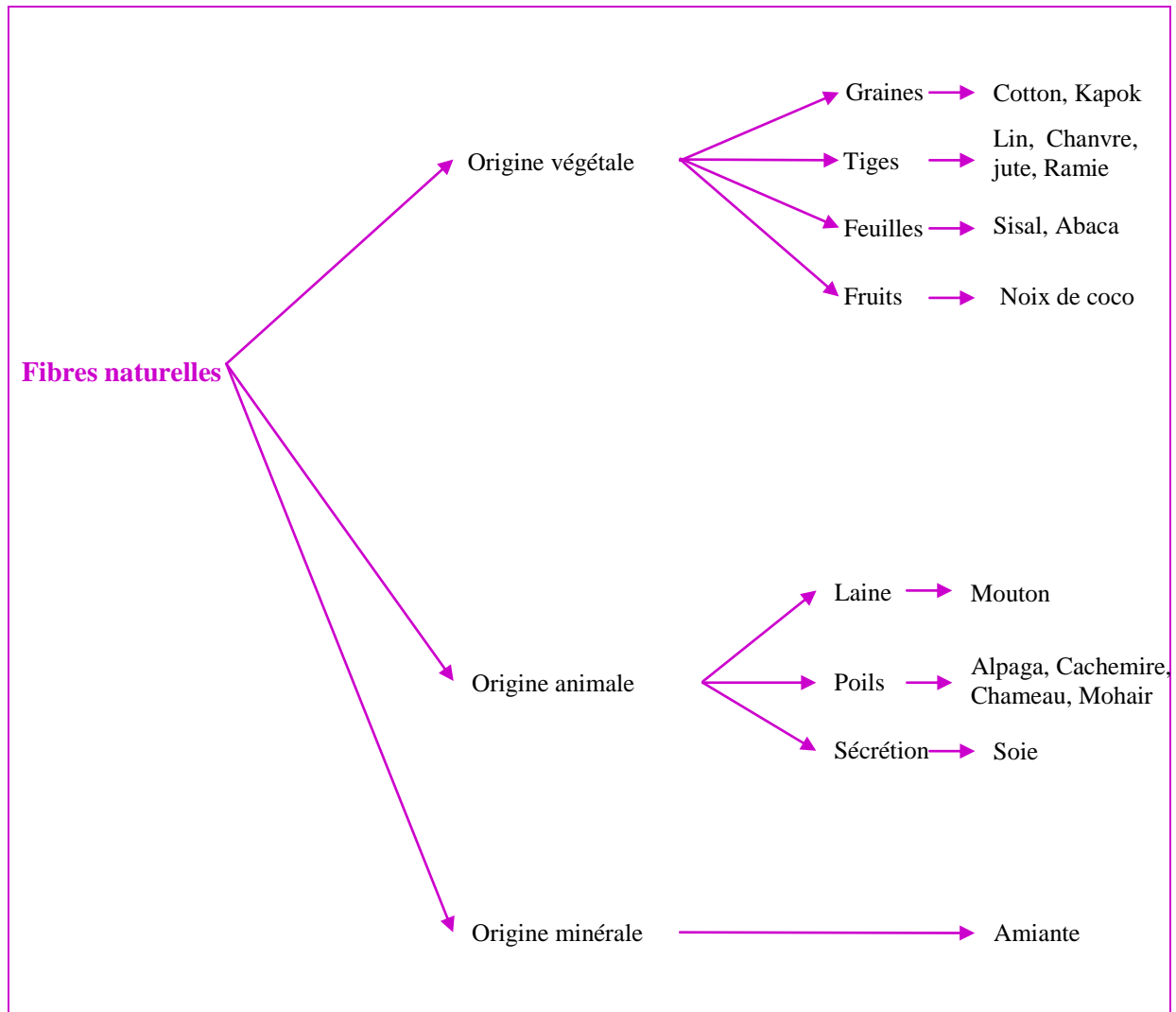


Figure I. 39 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine [32].

Pour une application de renforcement de polymère, on s'intéresse aux fibres ayant une fonction structurelle dans la nature. La laine, par exemple, possède une fonction d'isolation thermique et ne présentera pas de propriétés mécaniques remarquables. Les fibres végétales provenant des tiges, des feuilles et des fruits, ainsi que les sécrétions animales présentent (en revanche) des propriétés mécaniques intéressantes.

III.2.1.2.1 Fibres d'origines végétales

1) Modèle simplifié

En première approche, une fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose [33]. La matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle microfibrillaire. Habituellement, dans un matériau composite, le taux de renfort et l'orientation des fibres conditionnent les caractéristiques élastiques et à la rupture. De même, dans une fibre végétale, les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées selon la

composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle microfibrillaire, la section et le degré de polymérisation. En simplifiant, pour un pourcentage de cellulose donné, plus l'angle microfibrillaire sera faible et plus la rigidité et la résistance de la fibre seront élevées ; plus l'angle microfibrillaire sera important et plus l'allongement à rupture sera important.

2) Structure détaillée

Une fibre végétale est assimilable à un empilement de plis composites dont la structure détaillée (figure I.40) est constituée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, elle-même constituée de 3 couches : S1, S2, S3. La couche S2 est la plus épaisse et conditionne le comportement de l'ensemble de la fibre. Cette structure confère au matériau un caractère anisotrope marqué. La structure du bois est proche de celle des fibres végétales. Dans une plante, les fibres sont généralement assemblées sous forme de faisceau, d'où leurs formes polygonales.

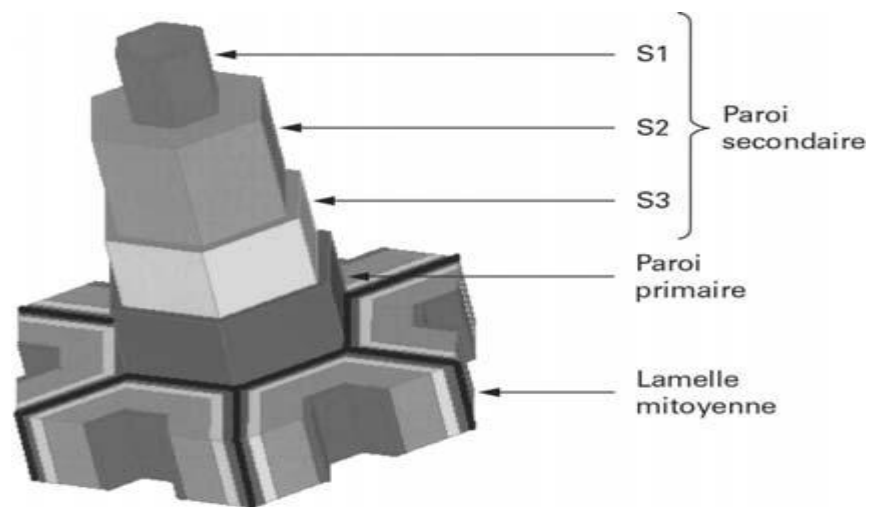


Figure I.40 : Structure complète d'une fibre de lin dans un faisceau [31].

Les parois primaires et secondaires contiennent une armature formée de microfibrilles de cellulose, dans une matrice contenant des hémicelluloses et de la lignine. Les microfibrilles sont de longues molécules de cellulose, polymère linéaire de β -glycopyranose (glucose cyclique). Les microfibrilles de cellulose présentent des zones cristallines et des zones amorphes. Les hémicelluloses sont des polymères ramifiés de sucres. La lignine est un polymère tridimensionnel de nature phénolique.

De manière générale, l'examen des parois cellulaires peut être effectué à différentes échelles d'observation et se décompose en :

- microfibrilles de 0,5 μm de diamètre;
- microfibrilles de 10 à 30 nm de diamètre;
- fibrilles élémentaires appelées micelles de 3,5 à 5 nm de diamètre;
- molécules de cellulose; une micelle est constituée d'environ 50 à 100 molécules de cellulose.

Entre les fibrilles élémentaires subsistent des espaces d'environ 1 nm de diamètre appelés espaces intermicellaires. Les microfibrilles sont séparées par des espaces interfibrillaires dont les largeurs sont d'environ 10 nm. À l'état natif, la paroi cellulaire est gonflée, les espaces

interfibrillaires et intermicellaires étant remplis d'eau. Entre les fibres, on trouve une lamelle moyenne, constituée de pectine, une substance amorphe, qui réunit fortement les parois cellulaires contiguës. La paroi primaire renferme de la cellulose dans une proportion estimée de 8 à 14 %. Les microfibrilles sont enchevêtrées et forment un maillage lâche, un arrangement dit en structure dispersée. Elles sont disposées dans une matrice de composition très analogue à la pectine de la lamelle moyenne. Il y a continuité entre la matrice et la lamelle moyenne. La paroi primaire est très élastique, elle se laisse détendre et déformer. Elle peut ainsi suivre l'augmentation de taille de la cellule en croissance. La paroi secondaire renferme nettement plus de cellulose que la paroi primaire. Elle présente une stratification aussi bien microscopique que submicroscopique.

Les fibrilles de cellulose sont orientées parallèlement suivant un angle (angle microfibrillaire) par rapport à l'axe longitudinal de la fibre. Cette texture spiralée est le type le plus fréquent ; on la rencontre dans les fibres de lin, du chanvre et les fibres ligneuses.

Dans les zones amorphes, désordonnées, l'eau peut pénétrer, d'autant plus qu'elle est étroitement associée aux hémicelluloses, dont la capacité d'absorption d'eau est encore plus importante que celle de la cellulose. L'absorption d'eau écarte les chaînes de cellulose et produit un gonflement. Un départ d'eau, au contraire, provoque le rapprochement des chaînes de cellulose et un retrait. Après séchage et stockage dans des conditions industrielles, les fibres végétales contiennent environ 10 % d'eau.

Le tableau I. 10 donne la composition chimique par masse de quelques fibres végétales.

Tableau I.10 : Composition chimique par masse de quelques fibres végétales [34].

Sl. no.	Fibre type	Hemi-cellulose (%)	Cellulose (%)	Lignin (%)
1	Coir	31.1	33.2	20.5
2	Sisal	26	38.2	26.0
3	Jute	22.7	33.4	28.0
4	Hibiscus	25	28	22.7

3) Présentation de différentes fibres végétales

3.1. Le chanvre



Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie. La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, avec environ 9 100 ha cultivés en 2005.

3.2. Le Lin



Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. De plus, le rendement de cette fibre est très nettement supérieur à la production de coton (jusqu'à 2 t/an/ha). Cette fibre est utilisée en papeterie pour des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier bibles. En effet, sa bonne résistance et sa longueur confèrent à ses papiers les caractéristiques mécaniques essentielles pour cette production particulière. Ces fibres sont très raffinées afin d'avoir des longueurs inférieures à 4 mm.

3.3. Le Coton



Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physiques et mécaniques. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm . Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage. Cette fibre est aussi beaucoup utilisée dans le domaine du textile.

3.4. L'Abaca



L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes, des stores ou des vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement.

3.5. Le Kénaif



Le kénaif est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kénaif en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. Le rendement en fibre atteint près de 10 t/an/ha. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux.

3.6. Le Jute



Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Le rendement en fibres est de 2 t/ha/an. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf.

3.7. Le Sisal



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

3.8. La ramie



La ramie est une plante arbustive. Originnaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. Le rendement en fibres est d'environ 2 t/ha/an. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 μm . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides.

3.9. Le coco



Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.

Quelques exemples de tissus de fibres végétales sont présentés ci-dessous.



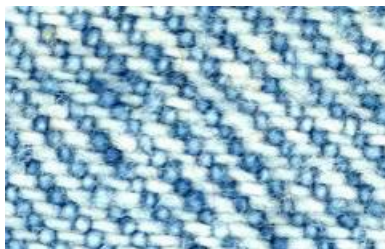
Chanvre



Jute



Sisal



Coton



Coco



Lin

Figure I. 41: Quelques exemples de tissus de fibres végétales [35].

Le tableau I.11 présente les propriétés usuelles des fibres végétales. On remarque que la plupart des fibres présentent des propriétés proches de celles des fibres synthétiques (verre, aramide, carbone...). La production de ces fibres est relativement importante.

Tableau I.11: les propriétés usuelles des fibres végétales [35].

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	1,51
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
Production mondiale en 2002 en milliers de tonnes/an	750	78	3200	202	654	345	104	21200

Chapitre I: Recherches bibliographiques

Autres études [36] regroupent les propriétés essentielles de quelques fibres végétales couramment utilisées.

Tableau I.12: Propriétés de quelques fibres végétales [36].

Propriétés	Specific gravity [Kg/m ³]	Water absorption [%]	Tensile strength [MPa]	Modulus of elasticity [GPa]
Sisal	1370	110	347-378	15,2
Coconut	1177	93,8	95-118	2,8
Bamboo	1158	145	73-505	10-40
Hemp	1500	85-105	900	34
Caesarweed	1409	182	300-500	10-40
Banana	1031	407	384	20-51
Piassava palm	1054	34-108	143	5,6
Date palm [7]	1300-1450	60-84	70-170	2,5-4

4) Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.13 : Avantages et inconvénients des fibres végétales [31].

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	

5) Comportement en traction d'une fibre végétale

Comme nous l'avons vu, une fibre végétale est assimilable à un empilement de plis renforcés par des fibrilles de cellulose. Lors d'un essai de traction, le comportement de la fibre est gouverné par deux paramètres [37, 38] : la réorientation suivant l'axe de sollicitation des fibrilles et le glissement de celles-ci les unes par rapport aux autres. Le comportement en traction n'est

pas parfaitement élastique linéaire et la réorientation des fibrilles de cellulose suivant l'axe de traction entraîne une augmentation de la rigidité en cours d'essais. La figure I.42 présente une comparaison entre les courbes effort-déplacement d'essais de traction réalisés sur une fibre de lin et une fibre de verre. La fibre de verre présente un comportement élastique linéaire. Le début de la courbe de la fibre de lin est curviligne, cette partie correspond à un alignement de la fibre, à la mise sous tension de ses défauts transversaux, puis au début de la réorientation des fibrilles. La deuxième partie de la courbe est quasi linéaire ; en réalité, une analyse détaillée du comportement d'une fibre de lin montre une augmentation du module d'Young avec la déformation [37]. Par ailleurs, les fibres possèdent des défauts transversaux, des plissements (kink band en anglais) (figure I.43), provoqués par un flambage de l'édifice fibrillaire [39] lors de traitements mécaniques. Ces défauts sont des endroits privilégiés de rupture [37]. Ce type de défauts est constaté sur des fibres polymères (polyéthylène, aramide) sous des sollicitations de compression. L'eau contenue dans les fibres (5 à 10 % suivant la nature de la fibre et les conditions de stockage) influence aussi leur comportement.

Lors d'un essai de traction sur une fibre végétale, les paramètres influençant la courbe force-déplacement sont d'après :

- la nature de la fibre (composition et structure);
- le diamètre (la section) qui n'est pas constant dans une même plante. Le module d'Young et la contrainte à rupture évoluent avec le diamètre des fibres ; plus le diamètre est faible et plus la rigidité et la résistance sont importantes [37];
- la longueur de fibre sollicitée (vrai aussi pour les fibres de verre);
- le nombre de défauts transversaux présents;
- le pourcentage d'eau absorbée dans la fibre;
- la maturité de la plante;
- la zone de prélèvement de la fibre dans la plante;
- les conditions de croissance;
- les méthodes d'extraction des fibres;
- la vitesse de sollicitation;
- le montage de la fibre (essai délicat à réaliser compte tenu de la dimension des éprouvettes).

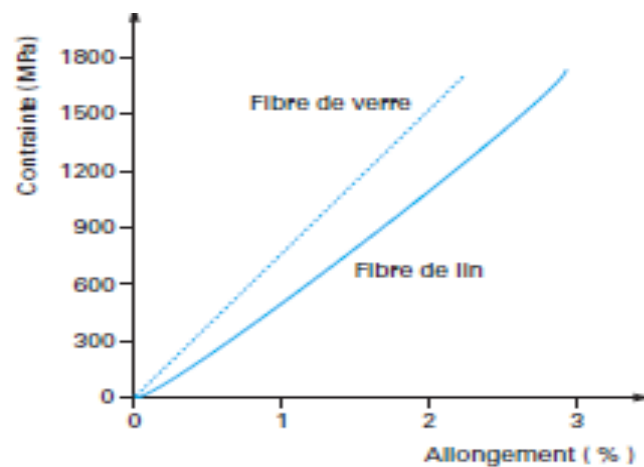


Figure I.42: Essai de traction sur fibre unitaire. Exemples de courbes contrainte – déformation d'une fibre de verre E (diamètre : 12,41 μm) et d'une fibre de lin (diamètre : 14,62 μm). Longueur libre : 10 mm. Vitesse de sollicitation : 1 mm/min [37].

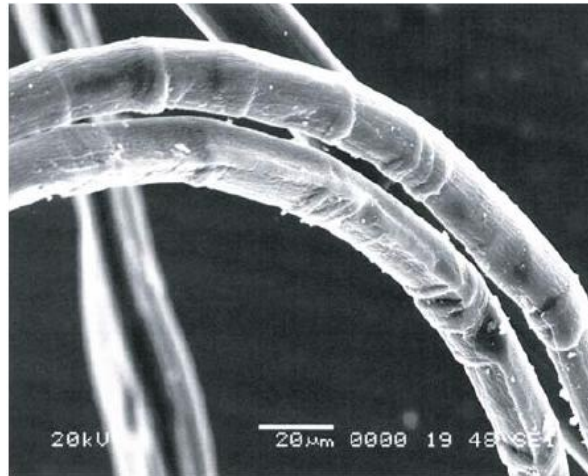


Figure I.43 : *Fibres de chanvre. Développement de défauts transversaux par microflambage dans les zones en compression [31].*

Les parois primaires et secondaires contiennent une armature formée de microfibrilles de cellulose, dans une matrice contenant des hémicelluloses et de la lignine; cette structure simplifiée est représentée schématiquement sur la Figure I.44. Les microfibrilles sont parallèles les unes aux autres et forment avec l'axe de la fibre un angle appelé angle microfibrillaire.

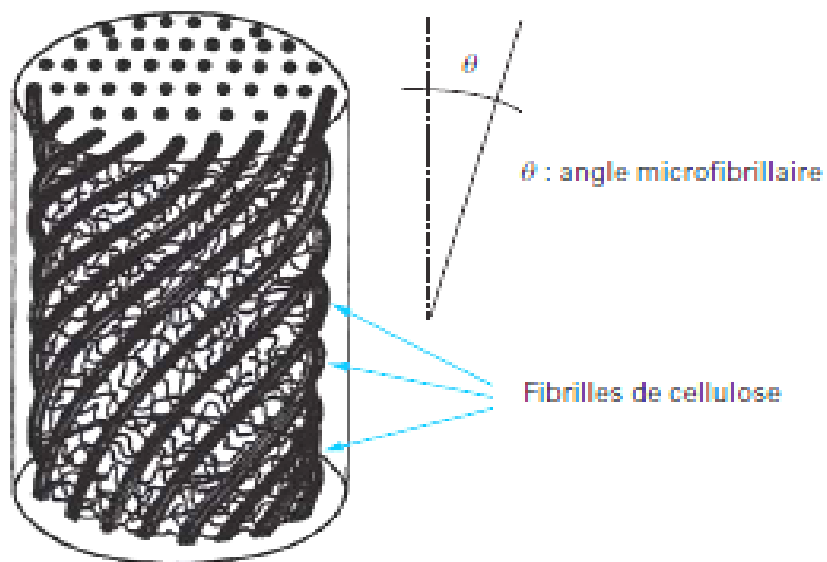


Figure I. 44 : *Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale [31].*

Le tableau **I.14** présente, pour différentes fibres, le pourcentage de cellulose, l'angle microfibrillaire, les dimensions des fibres et le rapport d'aspect l/d (longueur/diamètre). Le rapport l/d est un paramètre important pour permettre le transfert de charges entre fibre et matrice.

Tableau I.14 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [31].

Nature des fibres	% de cellulose	Angle microfibrillaire (degrés)	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Rapport L/d	Références
Lin	64 - 71	10	5 - 76	4 - 77	1 687	[9] [28] [29]
Ramie	83	7,5	16 - 126	40 - 250	3 500	[29]
Chanvre	78	6,2	10 - 51	5 - 55	960	[9] [29]
Jute	61 - 71	8	25 - 200		110	[16] [17] [29]
Sisal	67 - 78	20	7 - 47	0,8 - 8	100	[9] [29]
Noix de coco	43	45	12 - 24	0,3 - 1	35	[9]

Pour un matériau composite renforcé par des fibres discontinues et sollicitées en traction, le rapport d'aspect de la fibre doit être supérieur au rapport d'aspect critique pour bénéficier de ces caractéristiques, c'est-à-dire pour que la fibre se casse sans déchaussement. Le rapport d'aspect critique est fonction de la contrainte à rupture en traction de la fibre et de la contrainte de rupture en cisaillement de l'interface fibre matrice. Les fibres de ramie et de lin présentent un pourcentage de cellulose important, un angle microfibrillaire faible et un rapport d'aspect important.

III.2.1.2.2. Fibres d'origines animales

1) La laine



La laine est une fibre qui provient de la toison de divers ovins (moutons). Son observation à l'oeil nu montre une forme frisée et élastique de couleur variable, du blanc au brun en passant par le jaune. Sa longueur varie entre 3 et 30 cm. Au microscope, la fibre présente une structure en canal irrégulier recouvert d'écaillés qui se chevauchent. À l'état brut, la laine est grasseuse, car elle est imprégnée de sécrétions animales, qui constituent jusqu'à 30 % de sa masse. En outre, la laine fraîchement tondue contient de nombreuses impuretés (débris végétaux, organiques et minéraux), qui doivent être éliminées avant l'utilisation de la fibre.

Ces déchets peuvent représenter jusqu'à 70 % de sa masse. La laine est un produit animal essentiellement composé par des protéines, dont la principale est la kératine. On distingue plusieurs catégories de laines : mérinos, croisées, communes, d'agneau (lambswool). La laine d'agneau est constituée par la toison de la première tonte d'un mouton. Enfin, on peut également récupérer la toison d'animaux morts ou reconstituer la laine à partir de vieux tissus. La résistance de la laine est inférieure à celle de la plupart des autres fibres textiles. Par contre, son élasticité est très grande, et les tissus ne se froissent pratiquement pas. La laine présente une grande aptitude à la filature, car les fibres adhèrent bien les unes aux autres, de même qu'elle se mélange bien avec d'autres types de fibres. Son touché est rêche et elle possède un remarquable pouvoir isolant.

2) La soie



La soie est constituée de filaments produits par des chenilles de papillons, tel le bombyx du mûrier. Pour protéger leur métamorphose, les chenilles tissent autour d'elles un cocon, à l'aide de leur glande séricigène (glande à soie). Ce cocon, une fois dévidé, donne le fil de soie. À l'oeil nu, la fibre se compose d'un fil très long, entre 700 et 1500 m, et très fin, à l'aspect brillant et doux. Comme la laine, la soie contient un mélange de protéines, notamment la fibroïne et la séricine qui représentent respectivement 65 % et 25 % du poids total, mais aussi de l'eau et des sels minéraux. La fibroïne est la soie proprement dite, les autres éléments étant plus ou moins complètement éliminés au cours de la préparation de la fibre. Celle-ci a une résistance élevée, du même ordre de grandeur que celle d'un fil d'acier à diamètre égal. Son élasticité est très grande, ce qui donne des tissus presque infroissables. La soie est un bon isolant thermique.

3) Le fil d'araignée



Les araignées produisent un fil constitué lui aussi de protéines. Ses performances mécaniques intéressent nombre de chercheurs pour la confection de textile technique ou pour le renforcement de matériaux composites. C'est uniquement chez les araignées sédentaires que les pièges (les toiles) existent. Les types et la nature des soies sont divers et dépendent de type d'araignée. Les soies d'araignée ont différentes fonctions telles que : la capture de proies, la reproduction et la détection des vibrations. Les performances mécaniques des soies d'araignée combinent résistance en traction, compression et ténacité. Les meilleures performances mécaniques mesurées sur des soies naturelles sont un module d'Young initial de 60 GPa, une contrainte à rupture de 2900 MPa et un allongement à rupture jusqu'à 200 %. Cet allongement à rupture en traction très important explique que, pour l'absorption d'énergie mécanique, les soies d'araignée sont inégalées dans le monde de fibres synthétiques ou naturelles [35].

4) Comportement à la traction d'une fibre animale :

La courbe contrainte-déformation d'un essai de traction sur une fibre de soie (ver à soie et araignée) se décompose en trois zones [40, 41, 42]. Une première présente un comportement élastique linéaire, une deuxième zone, un comportement plastique, la dernière zone est celle où la fibre se rigidifie; la relation entre contrainte et déformation n'est pas linéaire. Les propriétés mécaniques de la soie sont affectées par l'eau jouant le rôle de plastifiant [42].

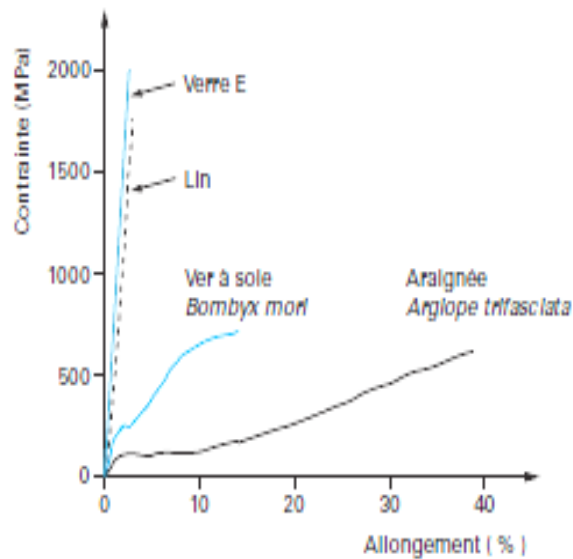


Figure I. 45 : Exemples de courbes contrainte-déformation pour des essais de traction réalisés sur des fibres de verre, de lin, de ver à soie (*Bombyx mori*) et d'araignée (*Argiope trifasciata*) [40].

5) Avantages et inconvénients des fibres animales

Les fibres animales présentent des propriétés spécifiques importantes telles que les propriétés mécaniques (résistance et rigidité), la biodégradabilité, leur origine renouvelable, etc.

Malgré ces avantages, les fibres animales ne sont pas beaucoup utilisées comme renfort dans les matériaux composites à cause de leur prix élevé et leur faible production.

III.2.1.2.3 Les fibres d'origine minérale

Les renforts d'origine minérale sont principalement à base de silicium les plus courants étant l'amiante et le basalte.

1) L'amiante



L'amiante est un hydrosilicate de magnésium contenant de fer, du sodium, ou du calcium selon la variété. Deux familles sont distinguées :

- la serpentine avec la chrysotile représentant 95 % de la production totale d'amiante. Elle a pour formule brute $Mg_6 [(OH)_4Si_4O_5]_2$
- l'amphibole avec :
 - la crocidolite de formule brute $Na_2MgFe_5[(OH)Si_4O_{11}]$
 - l'amosite de formule brute $MgFe_8 [(OH)Si_4O_{11}]_2$

L'amiante, elle possède beaucoup d'avantages tel que le faible coût, forte résistance, module de rupture et bonne tenue au feu. L'utilisation de ces fibres est limitée à cause de leurs longueurs faibles et aussi l'effet néfaste sur la santé. Le tableau I.15 présente quelques propriétés de l'amiante.

Tableau I.15 : Quelques caractéristiques des fibres de l'amiante [43].

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre D (mm)	0,0002 – 0,002
Longueur l (mm)	5
Masse volumique ρ (g / cm ³)	2,6 – 3
Résistance à la rupture σ_{fu} (Mpa)	100 - 300
Module de Young	80-150

L'amiante est généralement associée aux résines phénoliques en raison d'un bon accrochage. Elle peut être employée en combinaison avec les fibres de verre dans le but de diminuer le coût. Elle est également ajoutée aux fibres de sisal pour améliorer les propriétés du matériau.

Bien que les fibres d'amiante présentent de nombreux avantages, elles posent de sérieux problèmes d'hygiène et de sécurité. En effet, les fibrilles d'amiante favorisent l'action de produit cancérigène sur l'homme, elle est donc aujourd'hui soumise à une réglementation très stricte.

2) Le basalte



Le basalte est une roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. C'est le constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique. Le mot basalte est emprunté du latin *basaltis*, lui-même probablement dérivé d'un terme éthiopien signifiant « roche noire ». Le basalte est mélanocrate à holomélanocrate (sombre à très sombre). Il a une structure microlithique, est composé essentiellement de plagioclases (50 %), de pyroxènes (25 à 40 %), d'olivine (10 à 25 %), et de 2 à 3 % de magnétite. Le basalte est issu de la fusion partielle, avec une faible vitesse, d'une pyrolite hydratée.

Les fibres de basalte présentent des propriétés surprenantes : elles résistent au feu, comme les fibres de silice, de céramique ou de carbone, tout en étant beaucoup moins chères (trois à quatre fois moins chères que les fibres de silice). De par ces propriétés, les premières applications visées sont les protections anti-feu notamment pour l'ameublement, la construction, les câbles, etc.

Ces fibres sont également utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Les producteurs mettent en avant leur résistance aux agressions chimiques et leur résistance en traction qui est supérieure d'environ 20 % à celle de la fibre de verre. Les fibres de basalte possèdent également une bonne mouillabilité et n'absorbent pas l'humidité. Les renforts peuvent se présenter sous différentes formes : tissés et non-tissés, tissus 3D et triaxiaux, tresses et filaments coupés. Ces caractéristiques pourraient leur ouvrir des applications dans les sports et loisirs ou dans l'automobile.

Les fibres de basalte présentent des avantages importants par rapport aux autres fibres tels que :

- une température d'utilisation élevée : 820 °C ;
- une bonne résistance au feu ;

- une contrainte et déformation de rupture supérieures à celles de la fibre de verre ;
- un module d'YOUNG élevé (89 GPa);
- une très bonne résistance aux produits chimiques : acides forts, bases, solvants;
- une très bonne résistance à la corrosion, aux rayonnements UV;
- matériau inerte, non toxique, non cancérigène;
- un prix compétitif par rapport à la fibre de verre.

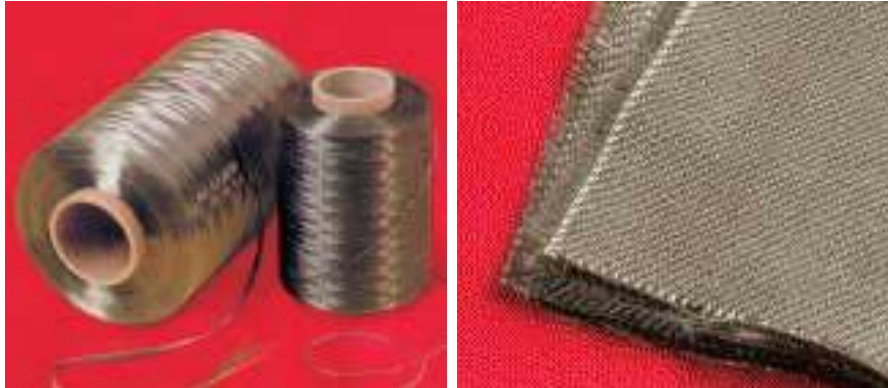


Figure I. 46 : Fibres de basalte [35].

III.2.2 Fibres artificielles

On distingue deux types: les fibres minérales et les fibres organiques. Parmi la première catégorie, on trouve les fibres métalliques (acier, fonte) les fibres en carbone, en céramique et en verre.

Parmi les fibres organiques les plus courantes, ce sont les polypropylènes et plus rarement les polyamides et les polyesters.

III.3 Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres

Le tableau I.16 présente le prix et les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres naturelles ainsi que celles des fibres de renfort couramment utilisée pour le renforcement de matériaux composites courants. Les valeurs présentées sont issues de la littérature et compte tenu du caractère naturel de ces fibres, on remarque des dispersions. Ces valeurs sont discutables car on note des différences pour un même type de fibre, en fonction des paramètres tels que l'origine, la variété, les conditions de croissance et de récolte des fibres, associés aux traitements qu'elles ont subis. Les fibres végétales pourraient constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison notamment de leur légèreté et de leur faible impact environnemental. Les fibres de lin ou de chanvre sont, avec leur densité proche de 1,5, plus légères d'environ 40 % que les fibres de verre. Elles présentent, d'autre part, des propriétés mécaniques pouvant atteindre celles du verre en termes de résistance à la traction et de résilience. Leur fabrication nécessite jusqu'à 80 % d'énergie en moins que les fibres de verre. Au niveau économique, les fibres végétales sont beaucoup moins chères que les fibres synthétiques.

Tableau I.16 : Comparaison de prix et des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres [35].

Fibres	E (GPa)	A (%)	σ_r (MPa)	Densité	Prix (euro/Kg)
Fibres synthétiques					
Verre E (Filament vierge)	72 - 73	4,6 - 4,8	3200 - 3400	2,54	1,5
Carbone(Toray T300)	230	1,5	3530	1,7 - 1,9	30
Aramide	124	2,9	3620	1,44	
Fibres végétales					
Lin	13 - 85	1 - 4	600 - 2000	1,54	0,56 - 0,61
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56	
Chanvre	35	1,6	389	1,07	0,60 - 1,30
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44	0,27
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45	0,31
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15	0,23 - 0,80
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6	
Fibres animales					
Ver à soie Attacus atlas	5	18	200		
Ver à soie Bombyx mori	16	15	650		
Araignée Argiope	7	30	600		
E : module d'Young en traction σ_r : contrainte à rupture en traction A : allongement à rupture en traction					

IV. Composition du béton de fibres

L'étude de la composition du béton de fibres est complexe, elle a été peu étudiée dans son ensemble. Jusqu'à présent, il ne suffit pas d'ajouter un certain pourcentage des fibres à une compacité courante du béton. En effet les fibres modifient considérablement l'ouvrabilité du béton.

IV.1. Ouvrabilité

La baisse d'ouvrabilité pour un béton de fibres est d'autant plus importante que :

- Le rapport (longueur / diamètre des fibres) est grand;
- Le diamètre du plus gros granulats est grand;
- Le pourcentage des fibres est élevé.

Il existe plusieurs procédés pour mesurer la maniabilité dont voici les plus courants :

- Le cône d'Abrams (slump test);
- L'essai VEBE ;
- Le maniabilimètre (L.C.L) du **L.C.P.C.**

Pour une meilleure ouvrabilité des bétons d'acier. D'autres recherches [44] limitent la teneur en fibres et l'élanement des fibres mises en place par le respect de la relation suivante :

$$V_f \cdot (l/d) < 3$$

$$(I-1)$$

IV.1.1. Influence de la géométrie des fibres

On a déjà signalé que la maniabilité dépend de la longueur et le diamètre des fibres utilisées.

Belefrag [45] montrent que la maniabilité des mortiers diminue avec l'élancement l/d et le dosage des fibres métalliques,

IV.1.2. Influence du dosage et de la longueur de fibres

Toutes les études s'accordent pour conclure une diminution très nette de la maniabilité lorsque la quantité des fibres dans un mélange augmente.

Le comité des grands barrages aux états unis (**VSOLD**) [46] recommande certains fuseaux granulométriques pour les mortiers 0/5, les bétons fins 0 ou les bétons moyens (0/19).

Les teneurs optimales en fibres qu'il préconise en volume sont les suivantes :

- 1,5 % à 2 % pour les pâtes de ciment;
- 1,5 % pour les mortiers 0/5;
- 1,25 % pour les bétons fins 0/9,5;
- 1 % pour les bétons moyens 0/19.

Les teneurs optimales des fibres à incorporer dépendent aussi de leur nature.

Une étude complète sur la composition des bétons de fibres a été faite par **Serna-Ros [47]** au L.C.P.C. Connaissant le module de finesse de la composition et celui de chacun des composants, il est possible de calculer leurs proportions. **Serna-Ros** a ainsi étudié les variations de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction du module de finesse.

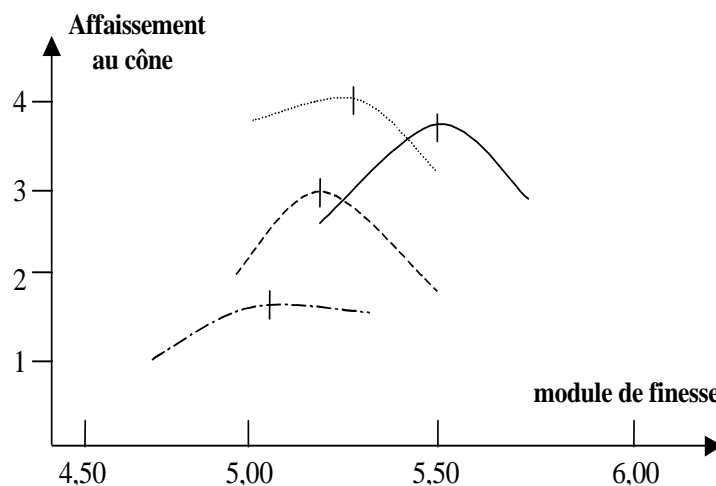


Figure I.47 : Affaissement au cône d'Abrams en fonction du module de finesse [47].

Les conclusions de l'étude de **Serna-Ros** sont les suivantes :

- Pour des bétons ayant un faible module de finesse (bétons de petits granulats), il est possible d'ajouter des fibres jusqu'à 1% (en volume) sans précaution particulière et jusqu'à 2% et plus en contrôlant bien la fabrication. En effet, avec plus de 1% de fibres, une faible variation du dosage en eau provoque la formation de pelotes de fibres.
- Pour des bétons ayant un module de finesse élevé (béton de gros granulats), il faut limiter la teneur en fibres à 0,5% ou 0,6%. Tout excès de fibres risque d'entraîner la formation d'oursins.

Le **Comité 544** de **L'A.C.I** [48] montre que l'ajout des fibres entraîne une augmentation de la porosité à cause de la perturbation du squelette granulaire ainsi qu'une chute de la maniabilité. Pour diminuer cette porosité il y a lieu de remplir les vides créés entre les fibres et les granulats par une augmentation de la quantité du sable et une diminution de la quantité des gros granulats. Ce qui se traduit par une augmentation du rapport S/G du fait qu'une partie des granulats sera remplacé par les fibres.

Djoudi [28] montre que la maniabilité des bétons de plâtre renforcés avec les fibres végétales du palmier dattier décroît avec l'augmentation du pourcentage et de la longueur de fibres. Fig. I.48.

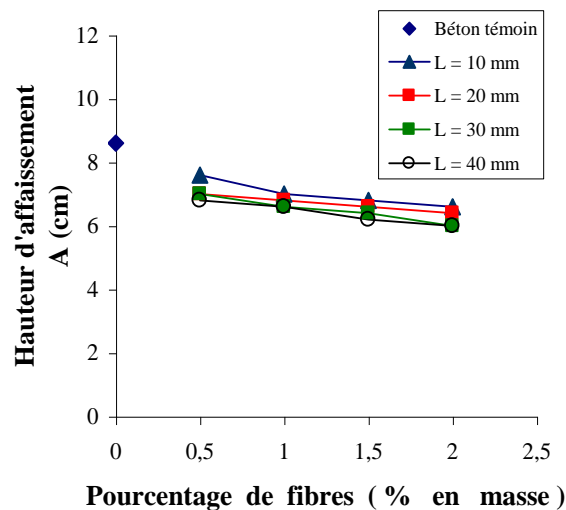


Figure I.48 : Influence du pourcentage et de la longueur de fibres du palmier dattier sur la maniabilité des bétons de plâtre [28].

Les études [49] constatent que la maniabilité des bétons de fibres de l'alfa décroît rapidement avec le pourcentage et la longueur de fibres.

Ait Aneur [43] constate que la maniabilité décroît quand la fraction volumique de fibres métalliques augmente et que cette décroissance résulte probablement du fait que les fibres agissant sur la maniabilité du béton d'une façon analogue que les granulats. Fig. I.49.

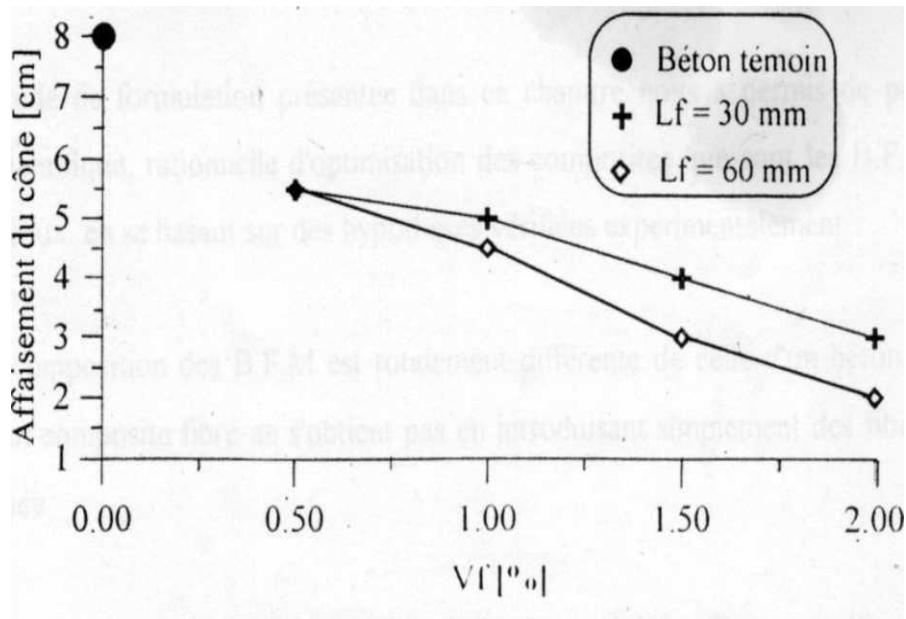


Figure 1.49 : Influence du pourcentage et la longueur de fibres sur la maniabilité des bétons de fibres métalliques [43].

Meddah [50] a constaté que le temps d'écoulement au maniabilimètre L.C.L. des bétons de fibres d'acier ou les fibres de polypropylène et au delà de volume de 0,5 % de fibres, une augmentation rapide du temps d'écoulement, cette dernière est d'autant plus importante pour les fibres de polypropylène que pour les fibres d'acier.

Sur des mortiers à base de sable calcaire, les études [51] constatent qu'un dosage de 1% de fibres de polypropylène est un dosage limite pour une bonne maniabilité. Fig. I.50.

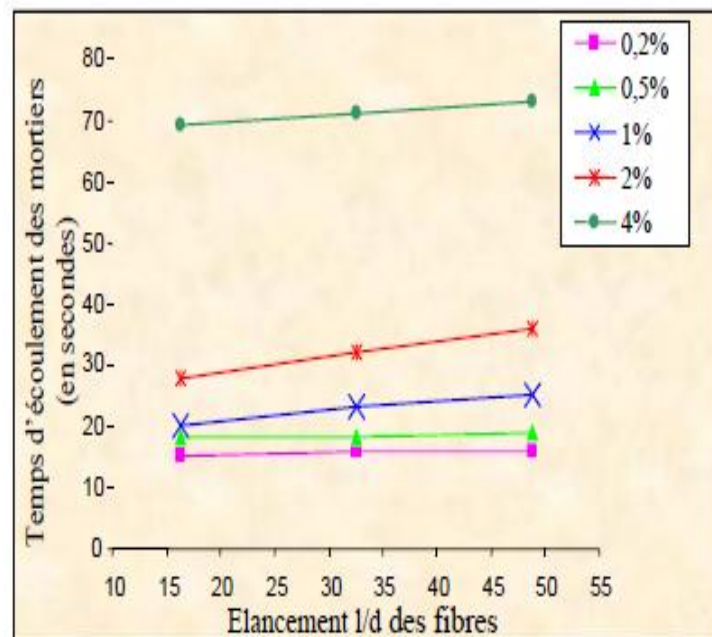


Figure 1.50: Variation du temps d'écoulement des mortiers en fonction des paramètres de fibres de polypropylène [51].

IV.2. Méthodes de formulation des bétons de fibres

La formulation des bétons de fibres est basée surtout sur des résultats expérimentaux qui conduisent à des composites optimisés en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance.

Dans la littérature, la majorité des méthodes de confection de bétons de fibres sont destinées aux bétons de fibres métalliques. Parmi ces méthodes, il existe certaines qui ne tiennent pas compte de l'ouvrabilité alors que cette propriété est une variante principale pour ces bétons.

En effet, la plupart des méthodes d'élaboration des bétons de fibres sont basées sur le développement des méthodes de confectionnement du béton classique, spécialement qui se basent sur l'ouvrabilité telles que la méthode de **Baron-Lesage** ou bien la méthode de **Gorrisse** [52].

Une méthode rationnelle de formulation a été développée il y a une dizaine d'années par **Serna-Ros** [47] et **Rossi** [53]. Ils ont pour point de départ la méthode de **Baron-Lesage** [54]. Cette méthode est basée sur trois hypothèses principales :

1. Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ E/C, le béton le plus maniable est le plus compact et son squelette minéral est optimal;
2. Le dosage optimal en granulats ne dépend pas de la nature et du volume de pâte de ciment (eau + ciment). **Rossi** [53] a introduit cette méthode aux bétons de fibres métalliques;
3. L'ajout des fibres métalliques ne modifie pas les deux hypothèses.

IV.2.1. Adaptation de la méthode de formulation de Baron-Lesage par P. ROSSI

Rossi [53] a procédé en trois étapes pour composer son béton de fibres métalliques (B.F.M).

1. Il s'est fixé au départ le rapport E/C, ainsi que le pourcentage de fibres à incorporer;
2. Il a fait varier le rapport S/G et il a déterminé pour chaque rapport la maniabilité du B.F.M. En traçant une courbe reliant la maniabilité et le rapport S/G, il détermine le rapport S/G pour lequel la maniabilité est plus grande.
3. Sur la base de la deuxième hypothèse on peut alors augmenter (ajustement) la quantité d'eau et de ciment en gardant constant le rapport E/C afin d'obtenir la maniabilité souhaitée. La maniabilité des bétons de fibres de **Rossi** est mesurée par le temps d'écoulement au maniabilimètre L.C.L.

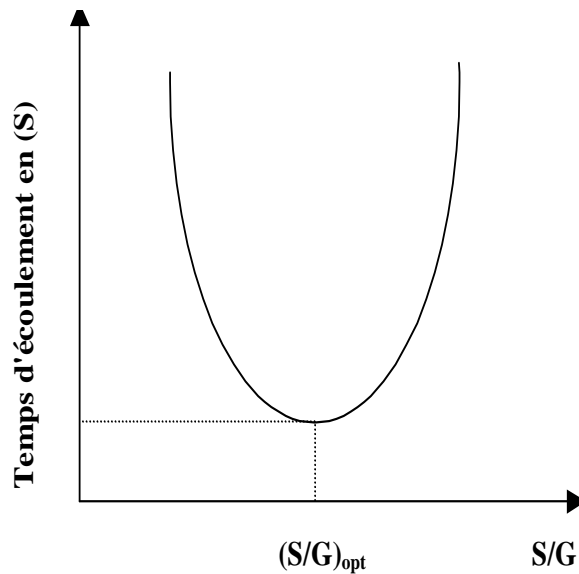


Figure I.51 : Détermination du rapport S/G optimal d'après Rossi [54].

IV.2.2. Adaptation de la méthode de formulation de BARON - LESAGE par Serna-Ros

Serna-Ros a procédé en trois étapes pour composer son B.F.M de la même manière que **Rossi** pour la première et la deuxième étape. Sauf que pour la troisième étape, il a procédé différemment :

- Sur la base de la deuxième hypothèse, on peut alors augmenter uniquement la quantité d'eau, et la quantité des granulats, le dosage en ciment étant constant; donc du rapport E/C, afin d'obtenir la maniabilité souhaitée.

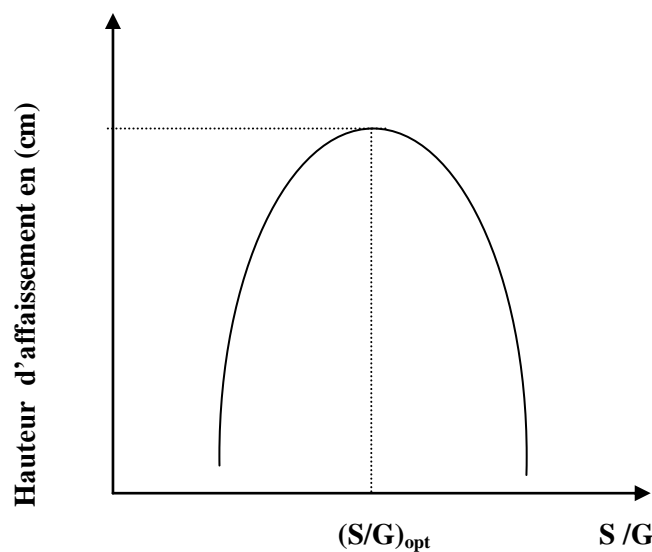


Figure I.52 : Détermination du rapport S/G optimal d'après Serna-Ros [47].

V. Fabrication et mise en place du béton de fibres

Les opérations de malaxage et de mise en œuvre des bétons de fibres sont des étapes très importantes dans la détermination de ces propriétés à l'état frais ou durcis. En effet, il faut veiller à obtenir une bonne dispersion des fibres dans le mélange et éviter la formation de boules de fibres. Pour cela il faut respecter le pourcentage critique qui est le pourcentage limite admissible de fibres à introduire dans la matrice pour éviter les problèmes de mise en œuvre.

Le pourcentage limite dépend du rapport l/d de la fibre, de la proportion et de la dimension maximum des granulas ainsi que de la technologie de la mise en œuvre. Il faut souligner qu'un malaxage énergétique n'est pas toujours recommandé parce qu'il peut endommager les fibres fragiles.

Ainsi les pourcentages limites des fibres introduites sont toujours limités par la technique de mise en œuvre. A titre d'exemple de tableau I.17 donne les techniques de mise en œuvre de quelques bétons de fibres.

Tableau I.17 : Techniques de mise en œuvre des bétons de fibres [55].

Type de béton de fibres	Méthode de mise en œuvre
Fibres de verre ou de fil coupé ou roving	Malaxage Projection manuelle Projection automatique
Fibres métalliques	Malaxage projection
Fibres de polypropylène	Malaxage Magani (Méthode de production de l'amiante ciment)
Fibres de cellulose	HATCHEK(Méthode de production de l'amiante de ciment)
Fibres de sisal	Malaxage

Le **COMITE 544** de **L'.A.C.I [48]** recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées et le matériau recherché :

1. Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur le tapis roulant d'alimentation des granulats);
2. Mélanger d'abord les gravillons et le sable, ajouter les fibres puis le ciment et l'eau. Cette méthode est recommandée pour les fibres de polypropylène de façon à les défibrilliser;
3. Ajouter les fibres en fin de malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

Pour la mise en œuvre, il est recommandé d'éviter d'utiliser des aiguilles vibrantes, car lorsque l'on relève les aiguilles, leur emplacement reste plus souvent sans fibres. Il se crée ainsi des cheminées sans fibres. La vibration se fera donc de préférence par le coffrage.

Il faut toute fois être averti que celle-ci provoquera néanmoins une orientation préférentielle des fibres parallèlement aux parois. Cela peut parfois être un avantage, à condition de bien maîtriser le sens pour qu'il soit parallèle aux contraintes maximales.

La finition devra être soignée, de préférence à la règle vibrante ou à l'hélicoptère. Sinon cela peut être la cause de l'apparition de taches de rouilles dans le cas de fibres métalliques.

Le béton de fibres peut également être projeté, la projection par voie sèche est en général préférée à celle par voie humide. Dans certains procédés, les fibres sont ajoutées au dernier moment dans la lance; ce qui évite l'usure des canalisations. Les compositions du béton de fibres projetées sont en général voisines de celle du béton projeté sans fibres.

VI. Comportement mécanique des bétons de fibres

VI.1. Généralités

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés dans le sens de définir les propriétés mécaniques des bétons de fibres qui dépendent essentiellement de nombreux paramètres et qui sont :

a) Les conditions de mise en œuvre

Espacement, orientation, distribution des fibres dans le béton.

b) Les paramètres liés aux fibres

La granulométrie et la nature des fibres, caractéristiques mécaniques, facteurs de forme l/d et pourcentage des fibres.

VI.2. Rôle des fibres dans le composite

Les fibres possèdent trois effets importants :

- L'accroissement de la résistance à la traction du matériau;
- L'accroissement de l'énergie de rupture (ductilité) comparée à celle de la matrice seule;
- L'efficacité du rôle des fibres dans la matrice dépend des facteurs déterminants dans le comportement mécanique des bétons de fibres.

VI.3. Orientation des fibres

Les propriétés mécaniques des bétons de fibres peuvent être améliorées par l'ajout des fibres et en tenant compte de leur orientation correcte dans le sens du renforcement optimal. Autrement dit leur distribution par rapport aux directions de sollicitations.

VI.4. Longueur des fibres et rapport l/d

L'élanement l/d est relié à la surface spécifique de la fibre et donc à sa capacité à mobiliser un frottement au sein de la matrice.

La longueur est donnée par la longueur critique l_c qui permet de mobiliser la force d'adhérence juste nécessaire pour atteindre la résistance limite d'une fibre à la traction.

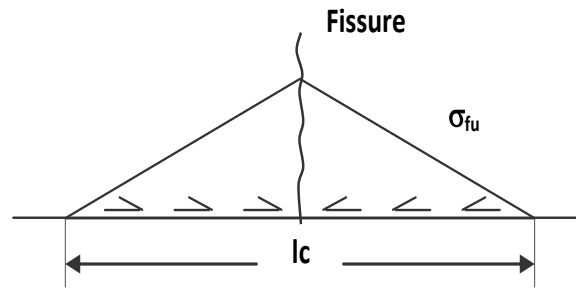


Figure I.53 : Répartition des efforts de traction dans une fibre de part et d'autre d'une fissure centrale.

VI.5. Propriétés mécaniques des bétons de fibres

VI.5.1. Résistance à la compression

Elle est définie de la même façon que celle d'un béton ordinaire par sa valeur caractéristique évaluée à partir des résultats expérimentaux. La littérature compare des bétons témoins à des bétons de fibres et montre qu'on a une légère augmentation, dans d'autres cas une légère diminution et qui peut être à cause d'une mauvaise composition due à un excès de fibres.

Djoudi et al. [19] montrent que la résistance à la compression des bétons de plâtre croît avec la fraction massique de fibres du palmier dattier et diminue pour certains pourcentages élevés. Fig. I.54.

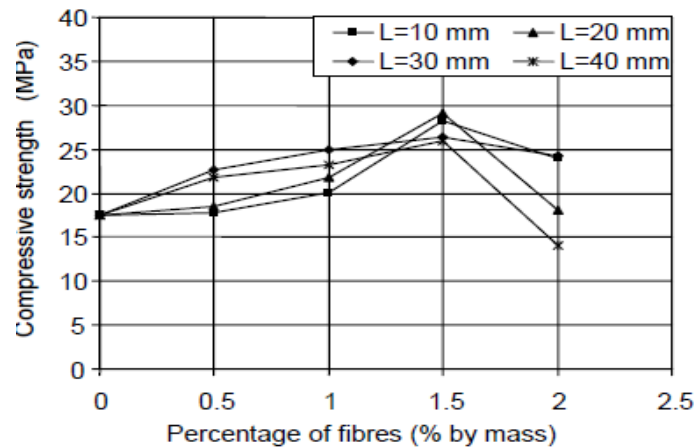


Figure I.54: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre en fonction du pourcentage de fibres du palmier dattier et pour différentes longueurs [19].

Colack [56] montre que l'augmentation de la résistance à la compression du plâtre qui contient environ 20% de fibres de polyméthacrylate en poids est de l'ordre de 120% et que cette augmentation peut être attribuée au remplissage des pores du plâtre avec du polymère donnant la résistance à la compression très élevée.

Les études [30] montrent qu'un petit dosage de fibres de polypropylène et de fibres de chanvre au béton augmente la résistance à la compression (tableau 1.18).

Tableau I.18: Résistance de compression des bétons de fibres [30].

Type de fibres	N° éprouvette	Ouvrabilité	Résistance à la compression (kg / cm ²)	Moyenne de la résistance (kg / cm ²)
Béton témoin	1	Bien (béton mou) 11 cm slump	200	220
	2		244	
	3		218	
Béton de fibres polypropylène	1	Bien (béton mou) 9 cm slump	317	330
	2		348	
	3		326	
Béton de fibres de chanvre " jute"	1	Bien (béton mou) 9 cm slump	332	337
	2		320	
	3		360	

Bentchicou et al. [57] constatent que la résistance à la compression des composites à matrice minérale diminue avec l'augmentation des fibres de cellulose.

Khedari et al. [58] montrent que la résistance à la compression des composites légers décroît avec la quantité de fibres de cocounut.

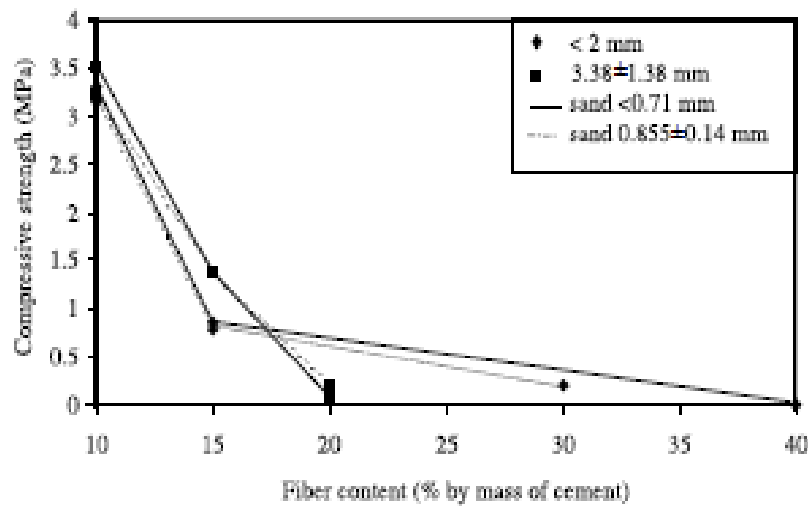


Figure I.55 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité de fibres de durian avec différentes longueurs et les dimensions de grains de sable [58].

VI.5.2. Résistance à la traction

Ismail [59] montre que la résistance à la traction de ciment renforcé avec les fibres naturelles de roselle croît avec l'augmentation du pourcentage par masse et volume de fibres. Tableau I.19.

Tableau I.19 : Propriétés physico- mécaniques de fibres de roselle [59],

Fibre-Cement Ratio (F/c)%		Bulk density (gm/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
By Weight	By Volume			
0	0	1.896	57.5	6.4
0.25	0.3	1.904	59.7	5.6
0.5	0.66	1.894	58.9	7.15
0.75	1.0	1.890	57.9	7.5
1.0	1.33	1.884	57.7	8.6
1.5	2.0	1.878	53.3	9.2
2.0	2.67	1.852	49.2	9.64
3.0	4.0	1.825	42.9	9.8

Les mêmes études [59] constatent qu’il y’a une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction et que de 0 à 1,5% la résistance à la compression garde approximativement la même valeur par contre la résistance à la traction croît et quand la quantité de fibres dépasse 1,5%, la résistance à la compression décroît par contre celle de traction croît marginalement.

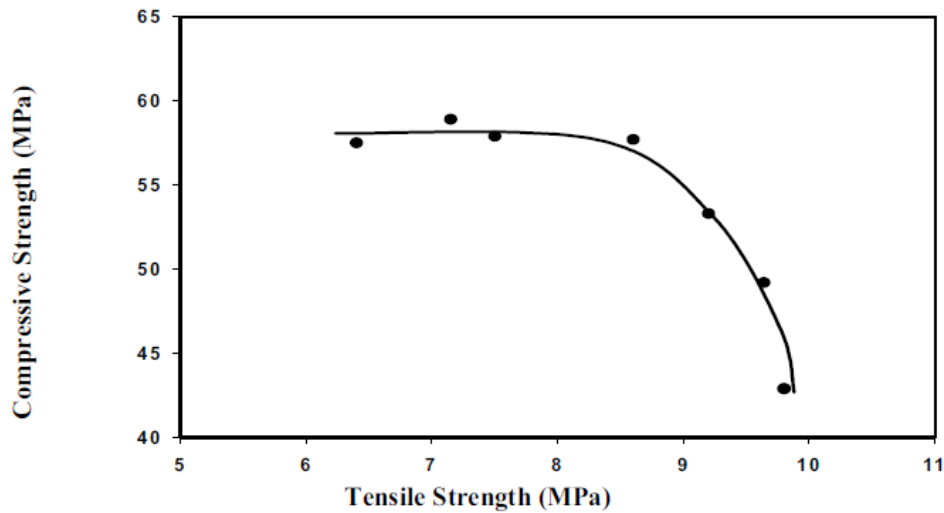


Figure I.56 : Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour différents dosages en volume de fibres [59].

Mohebbi et al. [60] constatent que la résistance à la traction des panneaux de mur avec fibres métalliques minces augmentent à plus de 50% et de 10 à 20 % pour les fibres synthétiques (woven) et de 70% pour les fibres métalliques épaisses.

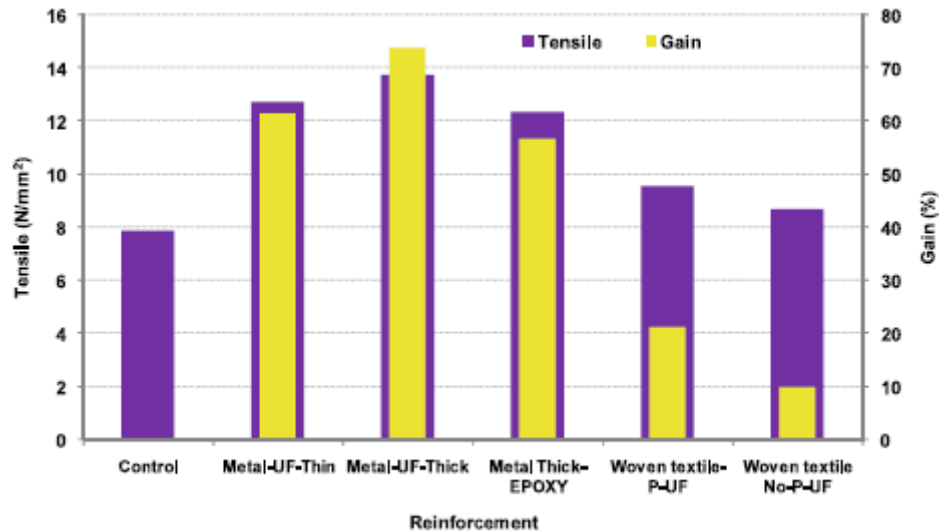


Figure I.57 : Résistance à la traction de MDF(medium density fibers board) [60].

Oda et al. [61] montrent que les fibres naturelles tels que les fibres de cellulose, fibre de coco, les fibres de sisal et les fibres de polyester ont une légère influence sur la résistance à la traction des composites d'asphalte et caoutchouc.

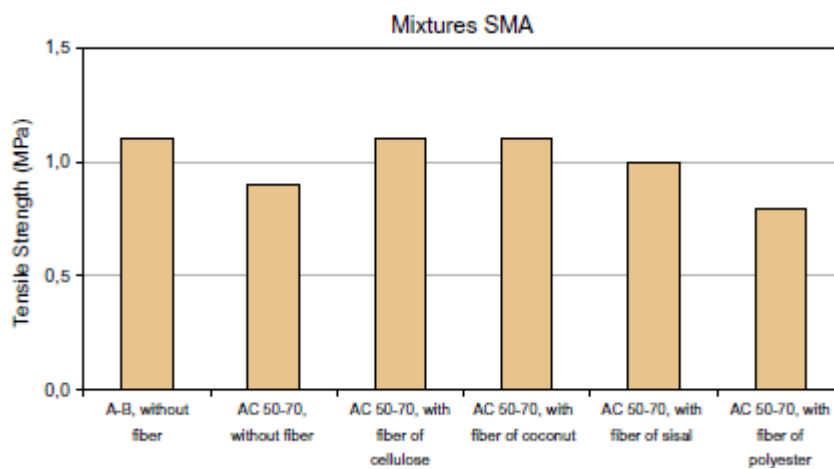


Figure I.58 : Résultats de l'essai de traction par compression diamétrale [61].

Bendjillali et al. [51] montrent que la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de calcaires croît avec l'élanement l/d et le dosage des fibres de polypropylène. Pour les dosages de fibres inférieurs à 2%, cette croissance est non considérable pour les élanements les plus petits,

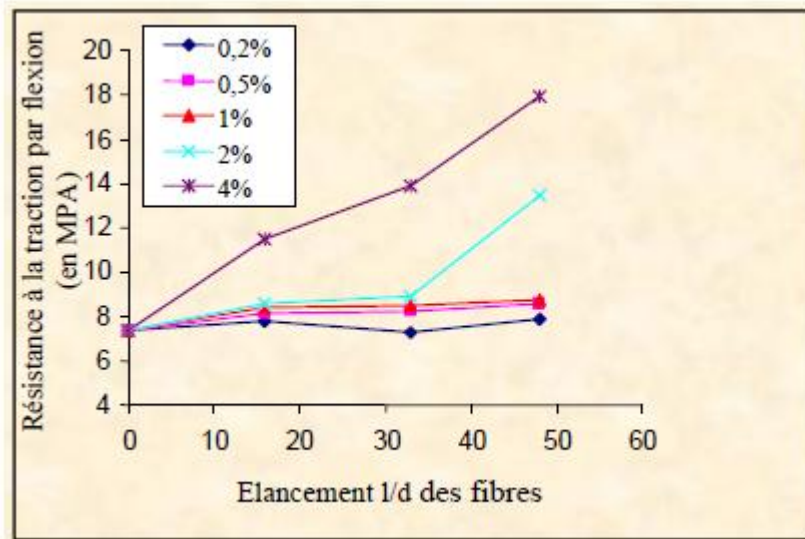


Figure 1.59 : Variation de la résistance en traction par flexion des mortiers en fonction de l'élongement de fibres de polypropylène [51].

VI.5.3. Résistance à la flexion

L'augmentation de la résistance à la flexion du béton de fibres est beaucoup plus importante. Elle peut atteindre 200% et plus, qui est due à la déformabilité du matériau, il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.

Djoudi et al. [62] montrent que l'augmentation de la longueur de la fibre du palmier augmente la résistance à la flexion et que cette constatation est en accord aussi avec les prédictions théoriques, qui donne la contrainte à la flexion du composite en fonction de l'élongement l/d . Donc elle varie proportionnellement avec la longueur de la fibre utilisée et celle-ci est d'autant meilleure pour des longueurs de fibres importantes.

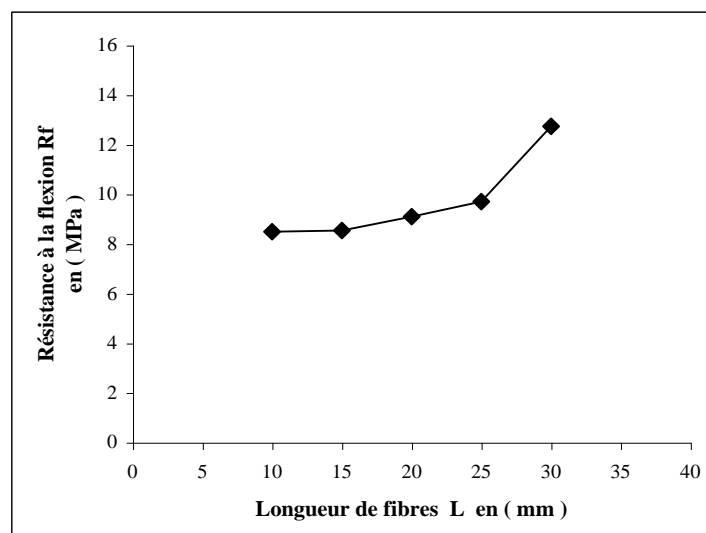


Figure 1.60 : Variation de la résistance à la flexion du plâtre renforcé avec différentes longueurs de fibres du palmier [62].

Garcia Santos et al. [63] constatent que la résistance à la flexion des ciments renforcés avec des fibres de polypropylène et additions de polypropylène et mélanine formaldéhyde croît avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Fig.I.61.

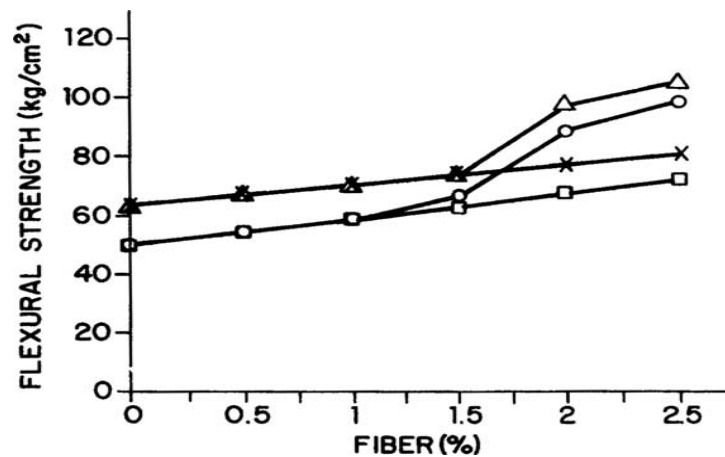


Figure I.61 : Comportement à la flexion de la matrice ciment renforcé avec les fibres de polypropylène (□ 7 jours, × 28 jours) et des additions de polypropylène avec mélanine formaldéhyde (○ 7 jours, △ 28 jours) [63].

Kriker et al. [64] montrent que basés sur l'utilisation de quatre types de fibres de palmier dattier dans une matrice cimentaire, l'augmentation des longueurs et des pourcentages des fibres améliorent la résistance à la flexion et la dureté du composite.

Djoudi et al. [65] sur des composites en plâtre montrent que la fraction massique optimale des fibres du palmier dattier à incorporer est de 1,5%.

En ce qui concerne l'amélioration de la résistance en flexion du composite, on constate dans les travaux d'Hernandez-Olivares qu'elle n'est pas systématique puisque finalement, seule la résistance du mélange avec des fibres de 40 mm dosées à 2% surpasse celle de la matrice pure. Encore une fois le paramètre qui rend compte le plus précisément de la modification du comportement en traction par l'incorporation de fibres s'avère être la ténacité. Dans ses travaux, elle augmente avec la longueur des fibres, elle est ainsi trois fois plus élevée pour les composites renforcés avec les fibres de 40 mm que pour ceux renforcés avec celles de 20 mm, et ce quel que soit le dosage. A longueur constante, la ténacité augmente avec le dosage en fibres.

VI.5.4. Résistance à l'impact

L'incorporation de fibres végétales dans une matrice fragile permet également d'améliorer sa résistance à l'impact. L'étude de la résistance au choc de mortiers de ciment renforcés par des fibres végétales de coir, sisal, jute et hibiscus menée par Ramakrishna [66] conclut à des performances 3 à 18 fois plus élevées pour les matériaux renforcés que pour la matrice pure. Ces propriétés rendent les composites à base de fibres végétales particulièrement intéressants pour les petits éléments préfabriqués pour lesquels des désordres accidentels causés par des impacts génèrent beaucoup de perte. **Savastano et al. [67]** ont par exemple travaillé sur

des tuiles renforcées par des fibres de sisal et d'eucalyptus dont la ténacité atteint 148 J/m² tandis que celle de la matrice pure était de 56 J/m².

VI.5.5. Module de rupture

Alida et al. [70] montrent que le module de rupture croît avec le pourcentage en masse de fibres de coconut et décroît quand le dosage de fibres excède 9 %.

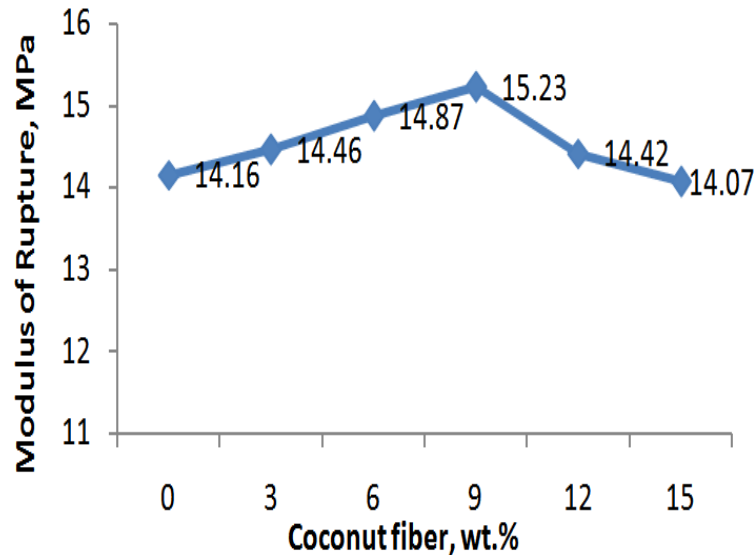


Figure I.62 : Variation du module de Young en fonction du pourcentage de fibres de coconut [70].

Les études [71] montrent que le module de Young d'un composite en plâtre décroît avec l'augmentation de la concentration de fibres de polyamide. Fig.I.63.

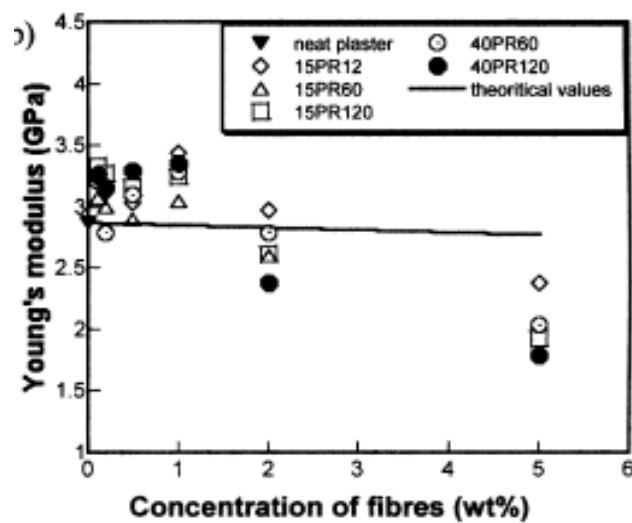


Figure I.63: Variation du module de Young en fonction de la concentration en fibres de polyamides [71].

Sedan [72] quant à lui, obtient une amélioration optimale de la résistance à la flexion d'un ciment pour un dosage de 16% en volume de fibres de chanvre de longueur comprise entre 10 et 20 mm (voir Figure I.64).

Parallèlement à la résistance en flexion, **Sedan [72]** a mesuré le module d'Young des différents mélanges par échographie ultrasonore en milieu infini. Il note que l'amélioration de la résistance en flexion du composite s'accompagne d'une diminution de la rigidité du composite qu'il attribue à une augmentation de la porosité.

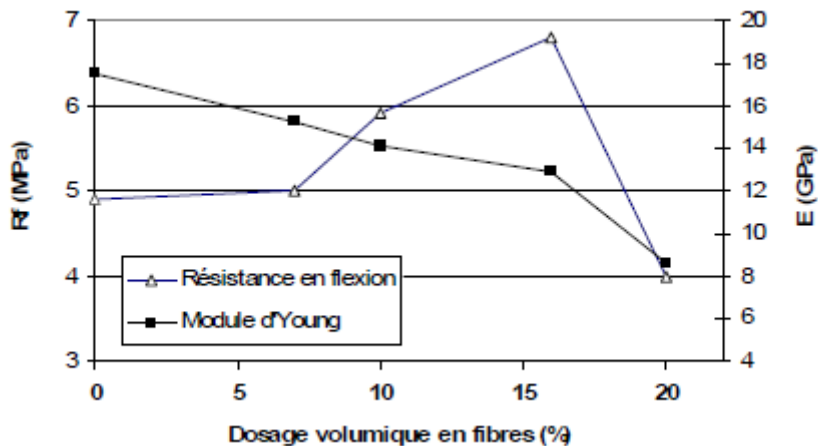


Figure I.64 : Evolution de la résistance en flexion et du module d'élasticité d'une pâte de ciment renforcée par des fibres de chanvre en fonction de la teneur en fibres [72].

VI.5.6. Résistance à la fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture. Ainsi d'une manière très générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent inférieures à la limite d'élasticité, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois. La résistance à la fatigue des éléments en béton est conditionnée par de nombreux facteurs :

- En particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques qui peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une structure.
- Une distinction est généralement faite entre une fatigue avec un cycle à basse fréquence, mais un niveau de contrainte élevé et une fatigue à haute fréquence mais à un niveau de contrainte faible.

VI.5.7. Résistance à l'abrasion

Mattone [73] montre que pour les panneaux de dalle à base de ciment, les fibres de polypropylène améliorent la résistance à l'abrasion que les composites de fibres de sisal et que le mortier de plâtre à base de chaux possède la meilleure résistance.

Tableau I.20 : Test d'Abrasion [73].

Spécimen composition	Quantity
Panel (a) results obtained on the slabs	
Soil, cement	0,38
Soil, cement, sisal fibre	0,49
Soil, cement, polypropylène fibre	0,34
Soil, cactus pulp	0,39
Panel (b) : Results obtained on the plasters [2]	
Soil - sand plaster (1:2)	
Soil – lime – sand- plaster (3 : 1 : 4,5)	1,10
Lime-sand plaster(1:3)	0,90
	0,26

VI.5.8. Résistance à l'érosion

Les études [73] et d'après les figures ci-dessous constatent que les composites renforcés avec les fibres de sisal possèdent une meilleure résistance à l'érosion par rapport aux spécimens sans fibres et ceux renforcés par les fibres de polypropylène et cela d'après la quantité érodée.

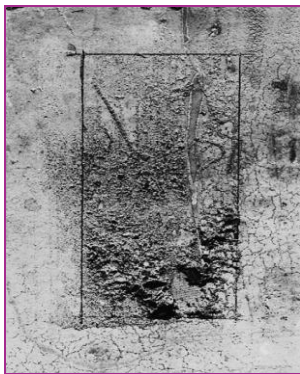


Figure I.65 : Panneau de dalle en Sol-ciment, quantité érodée 1.32 g. [73].

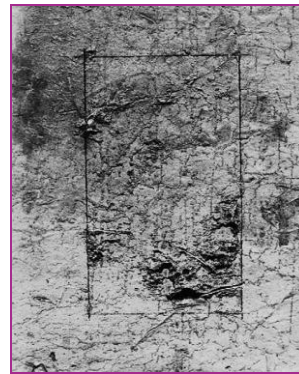


Figure I.66 : Panneau de dalle en Sol ciment-fibre de sisal, quantité érodée 0.89 g. [73].

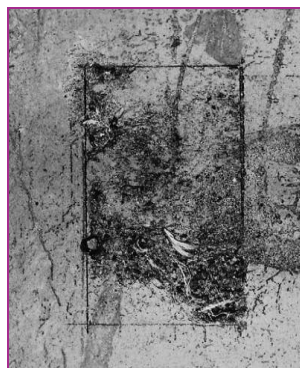


Figure I.67 : Panneau de dalle en Sol ciment- fibre de polypropylène, quantité érodée 2.31g. [73].

VI.6. Autres propriétés

VI.6.1. Retrait

D'une façon générale le retrait du béton de fibres est plus faible du béton témoin, sans fibres. Plusieurs chercheurs affirment que l'ajout des fibres de toute nature compris les fibres végétales est bénéfique pour la réduction du retrait du béton.

Abdou et al [74] montrent que les fibres métalliques diminuent le retrait à 16% pour 1% et de 27% pour le dosage 2% et cela en le comparant avec le béton témoin sans fibres.

Merkhoufi [75] constate que les fibres du palmier dattier diminuent le retrait libre avec 13,5% après 28 jours et cela par rapport au béton de référence après 28 jours et que la longueur de fibres n'influe pas sur le retrait des bétons de fibres.

Kriker [66] montre qu'au delà de 28 jours. Le retrait de mortier de fibres augmente avec l'augmentation du dosage et de la longueur de fibres du palmier dattier.

VI.6.2. Fluage

Kaci et Chahour [76] ont constaté que pour même pourcentage de fibres 0,5%, le taux de fluage est d'autant moins élevé que l'élançement de fibres métalliques est élevé et que la présence de fibres diminue nettement le fluage par rapport au béton de fibres.

Merkhoufi [75] a constaté que l'ajout des fibres du palmier diminue le fluage de l'ordre de 15,39% par rapport au béton de référence et que la longueur de fibres n'influe pas trop sur le fluage.

VII. Comportement thermique et acoustique des bétons de fibres

Ashour et al. [77] ont montré que la conductivité thermique du plâtre décroît avec l'augmentation de la quantité des fibres de paille de blé (wheat straw fibers) et les fibres de paille d'orge (barley straw) et les copeaux de bois en fibres (wood shaving) et les fibres de paille d'orge possède meilleure isolation thermique. Fig. I.68.

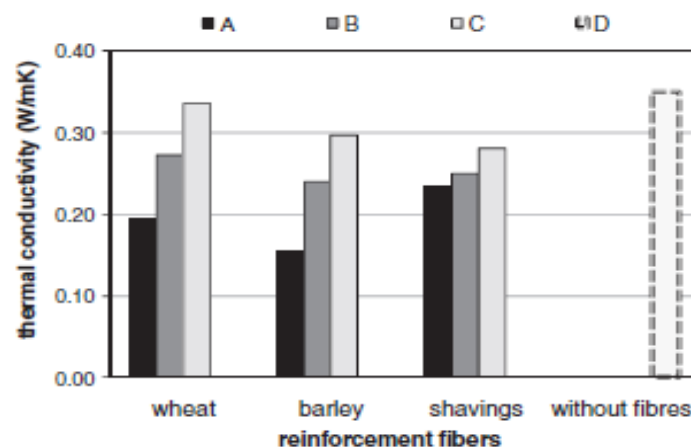


Figure I.68: Conductivité thermique à sec de différents plâtres A, B, C et D renforcés avec différents type de fibres [77].

Cristel et al. [78] ont montré que la conductivité des composites en ciment décroît quand la quantité de fibres de bagasse augmente et que le traitement des fibres n'influe pas sur la conductivité thermique notamment pour le pourcentage 3%. Fig. I.69.

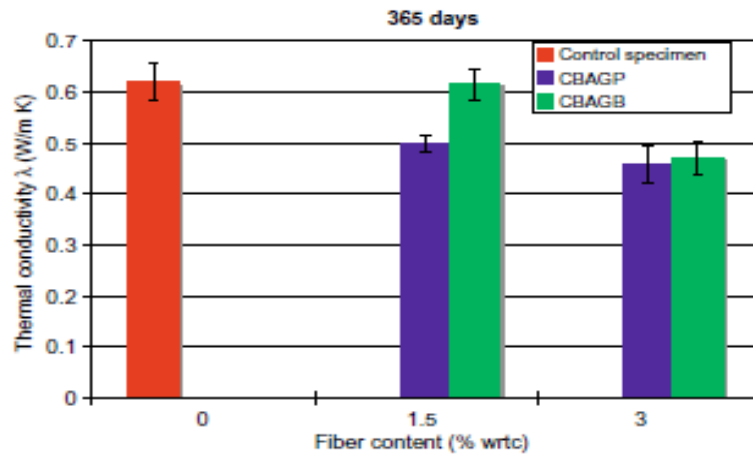


Figure I.69 : Evolution de la conductivité thermique avec la quantité et le traitement de fibres de bagasse [78].

Les études [78] montrent aussi que la chaleur spécifique décroît avec l'augmentation de la quantité de fibres et cela est contradictoire avec des recherches sur les fibres de carbone. Fig. I.70.

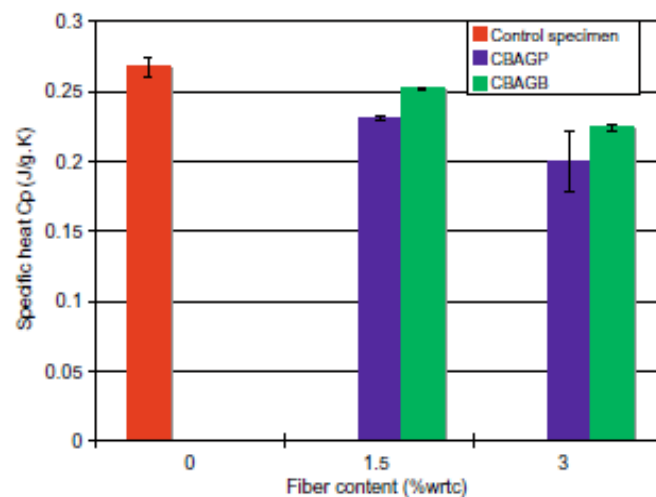


Figure I.70 : Evolution de la chaleur spécifique avec la quantité et le traitement de fibres de bagasse [78].

Mangat et al. [79] constatent que la diffusivité des composites renforcés avec des fibres d'ananas décroît avec l'augmentation de la fraction volumique de ces dernières alors que la chaleur spécifique croît. Fig. I.71 et I.72.

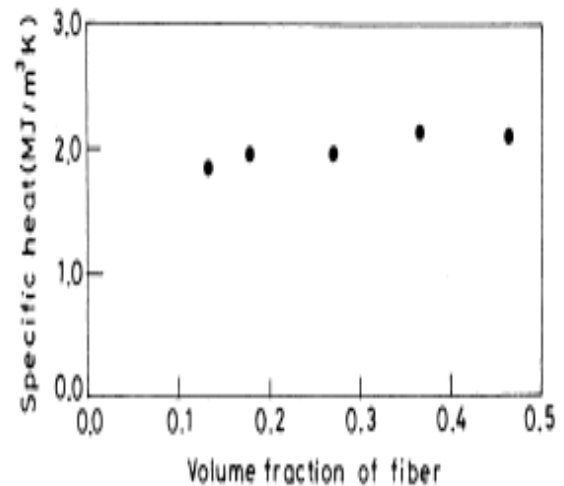
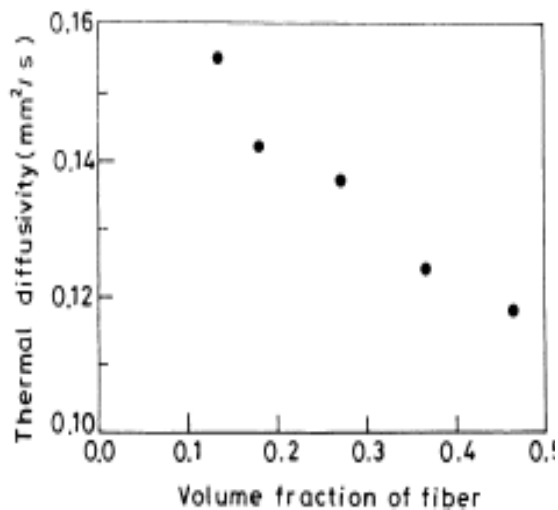


Figure I.71: Variation de la diffusivité thermique en fonction de volume de fibres d'ananas [79].

Figure I.72: Variation de la chaleur spécifique en fonction de volume de fibres d'ananas [79].

Les études [80] montrent que pour des composites à base de fibres de riz peuvent être utilisé comme des isolants acoustiques dans la construction en utilisant le tube de Kundt pour la détermination du coefficient d'absorption acoustique. Fig. I.73.

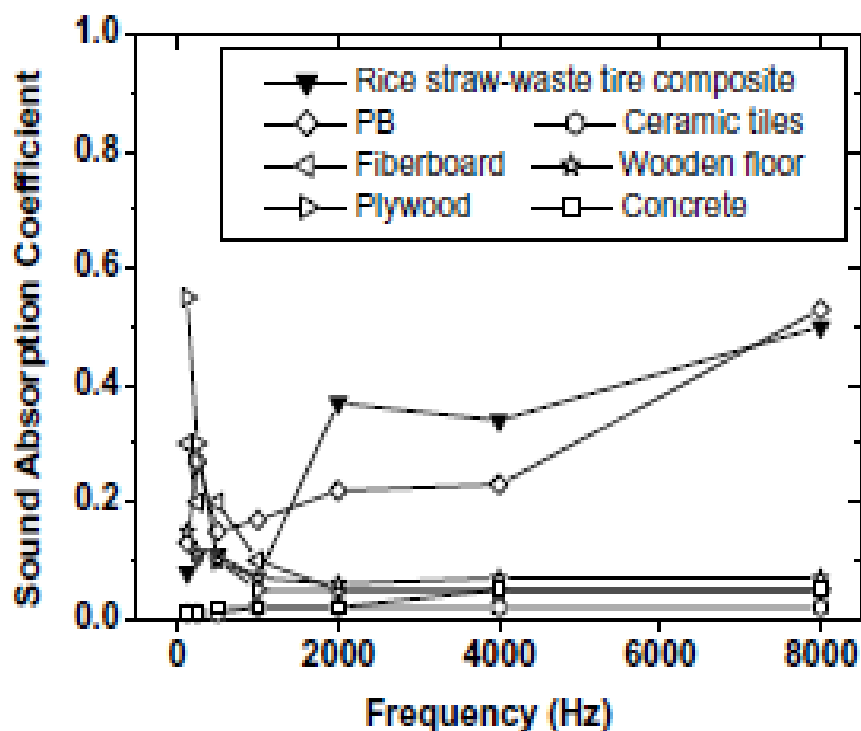


Figure I.73: Coefficients d'absorption des panneaux en composites à base de fibres de riz (30 wt.% of rice straw) [80].

VIII. Rupture des matériaux composites à matrice fragile

L'effet des fibres apparaît après l'endommagement de la matrice. Après la rupture de la matrice, la réponse au chargement est donnée par un film de fibres qui résiste à la charge et forme un pont à travers la fissure. Cette réponse est donnée principalement par la contribution des fibres résistantes (réponse élastique), et les fibres qui glissent (réponse par frottement). Quand le maximum de charge est atteint, on a encore des forces de frottement à l'interface fibre – matrice et la rupture du composite aura lieu lorsque les fibres qui traversent les fissures de la matrice se cassent ou se déchaussent.

Les fibres longues offrent une grande ductilité avec augmentation de la contrainte, ce qui confirme que le matériau est divisé en deux blocs avant la rupture finale.

Djoudi [49] sur des composites en plâtre renforcés par différentes longueurs de fibres montre que pour les fibres de 25 mm, la rupture du composite se fait par un mécanisme combiné de fibres déchaussées et de fibres fracturées. Fig.I.74 Pour les fibres de 30 mm, la rupture se fait par fracture de fibres. Fig.I.75.

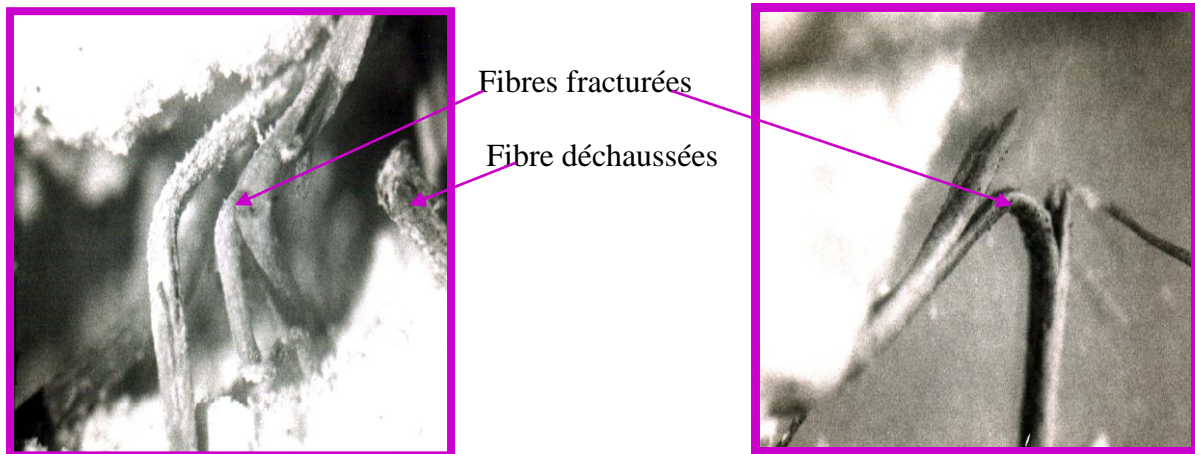


Figure I.74 : Surface de rupture correspondante à une longueur de fibres $L = 25 \text{ mm}$ [49].

Figure I.75 : Surface de rupture correspondante à une longueur de fibres $L = 30 \text{ mm}$ [49].

X. Durabilité des bétons de fibres

Plusieurs essais, effectués à long terme sur les résistances à la traction et la flexion des bétons de fibres d'acier et de polymère, révèlent que ces types de bétons présentent une bonne durabilité dans les milieux secs et humides. De plus, les fibres d'acier ou de polymère sont chimiquement inertes vis-à-vis des alcalis du ciment. Cependant, la résistance en traction et au choc des bétons de fibres de verre diminue avec l'âge.

Malgré les résultats encourageants obtenus vis-à-vis des propriétés et notamment des propriétés mécaniques des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales, les études réalisées mettent en évidence des déficiences concernant la durabilité des fibres dans la matrice alcaline.

X.1 Evolution des propriétés des composites de fibres végétales à long terme

L'ensemble des travaux réalisés font état d'une chute de la ductilité des matériaux fibrés par des fibres végétales au cours du temps. Les résultats obtenus par **Sedan [72]** présentés sur la Figure I.76 illustrent ce phénomène. A l'issue de 12 mois de vieillissement naturel, le comportement mécanique des composites est notablement modifié. La force à la première fissure est relativement constante par rapport aux essais réalisés à 28 jours, en revanche la phase post pic disparaît après vieillissement, le matériau présente une rupture fragile semblable à celle de la matrice non fibrée.

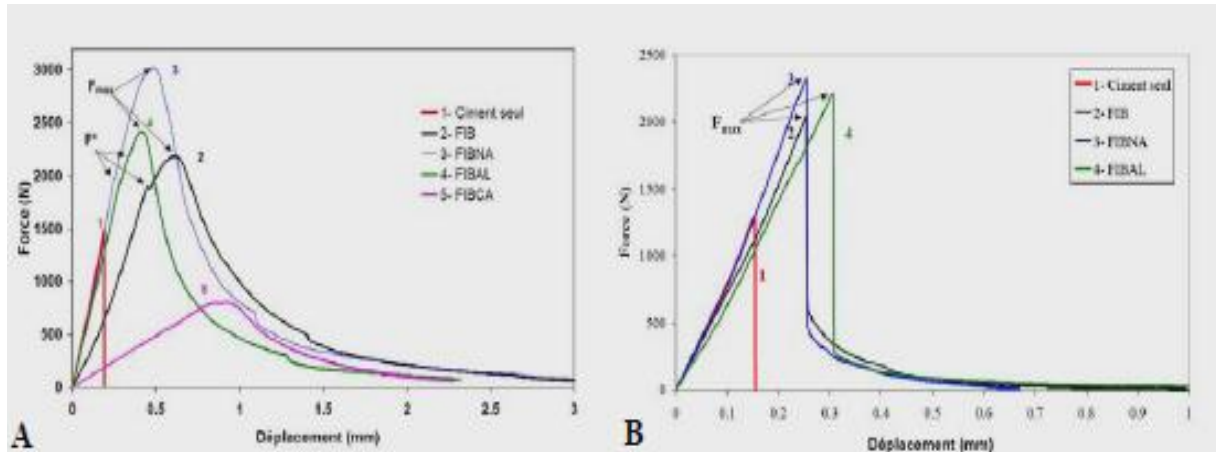


Figure I.76 : Comportement mécanique en flexion 3 points d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de chanvre brutes (FIB) et des fibres de chanvre traitées avec une solution de soude (FIBNA), de chlorure d'aluminium (FIBAL) et de chaux (FIBCA) à 28 jours (A) et après 12 mois de vieillissement naturel (B) [72].

Des résultats comparables sont obtenus par **Mohr et al. [81]** sur des composites de ciment renforcés par de la pâte kraft de conifères. Les éprouvettes soumises à des cycles de saturation en eau/séchage présentent une perte de la résistance maximale de 50.8 à 72.4% et une chute de la ténacité de 97.5 à 98.8%. La Figure I.77 présente l'évolution typique du comportement en flexion d'échantillons soumis à 0, 5, 10 et 25 cycles de vieillissement.

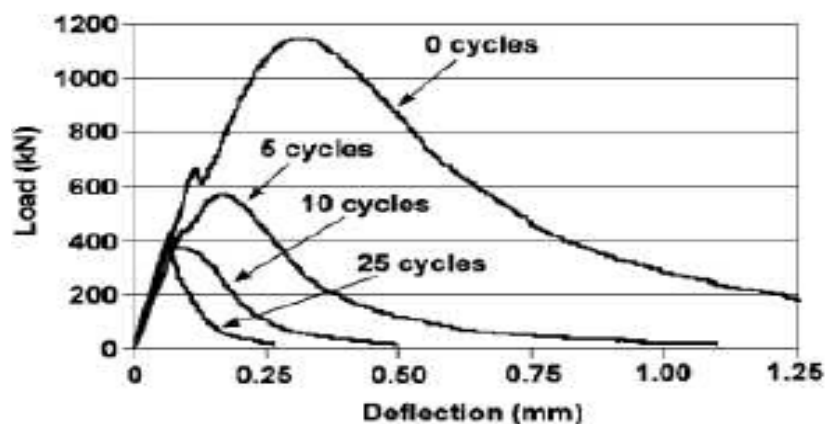


Figure I.77 : Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion 3 points de ciment renforcé par des fibres de conifères [81].

La majorité des auteurs relève, en parallèle de la chute de ductilité, une augmentation de la résistance à la première fissure ([82], [83], [84]). Au contraire, **Mohr et al. [81]** mettent en évidence une chute de cette contrainte à la première fissure de 43.5 à 52%. Un autre phénomène mis en évidence par différents auteurs ([84], [81]) est la modification du mode de rupture des fibres caractéristiques de la mauvaise durabilité des fibres en milieu alcalin. Tandis que pour les composites au jeune âge, la rupture se fait par arrachement des fibres, pour les échantillons vieilliss, le nombre de fibres cassées augmente et la longueur d'arrachement des fibres diminue.

Dans une étude sur la durabilité d'éléments de mortier compressé renforcé par des fibres de sisal, **Toledo et al. [84]** ont également mis en évidence une modification du mode de rupture à l'échelle de l'échantillon, rupture multifissurée pour les échantillons non vieilliss et rupture monofissurée pour les échantillons ayant subi les cycles de vieillissement.

X.2 Identification des mécanismes de dégradation des composites de fibres végétales en milieu alcalin

Le premier mécanisme expliquant la perte de ductilité des composites fibrés par des fibres végétales est la dégradation de ces fibres dans le milieu alcalin de la matrice. Afin d'étudier ce phénomène, plusieurs auteurs ont suivi les propriétés de fibres végétales immergées dans différentes solutions alcalines.

Juarez et al. [85] ont mesuré la résistance en traction et l'allongement à la rupture de fibres d'agave immergées dans une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à pH 12.5. Après 12 mois d'immersion, les fibres conservent environ 30% de leur résistance à la traction initiale et seulement 17 à 27% de leur ductilité. **Toledo et al. [83]** ont comparé l'effet de l'immersion de fibres de sisal et de coir dans de l'eau à pH 8.3, du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à pH 12 et du NaOH à pH 11 afin de distinguer d'une part l'effet du pH et d'autre part celui de la présence des ions calcium sur la durabilité des fibres végétales :

- Après 210 jours d'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium, la résistance en traction résiduelle des fibres de sisal et de coco représente respectivement 33.7 et 58.7% de leur résistance initiale;

- Après immersion dans la solution de soude, les résistances résiduelles sont nettement plus élevées, à savoir 72.7 et 60.9 % de la résistance initiale après 420 jours d'immersion. Cette différence est attribuée par l'auteur à la cristallisation de chaux dans les pores des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium ce qui affecte leur résistance en traction. Cette hypothèse relève une action spécifique des ions calcium par rapport à l'immersion de fibres dans des solutions d'hydroxyde de sodium ou de potassium. Des expériences comparables ont été menées par **Kriker et al. [82]** sur des fibres de palmier dattier. Les résistances résiduelles après 6 mois d'immersion sont légèrement plus élevées pour la solution de NaOH que pour celle de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De plus, l'auteur identifie, par observation des fibres au microscope électronique à balayage, deux modes d'action distincts de dégradation. Tandis que l'attaque par le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ semble diffuse et relativement uniforme (la fibre est recouverte entièrement d'un dépôt de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui pénètre dans tous les pores de la fibre), l'attaque par NaOH est localisée (des trous apparaissent à la surface des fibres, et des dépôts sont visibles localement).

La perte de résistance dépend certes de la solution agressive mais également des propriétés intrinsèques des fibres. Ainsi, **Kriker et al [82]** mettent en évidence le fait que plus le diamètre

de la fibre est faible, plus la chute de résistance est intense. **Ramakrishna et al.[34]** comparent les effets de l'immersion ou de la soumission à des cycles humidification/séchage dans de l'eau, du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou du NaOH sur les propriétés de fibres de coir, sisal, jute et Hibiscus cannabinus. Les résultats obtenus sont relativement différents en fonction de la nature des fibres :

- le mode de dégradation le plus agressif semble être les cycles d'humidification/séchage avec la solution d'hydroxyde de calcium, pour laquelle, à l'issue de 30 cycles, les fibres de sisal, jute et Hibiscus cannabinus sont totalement détruites. Pourtant, avec ce même mode d'attaque, les fibres de coir conservent entre 20 à 40% de leur résistance originale. L'auteur fait l'hypothèse que cette différence provient des différences de porosité entre les fibres; celles du sisal, de la jute et de l'Hibiscus cannabinus, plus importante que celle du coir, permettraient la cristallisation de produits issus de la solution alcaline dans leur pores, ce qui entraînerait leur fragilisation ;

- le résultat de l'immersion dans l'eau dépend également du type de fibres. Les fibres de coir et de sisal conservent respectivement 50 à 60% et 60 à 70% de leur résistance initiale, tandis que les fibres de jute et d'Hibiscus cannabinus ne conservent au maximum que 20% de leur performance initiale. L'auteur attribue la perte de résistance par immersion dans l'eau pure à une action microbiologique;

- Enfin, l'auteur met en évidence une chute substantielle de la teneur en cellulose (de 20 à 85%) et de l'hémicellulose (de 30 à 70%) des différentes fibres soumises aux différents traitements. La dégradation des fibres en milieu alcalin serait donc due à la dissolution partielle ou totale de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine qui les composent. La décomposition de la cellulose en milieu alcalin intervient suivant deux phénomènes :

- Le « peeling-off » qui concerne les extrémités des chaînes moléculaires, constituées de groupes réducteurs qui réagissent avec les ions OH^- de la solution basique. Cette réaction conduit à la formation d'acides isosacchariniques (CH_2OH) qui se détachent de la chaîne. Ce mécanisme ne s'attaquant qu'aux extrémités des chaînes il sera par conséquent d'autant moins dangereux que le degré de polymérisation de la cellulose sera élevé;

- l'hydrolyse alcaline qui entraîne la division de la chaîne moléculaire et la diminution du degré de polymérisation, conduisant à une plus grande sensibilité au premier mécanisme. Cependant, l'hydrolyse alcaline n'intervient à un fort taux qu'à partir d'une température de 100°C .

La décomposition de l'hémicellulose se fait suivant les mêmes mécanismes que ceux précédemment décrits, mais son degré de polymérisation étant faible, le mécanisme de « peeling-off » devient prépondérant. La lignine est constituée de composés aromatiques facilement dégradés dans un environnement alcalin. La première cause de dégradation des fibres de sisal (sur lesquelles est basée son étude) est donc la décomposition chimique de la lignine et de l'hémicellulose de la lamelle mitoyenne. Dans un milieu alcalin, la liaison entre les fibres individuelles est brisée comme l'illustre la Figure I.78. Le lumen, vide central des fibres de sisal, est rempli d'hydroxyde de calcium et perd ainsi sa flexibilité.

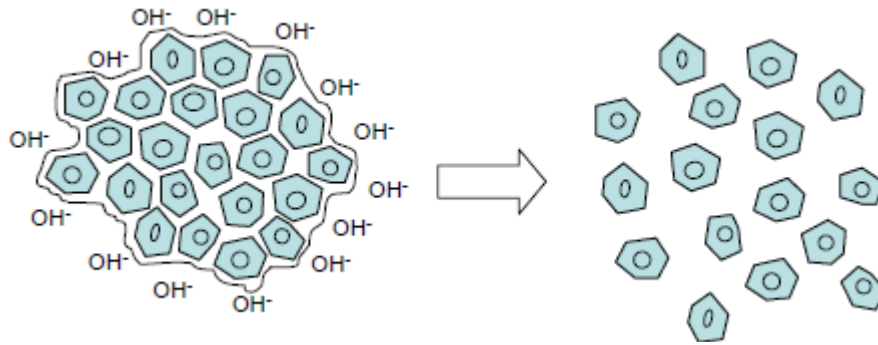


Figure 1.78 : Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin.

Les résultats des travaux de **Sedan [72]** sur les fibres de chanvre diffèrent sensiblement puisque, si la concentration en hémicellulose des fibres soumises à des traitements alcalins ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaOH) diminue effectivement, en revanche la teneur en lignine n'est pas modifiée. En outre, les analyses thermiques différentielles réalisées dans cette étude révèlent une forte interaction entre la pectine et le calcium. Par ailleurs, l'auteur relève une augmentation du degré de cristallinité de la cellulose par traitement alcalin au NaOH , qu'il traduit par une solubilisation partielle des parties amorphes des fibres (cellulose amorphe, hémicellulose, graisses et cires). Pourtant, il observe qu'un traitement des fibres par une solution alcaline de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ induit, au contraire, une légère diminution du degré de cristallinité de la cellulose. L'effet de la solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présente donc des spécificités par rapport aux autres solutions d'immersion : d'une part, **Sedan** détecte par diffraction de rayons X, le pic caractéristique de la calcite sur les fibres. D'autre part, il met en évidence, par dosage, une quantité importante de calcium fixée à la surface des fibres (phénomène non observé lorsque les fibres sont immergées dans une solution de chlorure de calcium). Ces observations confirment donc l'interaction entre les fibres de chanvre et les ions calcium en milieu basique.

XI. Domaine d'application des éléments en plâtre armé de fibres

Ces éléments sont fabriqués sous forme de plaques planes avec fibres végétales ou minérales, ils sont employés essentiellement comme panneaux pour cloisons et comme feuilles de revêtement pour mur ou plafonds appelés « enduit de plâtre sec à fibres ».

a) Panneaux en béton de plâtre pour cloisons

Ils sont employés pour les cloisons non porteuses dans les bâtiments publics et d'habitation à humidité relative ne dépasse pas 60 % pour les maisons d'habitations. Ces panneaux sont fait tout continus qu'avec biais pour les portes, ils ont une hauteur pouvant atteindre 3 m, une longueur jusqu'à 6m et une épaisseur de 80 à 100 mm.

Pendant la fabrication des panneaux de cloisons, on doit s'attacher principalement à remplir les exigences concernant l'isolation phonique et la résistance. Ces exigences sont satisfaites par l'emploi d'un béton de plâtre ayant une masse volumique de 1250 à 1400 kg / m^3 , obtenue avec un rapport volumétrique égale de plâtre, sable et fibre (1:1:1).

Les fibres généralement utilisées sont les sciures de bois, la laine, la paille hachée, les déchets de papier, les tiges ou les fibres de roseaux etc.

b) Feuilles de revêtement en plâtre

Ces feuilles sont appelées aussi enduits de plâtre sec ou bien enduit de plâtre sec à fibres. La résistance à la flexion de ce type d'enduit au milieu de la portée doit être au moins égale à 2.5 et 3.2 Mpa pour des épaisseurs respectives de 10 et 12 mm et une masse volumique de l'ordre de 1000 kg / m³.

Les études [86] montrent la préfabrication des éléments de cloisons de 1,20 x 2,50 m qui font une hauteur d'étage, pièces plus ou moins complexes comportent deux paramètres en feuilles de plâtre, et une âme soit en réseau de carton type nid d'abeille soit en vermiculée, soit en fibres végétales. Parfois, une feuille d'air médiane améliore la tenue au feu.

Les composites avec des fibres végétales peuvent être utilisés aussi pour la confection des linteaux.

XII. Coût

Les bétons de fibres possèdent des propriétés qui résultent de celles de chacun de ses composants, donc le coût du composite dépend de celui, des constituants fibres et béton aux quelles s'ajoutent, les investissements nécessaires à leur fabrication et à leur mise en place.

Pour le présent travail, on a utilisé des fibres végétales du palmier dattier d'une source renouvelable, disponible, à faible coût et d'une matrice dont ses composants sont localement produits, il reste donc à estimer le produit final et ses conditions de mise en œuvre.

XIII. Conclusions

L'utilisation du béton armé de fibres permet d'exploiter la plus grande résistance à la traction du matériau et le pouvoir isolant. Toute fois ses améliorations sont subordonnées à certains paramètres, tels que :

- La distribution uniforme et l'orientation adéquate des fibres dans la matrice béton, lui confèrent des propriétés ne pouvant être obtenues en aucun cas pour le béton armé traditionnel.
- Le pourcentage et la longueur des fibres augmentent la résistance à la flexion et la ductilité du matériau, mais influe sur la maniabilité.
- la conductivité thermique décroît avec le dosage des fibres courtes.

Les fibres végétales peuvent être utilisées comme renfort et aboutir à des résultats comparables, si non satisfaisantes par rapport aux autres types de fibres. La bibliographie met donc en évidence une chute de la résistance et de la ductilité des fibres végétales en milieu alcalin par décomposition partielle de ses constituants et en particulier de la lignine et de l'hémicellulose constituants de la lamelle mitoyenne. De plus, l'immersion dans une solution d'hydroxyde de calcium induit une dégradation plus intense des fibres du fait de la précipitation

d'hydroxydes ou de carbonates de calcium à la surface ou dans les pores des fibres, ce qui entraîne leur rigidification et donc leur fragilisation. Cependant ces phénomènes sont largement dépendants de la nature des fibres végétales considérées.

XIV. Bibliographies

- [1] **Festa J.**, Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes. Edition Eyrolles, 1996.
- [2] **Jaffel H.**, Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique 91128 Palaiseau Cedex, France, 2006, P.159.
- [3] **C.N.E.R.I.B.**, Recommandations pour la construction en plâtre. Ministère de l'habitat, Centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment, 1993.
- [4] **Site : <http://www.svt.acversailles.fr/>**. Le gypse, propriétés physiques et chimiques.
- [5] **Site : www.jeanduperrex.ch/Site/Gypse.html**.
- [6] **Site : www.ruedeslumieres.morkitu.org**. Le gypse et son exploitation.
- [7] **Site : www.mem-algeria.org**.Ministère de l'énergie et de mines.
- [8] **Daligand D.**, Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction C 910, 2002.
- [9] **Meille S.**, Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructu. re. Thèse de doctorat de l'INSA Lyon, France, 2001, p. 219.
- [10] **Sattler, H. and Bruckner, H.P.**, Changes in volume and density during the hydration of gypsum binders as a function of the quantity of water available. ZKG International **54 (9)**, 2001, pp.522.
- [11] **Finot, E., Lesniewska, E., Mutin, J. C., and Goudonnet, J. P.**, Investigations of surface forces between gypsum microcrystals in air using Atomic Force Microscopy. Langmuir **16**, 2000, pp. 4237-4244.
- [12] **Chappuis, J.**, A new model for better understanding of the cohesion of hardened hydraulic materials. Colloids and Surfaces **156**, 1999, pp. 223-241.
- [13] **Coquard, P.**, Résistance mécanique des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat, de l'Université d'Aix-Marseille III: France, 1992,P. 93.
- [14] **Badens, E.**, Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques du plâtre pur et additive. Génie des procédés et physico chimie. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III: France, 1998, P.110.
- [15] **Ghoulam Allah S.**, Etude des caractéristiques des matériaux de construction de zaouïa Tidjania de Ghemar, Oued Souf. Préparation d'un mortier de plâtre pour restauration. Institut d'archéologie. Université d'Alger 2. 2011, P.143 (Document en arabe).
- [16] **Vimmrova A., Keppert M., Svoboda L., Cerny R.**, Light weight gypsum : Design strategies for multifonctionnory. Journal of cement concrete composite **33**, 2011, pp.84-89.
- [17] **Abdelmoumen Chaker A.**, Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999.

- [18] **Teggour H.**, Technique de construction en mortier de plâtre banche. Colloque maghrébin sur la construction en matériaux locaux. MATLOC 91, C.N.E.R.I.B, 1991, pp. 45 – 53.
- [19] **Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Kadri E.H., Debicki G.**, Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. International journal of physical sciences, Vol. 7(21), 2012: pp. 2845-2853.
- [20] **Amrani Y., Chmali L.**, Comportement sous charges des voûtains à base de plâtre. Revue marocaine du génie civil, N° 44, Avril 1993, PP. 25 –32.
- [21] **Zitani. I.**, Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre à base des granulats de liège. Mémoire d'ingénieur, Université de Laghouat, 2011, P. 83.
- [22] **Hernández-Olivares F., Bollati M.R., Del Rio M., Parga-Landa B.**, Development of cork gypsum composites for building applications. Construction and Building Materials, vol. 13, 1999, pp. 179-186.
- [23] **Debouci. Z., Teggour. H., Chili.T.**, Rôle de la chaux dans les protections extérieures en plâtre. Séminaire pour la construction en plâtre. C.N.E.R.I.B, 4, 5, 6 Décembre 1989.
- [24] **Soltane. M. L.**, Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra., colloque maghrébin sur la construction en matériaux locaux. MATLOC 91, C.N.E.R.I.B, 1991, pp. 101 – 104.
- [25] **Zuber. F.**, Pour une construction en plâtre. Communication, (Plâtre Lafarge), 1989.
- [26] **Aldebert. R.**, Rénovation du Grand Louvre à la gloire du plâtre. Le moniteur des travaux publics et du bâtiment, N° 41615,1992, pp. 56 – 68.
- [27] **C.S.T.B.**, Préparation des sols, des plaques de plâtre en chape flottante sèche. Le moniteur des sols, murs, plafonds, 1992, pp. 1162 – 3497.
- [28] **Djoudi A.**, Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier. Mémoire de Magister, Université de Amar Thelidji Laghouat, 2002, P.118.
- [29] **Camara O.**, Le plâtre P.S.O.A dans la construction au Sénégal. Séminaire international sur le plâtre en Algérie., du 3 au 5 Décembre 1989.
- [30] **Lababidi I.**, Utilisation des fibres de déchets industriels et végétales pour renforcer les bétons et les mortiers. Environnement et gestion durable des écosystèmes naturels au moyen orient. Du 18 au 20 avril 2001, Berytech, Technologie santé.
- [31] **Baley C.**, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques del'Ingénieur. AM 5 130 – 1-12.2004.
- [32] **Oudet C.**, Polymères. Structure et propriétés. Masson, Paris, 1993.
- [33] **Mohanty A.K., Misra M. et Hinrichsen G.**, Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. Macromolecular. Materials and Engineering, 276/277, 2000, pp.1-24.

- [34] **Ramakrishna G., Sundararajan T.**, Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, pp.575–582.
- [35] **CARMA**, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable. Centre d'animation régional de matériaux avancés, Décembre 2005.
- [36] **Pacheco Torgal F., Jalali S.**, Vegetable Fibre Reinforced Concrete, *Composites: A Review*, Materials 2009.
- [37] **Baley C.**, Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase, *Composites, Part A*, 33, 2002, pp. 939-948.
- [38] **Kohler L., Spatz H.C.**, Micromechanics of plant tissues beyond the linear-elastic range. *planta*, 215, 2002, pp. 33-40.
- [39] **Bos H.L., Van Den Oever M.J.A., Peters O.C.J.J.**, Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 37, 2002, pp. 1683-1692.
- [40] **Poza P., Pérez - Rigueiro J., Elices M., Llorca J.**, Fractography analysis of silkworm and spider silk. *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 2002, pp. 1035-1048.
- [41] **Garrido M.A., Elices M., Viney C., Perez-Riguero J.**, The variability and interdependence of spider drag line tensile properties. *Polymer*, 43, 2002, pp. 4495-4502.
- [42] **Vollrath F.**, Strength and structure of spiders' silks. *Reviews in Molecular Biotechnology*, Vol. 74, issue 2, Août 2000, pp. 67-83.
- [43] **Ait Ameer Meziane M.**, Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales, Université de Tiaret, P.165.
- [44] **TECHNIQUE DE L'INGENIEUR**. P.C III 2210.12 – CIII.2210.16, 1989 – 1991.
- [45] **Beleffrag A.**, Valorisation des fibres métalliques issues de déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dune. Mémoire de Magister, Université d'Ouargla, 2006, P.112.
- [46] **Schrader. E. K.**, Le béton armé de fibres. Comité des Etats unis, VSOLD, 1982.
- [47] **Serna-ros. P.**, Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du Comportement du béton au cisaillement. Thèse de docteur – ingénieur à L.N.P.C, Septembre 1984.
- [48] **A. C. I. Comité 544.**, State of the art report on fiber reinforced concrete, A.C.I, U.S.A, 1982.
- [49] **Benadjila D., Djokhdem H.**, L'optimisation et le comportement physico-mécanique des bétons renforcés par les fibres de l'alfa stipia tenacissima. Mémoire d'Ingénieur. Université de Laghouat, 2005, P.97.

- [50] **Meddah M.S.**, Etude d'un béton renforcé de fibres issues de déchets industriels. Mémoire de Magister. Université de Laghouat, 2000, P.111.
- [51] **Bendjillali K., Chemrouk M., Damene Z.**, Etude de l'effet des paramètres de renforcement sur le comportement mécanique des mortiers à sable calcaire, 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, 2009, Oran, Algeria.
- [52] **Gorrise F.**, Essais et contrôle du béton. Edition Eyrolles, 1978.
- [53] **Rossi P., Harrouche N., Albert B.**, Méthode de composition des bétons de fibres Métalliques. Annales de L'.I.T.B.T.P, N° 475, Juin 1989.
- [54] **Baron J., Lesage R.**, Pour une étude pratique de la maniabilité, le maniabilimètre Lesage du laboratoire central des ponts et chaussées. Laboratoire central des ponts et chaussées, bulletin de liaison L.C.P.C, N° 13, 1985.
- [55] **Bouhekouk. M.**, Etude du béton renforcé par les fibres de verres enduites de polymères thermoplastiques. Thèse de Doctorat, INSA du Lyon, France, 1992.
- [56] **Çolak A.**, Physical and mechanical properties of polymer-plaster composites. Journal .Material. Letters, 60, 2006, pp. 1977–1982.
- [57] **Bentchicou M., Hannini S., Silhadi K., Guidoum A.**, Elaboration et étude d'un mortier composite à matrice minérale et fibres cellulosiques : Application à l'isolation thermique des bâtiments, Canadian journal of civil engineering, CNRC. Canada, Vol.3. 2007, PP.37- 45.
- [58] **Khedari J., Suttisonk B., Pratinthong N., Hirunlabh J.**, New light weight composite construction materials with low thermal conductivity. Journal of Cement Concrete Composite (23), 2001, pp. 65-70.
- [59] **Ismail M.A.**, Compressive and tensile strength of fibre reinforced cement base composites, AL Rafidain Engineering, vol.15, N°2, 2007, pp.42-51.
- [60] **Mohebbi B., Tavassoli F., Kazemi-Najafi S.**, Mechanical properties of medium density fiberboard reinforced with metal and woven synthetic nets. Europpen journal of wood and wood products, Holz als Roh werkstoff, Springer-Verlag, 2011, pp.199-206
- [61] **Oda S., Fernandes Jr J.L., I ldefons J.S.**, Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. Construction and Building materials, vol.26, Issue 1, 2012, pp.13-20.
- [62] **Djoudi A., Khenfer MM., Bali A., Debicki G.**, L'introduction des éco-matériaux dans la construction, une alternative pour la protection de l'environnement. 1^{er} Séminaire National de Génie Civil sur les matériaux et protection de l'environnement, Université de Mostaghanem, 2011.
- [63] **Garcia Santos A., Rincon J.Ma., Romero.M., Talero.R.** Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing. Construction and building materials, vol.19 (5), 2005, pp.396-403.

- [64] **Kriker A.**, Caractérisation des fibres du palmier dattier et propriétés des bétons renforcés par ces fibres en climat chaud et sec. Thèse de doctorat, ENP d'Alger, 2004, P.165.
- [65] **Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A.**, Etude d'un nouveau composite renforcé avec les fibres du palmier dattier. 1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, ENSET Oran, Algeria, October 12-14, 2009.
- [66] **Ramakrishna G., Sundararajan T.**, Impact strength of a few natural fibres reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, 2005, pp.547-553.
- [69] **Savastano H., Agopyan V., Nolasco A. M., Pimentel L.** Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction and Building Materials*, vol. 13 .1999.pp. 433-438.
- [70] **Alida A., Shamsul B.J., Mazlee MN., Kamarudin H.**, Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior, *Australian Journal of Basic & Applied Science* 5(7), 2011, pp. 1228-1240.
- [71] **Eve S, Gominaa M, Gmouhb A, Samdib A, Moussab R, Orangec G.** Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites. *Journal of European Society* 22, 2002, pp. 2269–2275.
- [72] **SedanD.**, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2007, P.128.
- [73] **Mattone R.**, Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique. *Cement & Concrete Composites*, vol.27, 2005, pp. 611–616.
- [74] **Abdou K., Houari H.**, The influence of steel fibres on the shrinkage of the concrete. *Proceedings of the International Conference on Concrete Technology in Developing Countries Hammamat – Tunisia*, 8-9 November 2007, pp.105-115.
- [75] **Merkhoufi A.**, Contribution à l'étude des propriétés et déformations du béton renforcé par les fibres du palmier dattier en climat sec et chaud. Mémoire de Magister, Université d'Ouargla, 2004, P.69.
- [76] **Kaci S., Chahour K.**, Etude de fluage du béton de fibres métalliques. *Congrès International de Réhabilitation des constructions et Développement durable*. Alger. 3 et 4 Mai 2005, Tome 2 : pp.217-221.
- [77] **Ashour T., Wieland H., Georg H., Bockisch F.J., Wue W.**, The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Journal of Materials and Design*, vol.31, 2010, pp. 4676–4685.
- [78] **Cristel O., Passe-Coutrin N., Toro F., Delvasto S., Bilba K. , Arsène M-A.**, Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. *Composites: Part A*, 2010, pp.1-8.

- [79] **Mangal R., Saxena N.S., Sreekala M.S., Thomas S., Singh K.**, Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites. *Materials Science and Engineering A339*, 2003, pp. 281- 285.
- [80] **Yang H.S, K D.J, Kyu Lee Y, Kim H.J, Jeon J.Y, Kang C.W.**, Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Journal of Bioresource Technology*, Vol. 95, 2004, pp. 61–65.
- [81] **Mohr B.J., Nanko H., Kurtis K.E.**, Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling, *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, 2005, pp. 435-448.
- [82] **Kriker A., Bali A., Debicki G., Bouziane M., Chabannet M.**, Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, 2008, pp. 639-648.
- [83] **Tolêdo Filho R. D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K.**, Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar Composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 2, 2000, pp. 127-143.
- [84] **Tolêdo Filho R. D., De Andrada Silva F., Fairbain E.M.R., De Almeida Melo J.**, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 2409-2420.
- [85] **Juarez C., Duran A., Valdez P., Fajardo G.**, Performance of “Agave Lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment*, vol.42, 2005, pp. 1151–1157.
- [86] **Le Covec J.**, *Traité de maçonnerie plâtrerie*. Editions J – B. BAILLIERE, Paris, 1978.

CHAPITRE II

*Caractérisation des matériaux utilisés et
formulation des composites*

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation des composites

I. Introduction

Les capacités de production actuelles des matériaux modernes n'étant pas suffisantes et souvent leur coût pouvant être élevé dans les pays en voie de développement, il faut construire avec les moyens disponibles tant en matériels qu'en matériaux. Les matériaux locaux et les techniques traditionnelles se trouvent répondre à l'exigence de l'heure.

A la recherche des matériaux locaux répondant aux exigences du climat saharien et en établissant une formulation adéquate afin d'obtenir un matériau rentable, nous avons utilisé des matériaux localement produits.

Les matériaux étudiés sont des bétons de plâtre renforcés avec les fibres végétales du palmier dattier. Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolants porteurs, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice béton de plâtre et l'isolation par la faible conductivité thermique des fibres du palmier dattier.

L'objectif de ce chapitre est de faire une caractérisation générale des matières premières utilisées et la formulation des composites.

II. Matières premières

II.1. Plâtre

Le plâtre utilisé dans cette étude est produit du gypse provenant des gisements de Ghardaïa; il est disponible sur le marché.

Les résultats de l'analyse minéralogique et chimique, nous ont été transmis par l'usine et ils sont comme suit :

- L'analyse minéralogique nous montre que le plâtre utilisé est de qualité et cela d'après sa teneur en gypse $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ élevée, environ 96%, ce qui nous a permis de le classer en classe I et qui correspond à une teneur en gypse $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ supérieure à 90 % (Tableau I.1).
- Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Analyse chimique du plâtre utilisé.

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	KO	Cl	Perte au feu Calculée
Pourcentage (%)	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,03	0,002	5,39

D'après le tableau II. 1, on remarque que les deux espèces les plus prépondérantes sont le SO₂ et le CaO. Ce qui affirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium, avec quelques traces d'oxyde de magnésium, oxyde de fer, oxyde d'aluminium et le quartz.

II.1.1. Essais effectués sur le plâtre

II.1.1.1. Finesse de mouture

Pour apprécier la finesse du plâtre, nous avons enregistré les refus sur les tamis d'ouvertures inférieures ou égales à 800 microns :

- Refus sur le tamis 800 µm = 2,6 % ;
- Refus sur le tamis 200 µm = 14,2 %.

D'après le tableau I.3 du chapitre I et les résultats obtenus on constate que :

Le refus sur le tamis 800 um < 20% et le refus sur le tamis 200 um > 5 %, ce qui implique que le plâtre utilisé est un plâtre grossier de construction.

II.1.1.2. Masse volumique absolue

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide (l'éthanol) contenu dans le densimètre de Chatelier, lorsqu'on introduit la poudre du plâtre. La masse volumique absolue du plâtre obtenue est de l'ordre 2500 ± 2,00 kg / m³

II.1.1.3 Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides); elle est notée ρ_{app} et donnée comme suit :

$$\rho_{app} = M / V \quad (II-1)$$

M : Masse de l'échantillon;

V : Volume total de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu).

Il s'agit de remplir un volume de 1litre et on pèse la masse totale **M_T**, la masse de l'échantillon **M** est comme suit :

$$M = M_T \square M_R \quad (\text{II-2})$$

M_R : Masse du récipient

La masse volumique apparente du plâtre obtenue est de l'ordre $858,88 \pm 1,49 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

II.1.1.4. Surface spécifique

La surface spécifique du plâtre a été déterminée par le perméabilimètre automatique de Blaine au niveau du labo. LGCIE de l' INSA de Lyon, comme le représente la figure II.1.

Afficheur du temps



Figure II.1 : Perméabilimètre de Blaine.

La surface spécifique du plâtre obtenue est de l'ordre 3331 g/cm^2 .

II.1.1.5. Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre et du temps de prise

La quantité de gâchage à saturation est la quantité de plâtre en grammes, humidifiée lors de son versement dans 100 g d'eau. Cette valeur est déterminée comme suit, selon la norme NFB 12- 401. Dans un récipient cylindrique en verre ou en métal de diamètre intérieur 65 mm, introduire 100 g d'eau distillée en évitant de mouiller la partie supérieure de la paroi. Peser la masse M_0 du récipient et de l'eau.

- Saupoudrer le plâtre, la surface de l'eau en évitant de garnir les bords du récipient, opérer de sorte qu'au tout de 3 minutes, il n'y ait plus de pellicule d'eau à la surface de la pâte ;
- Laisser reposer quarante (40 secondes), puis continuer à saupoudrer jusqu' a fleur d'eau (20s);
- Peser à 4 minutes, la masse M_1 du récipient, de l'eau et du plâtre introduit.

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

$$\frac{M_1 - M_0}{100} \quad (\text{II-3})$$

M₀: Masse du récipient et de l'eau

M₁: Masse du récipient ; de l'eau et du plâtre.

Cette valeur doit être comprise entre **1,67** et **3,33**.

Pour le plâtre utilisé on a trouvé une valeur $P / E = 1,67$ d'où un rapport $E/ P = 0,60$ et qui est recommandé par le C.N.E.R.I.B [1].

Le temps de prise permet d'évaluer le temps nécessaire pour mettre en œuvre le plâtre et prévoir éventuellement un ajout (accélérateur ou retardateur de prise).

Après le gâchage à saturation, le mélange, plâtre + eau est versé sur une plaque de verre à l'aide d'un couteau, on tranche la galette, le début de prise est caractérisé par la fermeture de la coupure.

Le temps de prise est déterminé, si une certaine pression du pouce sur la galette ne fait plus sortir de l'eau.

On a enregistré un temps très court de 7 minutes, d'où la nécessité d'un retardateur de prise.

II. 2. Sable

Les régions du sud disposent de grands gisements de sable de dune et alluvionnaire, ces sables sont non ou peu exploités. Afin de valoriser ces richesses naturelles et du point de vue environnemental, on a choisi le sable de dune dans la présente étude, provenant de la région d'oasis nord de la ville de Laghouat.

Selon les caractéristiques imposées au sable [1], pour la confection des mortiers et des bétons de plâtre, il faut que :

- Les sables doivent être propres et exempts de matières gypseuses et de matières organiques;
- L'utilisation d'un sable siliceux est préférable au sable calcaire en raison de sa moindre capacité d'absorption d'eau.

Afin de vérifier les deux conditions précédentes, on a procédé par les essais qui suivent ;

II.2.1. Essais effectués sur le sable

II. 2.1.1. Analyse thermique différentielle

Cette méthode permet de détecter les variations de la température au sein d'un système soumis à un chauffage progressif dans toute transformation physico- chimique d'un solide qui s'accompagne d'un dégagement ou d'une absorption de la chaleur; on utilise cette technique pour caractériser les substances (roches, mineries, les polymères).

II. 2.1.2. Analyse thermique thermogravimétrique

La thermogravimétrie est une technique qui consiste à enregistrer la variation des masses d'un échantillon solide en fonction de la température, les courbes sont obtenus à l'aide d'une thermo balance.

Pour notre cas, on a essayé de faire pour les échantillons à étudier, une analyse thermique différentielle et thermogravimétrique couplée.

II.2.1.3. Appareillage et mode opératoire

a) Appareillage

Cet essai a été réalisé au sein du laboratoire des matériaux minéraux de L' INSA de Lyon. Le dispositif utilisé est représenté sur la figure ci-dessous.



Figure II.2 : Dispositif utilisé de l'ATD et l'ATG couplée.

Le dispositif est composé :

- Un four et sa régulation dans lequel on dispose la substance à examiner;
- Le system enregistreur potentiometre électronique;
- Une balance qui assure la pesée.

b) Mode opératoire

Tous les échantillons étudiés par cette technique ont été finement broyés et tamisés à 100 μ . On remplit deux creusets identiques en nickel, l'un avec la substance à étudier, l'autre d'un corps inerte, dans notre cas on a pris du méta kaolin déjà cuite à 200°C. Le poids des échantillons étudiés varie de 600 à 1000 mg.

Dans chacun des creusets, on plonge un thermocouple allié en Chrome – Nickel. Les deux thermocouples montent en opposition, sont relié à un Galvanomètre, un troisième thermocouple est plongé dans la substance servira à repérer la température. Les deux premiers thermocouples, nous ne donnerons aucun courant dans le circuit, tant que la température sera identique dans les deux creusets. Une réaction thermique se produit dans la substance examinée, le potentiel des thermogrammes, correspondants sera supérieur ou inférieur à celui de la référence et un courant passera dans le Galvanomètre.

Le sens de la déviation indiquera, si la réaction est endothermique ou exothermique, grâce à le premier thermocouple, on pourra repérer, la température à la quelle, ce produit est en déviation.

Les résultats de l'analyse thermique différentielle montrent qu'il existe juste un pic exothermique de transformation du quartz α vers quartz β à une température de 570° C .Fig. II.3, ce qui affirme que le sable utilisé est siliceux.

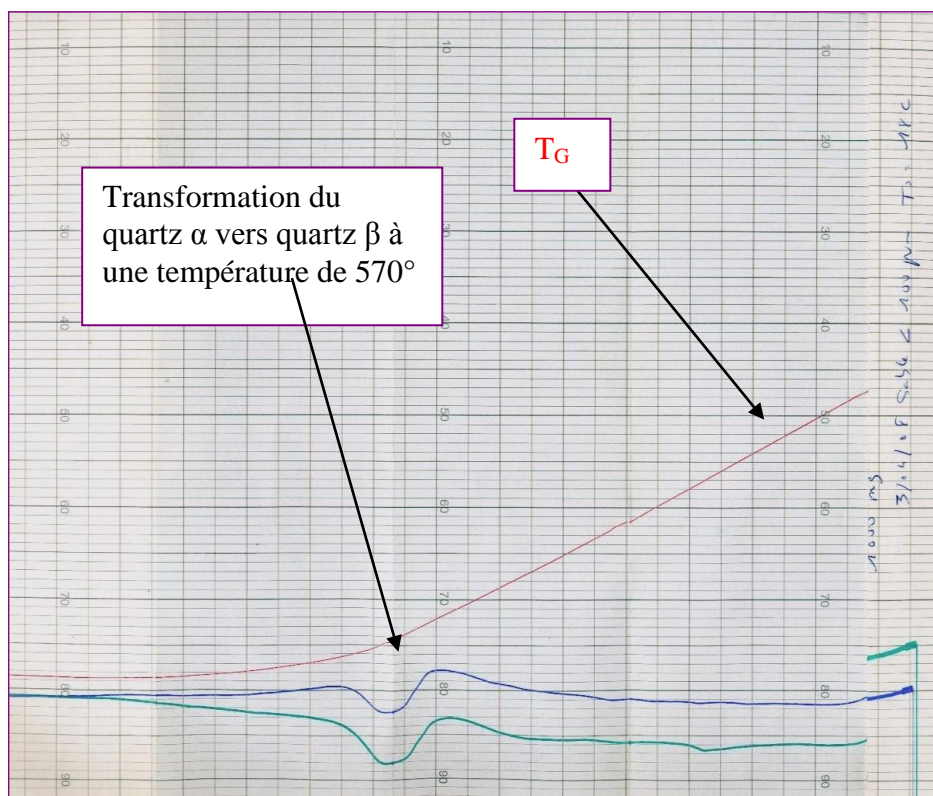


Figure II.3: Analyse thermique différentielle des fines de sable.

II.2.1.4 Diffraction par les rayons X

La technique de diffraction des rayons X a pour but la détermination de l'état de cristallisation des matériaux et leur état d'amorphisation après traitement thermique.

Un diffractomètre est utilisé pour l'obtention des spectres de diffraction des poudres des échantillons étudiés. Fig. II.4. La poudre de 100 μ m est bombardée par des électrons émis par une anticathode de cuivre (CuK α 1.5418 Å°). La mesure des intensités est effectuée en réflexion à l'aide d'un compteur linéaire (méthode de Bragg Brentano). L'intérêt de cette technique est d'identifier les différentes phases cristallines des matériaux étudiés, elle présente néanmoins l'inconvénient de ne pouvoir détecter une phase si la teneur de celle-ci dans le mélange est inférieure à 5%.

Une base de données a été créée, Aujourd'hui nommée " Powder Diffraction file" (PDF). Elle est mise à jour annuellement et distribuée par "International Centre Diffraction Data, Chacune des plus 170000 fiches actuellement enregistrées contient au moins l'ensemble des couples (d, I) pour chaque pic connu. Elle nous renseigne aussi souvent sur la structure du matériau, les conditions opératoires, les publications, les plans HKL, ect ...



Figure II.4 : Diffractomètre BRUKER, D₈ Advance.

Le diffractogramme du sable de dune utilisé est présenté sur la figure II.5. On remarque la présence d'un grand pic du quartz et c'est l'espèce la plus prépondérante, on a pu détecter aussi des pics de faible intensité d'Anatase (oxyde de titanium) et d'autres pics moins intenses tels que la Microcline et la Microcline orderd.

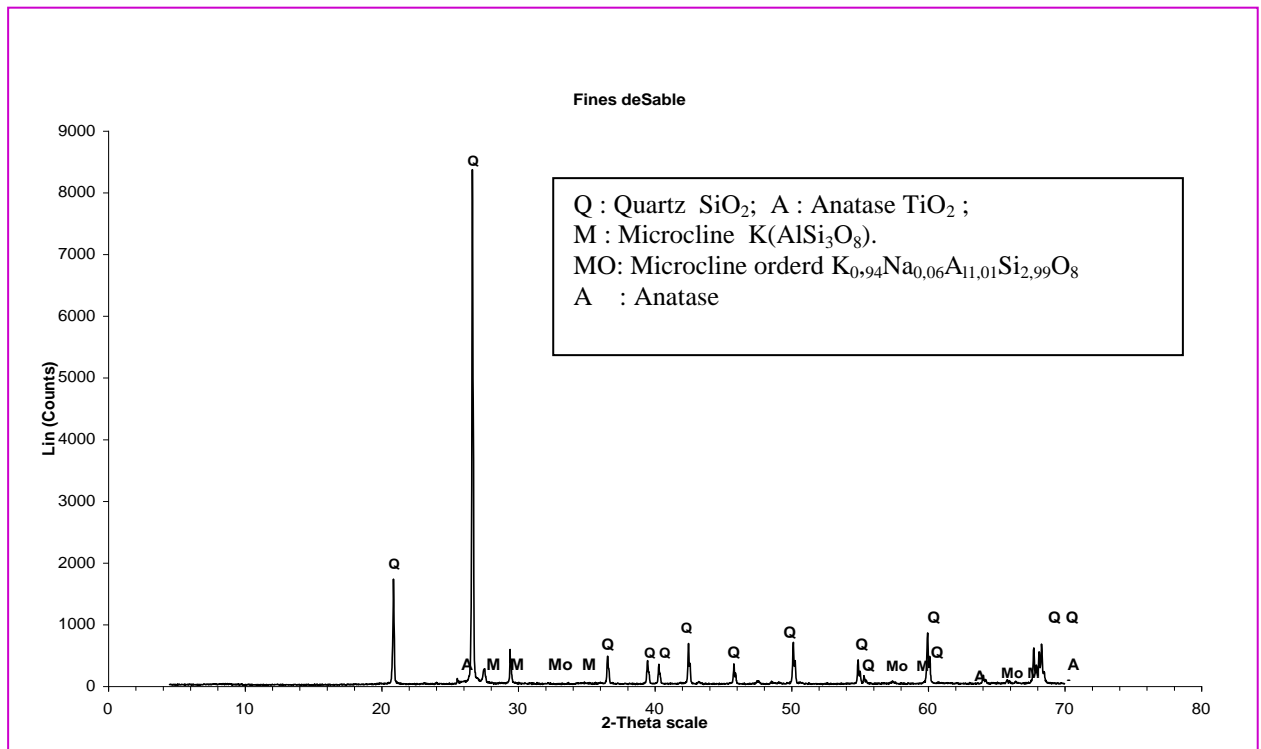


Figure II.5 : Diffractogramme du sable de dune utilisé.

Les résultats obtenus de l'ATD et de la DRX affirment que le sable utilisé est un sable siliceux d'où la vérification de la première condition imposée par les recommandations [1].

II.2.1.5 Equivalent de sable

Cet essai est utilisé d'une manière courante pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable, selon la norme (NF P 18-598).

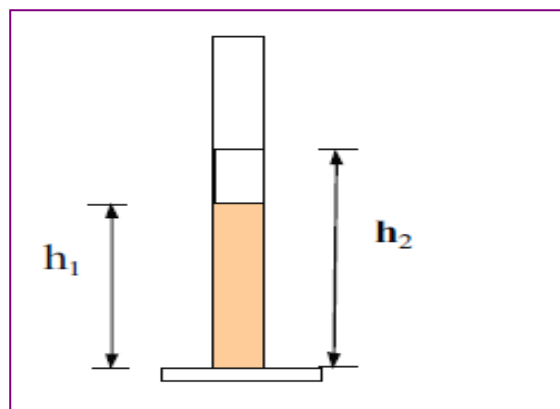


Figure II.6 : Essai d'équivalent de sable.

h1: hauteur des grains solides sableux.

h2: hauteur des grains solides sableux + des impuretés argileuses.

L'équivalent de sable qui est par convention :

$$E_s = (h_1/h_2) \times 100 \% \quad (\text{II-4})$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

EsV: Equivalent de sable visuel;

EsP: Equivalent de sable au piston.

Les résultats des essais d'équivalent de sable utilisé sont :

$$E_{sV} = 78$$

$$E_{sP} = 88$$

D'après les résultats obtenus, on constate que notre sable est propre et pauvre en éléments fins. Donc la deuxième condition imposée par les recommandations de construction en plâtre [1] est satisfaite.

II.2.1.6. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente obtenue du sable est : $\rho_{app} = 1473,00 \pm 0,53 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

II.2.1.7. Masse volumique Absolue

La masse volumique absolue obtenue du sable est : $\rho_{abs} = 2548,00 \pm 0,68 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

II.2.1.8. Capacité d'absorption d'eau

Cet essai est défini par la norme **NF P18-555**, il sert à déterminer la porosité d'un granulat, c'est le rapport entre l'augmentation de la masse après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon. Le coefficient d'absorption d'eau du sable est défini par la formule suivante :

$$C_A = (M_h - M_s / M_s) \times 100 \quad (\text{II-5}).$$

M_h : Masse de l'échantillon après imbibition par l'eau

M_s : Masse sèche de l'échantillon.

La valeur du coefficient d'absorption d'eau obtenu est $C_A = 0,55 \%$. On remarque que le sable utilisé a une capacité d'absorption d'eau faible. $C_A < 2,5 \%$. Ce qui est acceptable d'après [2] et en accord avec les recommandations de la construction en plâtre [1] et qui préconise l'utilisation d'un sable avec moindre capacité d'absorption d'eau.

II.2.1.9. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme NF18-560. Les résultats de cet essai sont illustrés sur la fig.II.7.

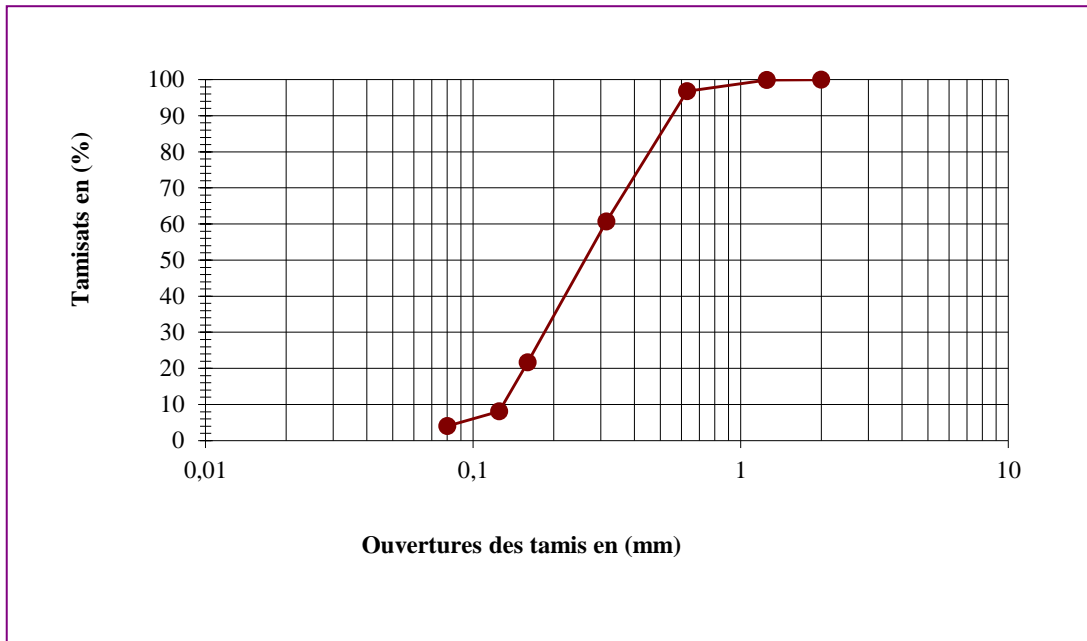


Figure II.7 : Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.

La figure II.7 montre que le sable utilisé est un sable fin à granulométrie serrée.

II.2.1.10. Module de finesse

Il correspond au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante (**0.16-0.315-0.630-1.250-2.500-5.00**).

Ce module est définie par :

$$M_f = \sum R_{cu} / 100 \quad (\text{II-6})$$

Avec : R_{cu} : refus cumulé en % sur les tamis (**0.16 jusqu'a 5.00**)

Dans autre cas : $M_f = 1,2$.

La valeur du module de finesse obtenue, nous affirme que le sable utilisé est fin.

II.3. Gravier

Le gravier concassé utilisé, provenant de la région de Djelfa. Une seule fraction a été retenue pour confectionner notre béton, il s'agit de la fraction 8/15, il est constitué de calcaire compact, dur et de couleur blanche.

II.3.1. Essais effectués sur gravier

II.3.1.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente obtenue du gravier est : $\rho_{app} = 1431,00 \pm 0,35 \text{ Kg / m}^3$.

II.3.1.2. Masse volumique Absolue

La masse volumique absolue obtenue du gravier est ; $\rho_{abs} = 2666,66 \pm 0,24 \text{ Kg / m}^3$.

II.3.1.3. Porosité

La porosité est le rapport du volume de remplissage (V_f) d'un granulat par les vides (V_v), elle est exprimée par la formule :

$$P(\%) = V_v / V_t \quad (\text{II-7})$$

La valeur moyenne trouvée est : $P = 7.12 \%$. Cette valeur montre que notre gravier est dense [3].

II.3.1.4. Degré d'impureté du gravier

Le degré d'impureté du gravier est le taux de la masse de poussière par rapport à la masse totale de gravier avant lavage, cette teneur est calculée par la formule suivante :

$$I(\%) = \frac{M_1' - M_2'}{M_2'} \times 100\% \quad (\text{II-8})$$

Soit : M_1' : Masse de l'échantillon du gravier avant lavage.

M_2' : Masse de l'échantillon du gravier après lavage et séchage.

Le degré d'impureté obtenu est : $I = 0.95\%$.

D'après la valeur obtenue $I = 0.95\%$ qui est inférieur à 1.5% , on constate que notre gravier est propre [3].

II.3.1.5. Coefficient de Los-Angeles (L_A)

La dureté du gravier est déterminée par le coefficient de **Los-Angeles**, et par conséquent s'est la caractérisation de la résistance des granulats au choc selon la norme (**NF P 18-573**), il est calculé par la formule suivante :

$$L_a = \frac{m}{M}100 \quad (II-9)$$

Telle que :

M: Masse du matériau soumis à l'essai;

m: Masse des éléments inférieurs à **1.6 mm** produits au cours de l'essai.

Le coefficient de Los Angeles du notre gravier est : $L_a = 30$. D'après la valeur obtenue du coefficient de Los-Angeles, on constate que la classe du notre gravier est une classe de calcaire dure [4].

II.3.1.6. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique de graviers sont représentés sur la figure ci-dessous.

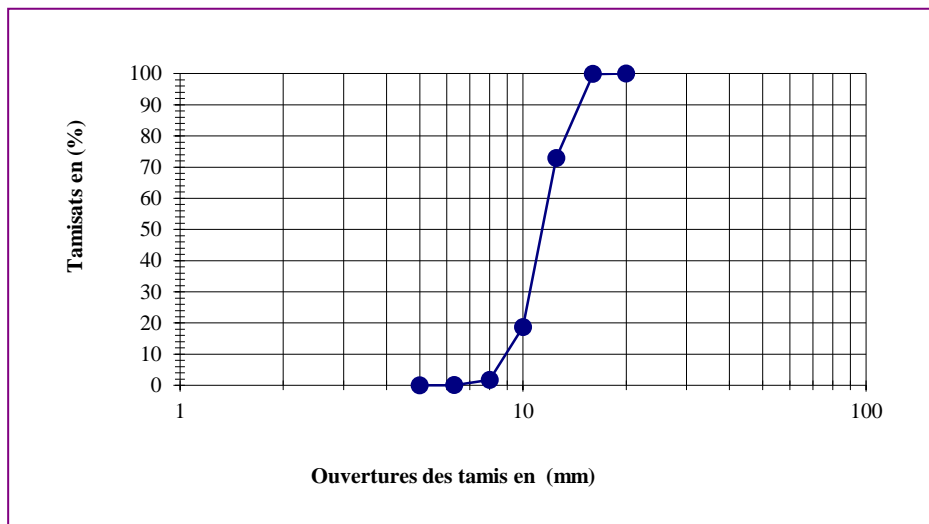


Figure II.8 : Courbe granulométrique du gravier utilisé.

La figure II.8 montre que le gravier utilisé est à granulométrie continue.

II.4. Fibres

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des palmiers dattiers les plus cultivés par l'homme. Il résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord, plus précisément dans les oasis du Sahara. Les Phoenix sont des palmiers dioïques. Il existe des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces derniers donnent une multitude de variétés de dattes. [5,6].

L'Algérie possède plus de 800 variétés de palmiers dattiers dans ses oasis. Parmi les variétés les plus connues, nous mentionnons (en appellation locale), le Dokar (le palmier mâle), la Deglet Nour, Elgers et la Déglabida [7]. Il existe encore d'autres appellations des dattes telles que Tédala et Timjourt.

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant plusieurs types de fibres :

- Fibres de bois par le broyage de son tronc ;
- Fibres de feuille au niveau des pédoncules ;
- Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier ;
- Fibres de surface autour de son tronc.

Dans cette étude, on a utilisé les fibres de surface autour du tronc du palmier dattier de type Dokar des oasis sud de la région de Laghouat.

Les fibres de surface sont naturellement tissées. Elles sont formées par la superposition de plusieurs plaques en treillis. Ces fibres sont extraites du tronc du palmier dattier sous forme d'une plaque en treillis de longueur 300-500 mm et de largeur 200 – 400 mm. La figure II.9 montre une plaque typique de fibres de surface.



Figure II.9 : Plaques en treillis de fibres de surface du palmier dattier.

II.4.1. Mode préparatoire de fibres

Les plaquettes de fibres sont séparées en fibres individuelles dans l'eau, pour faciliter leur défibrage. Les fibres individuelles sont bien lavées avec l'eau pour enlever les impuretés qui entourent la fibre et qui gênent l'adhérence. Ensuite, elles sont coupées aux longueurs voulues.

II.4.2. Propriétés physiques des fibres de surface du palmier dattier utilisées

Le tableau II.2 et la figure II.10 donnent les principales propriétés physiques de fibres utilisées dans cette étude.

La densité absolue de fibres a été mesurée à l'aide d'un porosimètre. La densité apparente a été mesurée selon la norme européenne **NF EN ISO 1973 [8]** à l'aide d'une balance ayant une précision de $\pm 0,1$ %. Soixante fibres de 50 mm de longueur et de différents diamètres sont testées dans les conditions climatiques suivantes : Température $T = 20 \pm 2^\circ \text{C}$ et $\text{HR} = 65 \pm 2\%$.

L'absorption d'eau est mesurée comme le stipule la norme **ASTM C 127/88 [9]**, pour cela soixante échantillons sous forme de treillis (plaquettes 100×100 mm) ont été utilisés.

Tableau II.2 : Propriétés physiques des fibres de surface du palmier dattier utilisées.

Propriétés	Maximum- Minimum
Diamètre (mm)	0,20 - 1mm
Densité Absolue kg / m^3	$1540,00 \pm 0,01$
Densité Apparente kg / m^3	$1088,81 \pm 0,01$
Teneur en eau naturelle	$10 \pm 0,02$

Nous constatons d'après le tableau II.2 que les propriétés physiques moyennes sont très voisines des résultats de la littérature relative aux fibres végétales [10,11]. La variabilité des paramètres géométriques comme la longueur ou le diamètre des fibres végétales s'explique par l'influence d'une multitude de facteurs sur son développement agricole mais aussi sur sa transformation industrielle. De plus, la dimension transversale des fibres varie en fonction de sa localisation dans la tige : près de la racine, celle-ci est plus épaisse que vers la pointe [12]. Cependant, concernant le diamètre, les valeurs déterminées sur les fibres utilisées dans cette étude se trouvent bien dans la fourchette de valeurs issues de la bibliographie.

Concernant la masse volumique réelle des fibres, en revanche, la bibliographie fait état de valeurs relativement proches. Ainsi, la valeur moyenne de la masse volumique obtenue des fibres du palmier étudiées qui est de l'ordre $1,54 \text{ g/cm}^3$ est proche de celles de fibres de lin et les fibres de chanvre comme montre le tableau ci-dessous.

Tableau II.3 : Propriétés physiques de quelques fibres données par la littérature [13].

Fibre	Longueur (mm)	Diamètre (µm)	ρ (g/cm ³)	Réf.	Cité(s) par
LIN	4-77	5-76	1.54	[WAN01]	[BAL04]
				[MUK86]	
				[BAT98]	
	25 - 50	25		[MOU99]	
			1.53	[BAL02]	
			1.5	[GAR98]	
			1.5	[SRI82]	[BLE99]
Fibre	19 (5-39)		[OLESEN]		
Faisceau	40-600				
CHANVRE	5-50	10-30		[MOU99]	
			1.48	[GAR98]	
		23.15 ±17.60	1.5	[LI06]	
	5-55	10-51		[MUK86]	[BAL04]
				[BAT98]	
			1.58	[SED07]	
		10-50		[NAB99]	[DAV07]
	Fibre	25 (10-50)		[OLESEN]	
Faisceau	500-5000				

D'autres parts, la figure II.10 montre que L'absorption des fibres du palmier dattier utilisées augmente dans le temps. La saturation est obtenue dans les premières 2heures, après elle se stabilise dans le temps. La valeur obtenue à 24 heures est de l'ordre de 75%; cette valeur est moyenne par rapport aux absorptions d'eau de quelques fibres végétales et proche de celle de fibres de bagasse selon L'ACI 196 [14], et cela d'après le tableau II.4 donné par la littérature.

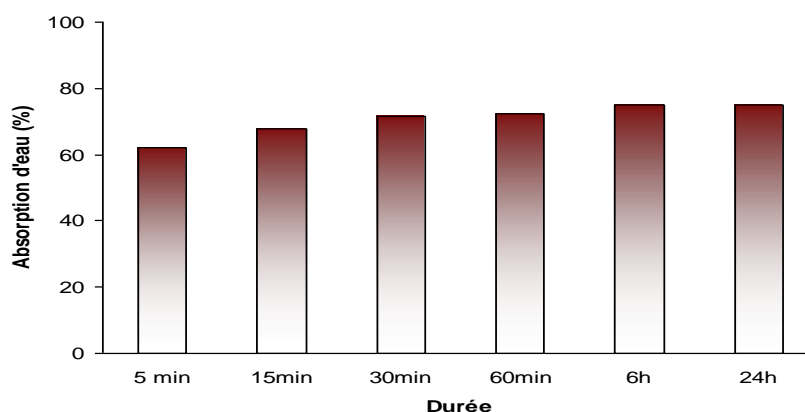


Figure II.10 : Variation de l'absorption moyenne des fibres du palmier utilisées en fonction de la durée d'immersion dans l'eau.

Tableau II .4 : Absorption d'eau de quelques fibres végétales [13].

Fibre	Absorption (%)	Ref.	Valeur moyenne	Ecart type
Bagasse	122.5	[ACI96b]	97.5	35.4
	70-75	[ACI96]		
Coir	58.5	[ACI96b]	119.5	48.5
	130-180	[ACI96]		
	180	[RAM05]		
	93.8	[SAV99]		
	85-135	[TOL05]		
Jute	62	[JUA02]	171.5	154.9
	281	[RAM05]		
Lecheguilla	102	[ACI96b]	100.0	2.8
	98	[JUA02]		
Palmier	129.9	[ACI96b]	139.8	14.0
	96.83-202.64	[KRI05]		
Bambou	51	[ACI96b]	79.5	56.9
	40-45	[ACI96]		
	145	[SAV99]		
Sisal	60-70	[ACI96]	148.8	73.5
	200	[RAM05]		
	190-250	[TOL05]		
	110	[SAV99]		

II.4.3. Propriétés chimiques des fibres du palmier dattier utilisées

La calcination des fibres utilisées réalisée dans un four à 400°C, a montré que ces fibres contiennent 88,7 % de matières organiques et 11,3 % de matières minérales. Dans ce qui suit, nous allons donner la proportion des matières organiques et des matières minérales.

II.4.3.1. Analyse des matières organiques

L'analyse des matières organiques des fibres du palmier utilisées a été réalisée au sein du laboratoire de génie civil, université de Laghouat. Les teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine ont été déterminée par voie chimique, comme décrit dans Juarez [15]. Pour cela, des solutions d'hydroxyde de sodium, d'acide acétique et de l'acide sulfurique ont été utilisées. Trois échantillons par analyse ont été testés. Les résultats ont été exprimés en fonction du rapport entre la masse finale et la masse initiale de chaque échantillon.

Les résultats de cette analyse, sont les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine illustrées sur le tableau II.5. Nous constatons que le pourcentage de l'hémicellulose et de la lignine se rapprochent de celui de fibres de chanvre donnés par la littérature [16], alors que le taux de cellulose se rapproche de celui de fibres de coir [17]. D'après Baley [12], l'espèce et la

variété de la plante ainsi que la qualité du sol de culture peuvent également influencer la composition chimique de la fibre. De plus, différentes méthodes de dosage ont été utilisées.

Tableau II.5 : Les principaux constituants organiques de fibres du palmier utilisées

Matière	Cendres	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Proportions (%)	1,13 ±0,05	50,63±2,66	15,4 ±3	22,80±4,7

II.4.3.2. Analyse des matières minérales

En plus une analyse chimique et une étude de microstructure des fibres utilisées ont été menées par microscope électronique à balayage à l'institut de pin à Bordeaux en France. Les échantillons sont métallisés par une couche d'or de 20 à 30 nm par la technique de l'observation en électrons secondaires.

D'après les résultats obtenus et présentés dans le tableau II.6 et la figure II.11, on remarque la présence d'atomes de carbone et d'oxygène avec un pourcentage atomique important par rapport aux autres éléments et que le carbone est l'élément le plus prépondérant, ce qui affirme la présence des groupes carboxyliques provenant de la cellulose.

Tableau II.6 : Analyse chimique des fibres du palmier utilisées par MEB.

Elément	K – ratio (Calc.)	ZAF	Atome (%)	Elément Wt (poids)	Wt % Err. (1 – Sigma)
C – K	0,4436	1, 805	85,87	80,00	± 0,78
O – K	0,0137	10,966	12,08	15,00	± 0,49
Na – K	0,0016	3,102	0,28	0,51	± 0,05
Mg – K	0,0013	2,113	0,15	0,28	± 0,03
Al – K	0,0019	1,685	0,16	0,33	± 0,03
Si – K	0,0099	1,386	0,63	1,37	± 0,03
Cl – K	0,0071	1,204	0,31	0,86	± 0,07
K – K	0,0047	1,166	0,18	0,55	± 0,06
Ca – K	0,0092	1,143	0,34	1,06	± 0,08
Total			100,00	100,00	

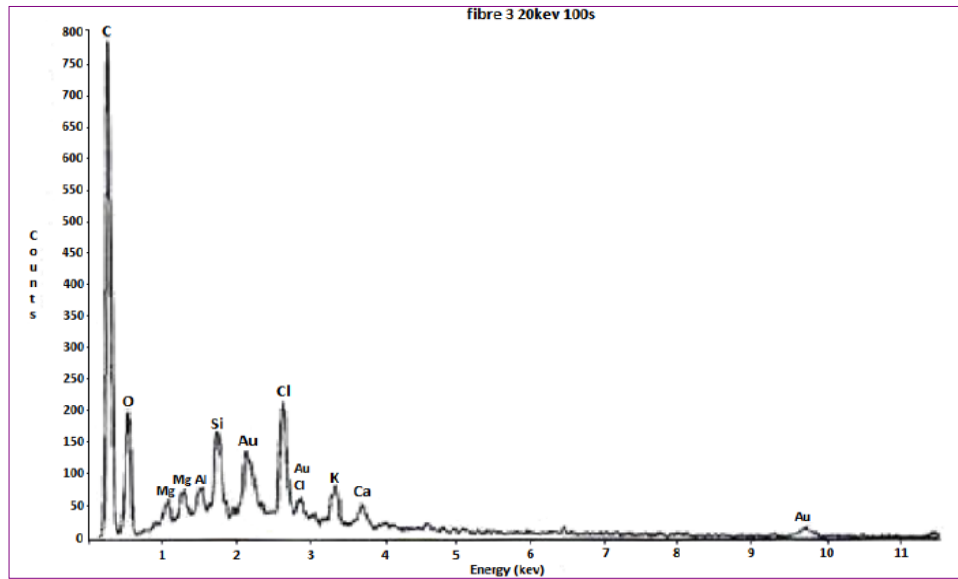


Figure II.11 : Analyse chimique à l'état naturel de la fibre du palmier obtenue par MEB.

La diffraction par les rayons X nous montre d'après le diffractogramme ci-dessous que la poudre de la fibre du palmier utilisée est un composé amorphe, on n'a pas pu distinguer des pics qui définissent l'existence des composés cristallins (figure II.12). Alors que les études [18] montrent qu'après calcination à 400° C, on peut distinguer par exemple pour les fibres de dokar, trois phases tel que le quartz SiO_2 et la calcite CaCO_3 et la halite NaCl , le taux important de SiO_2 est sûrement dû à la pénétration de sable dans la structure et les pores de fibres, à cause des vents de sable dans les régions sahariennes.

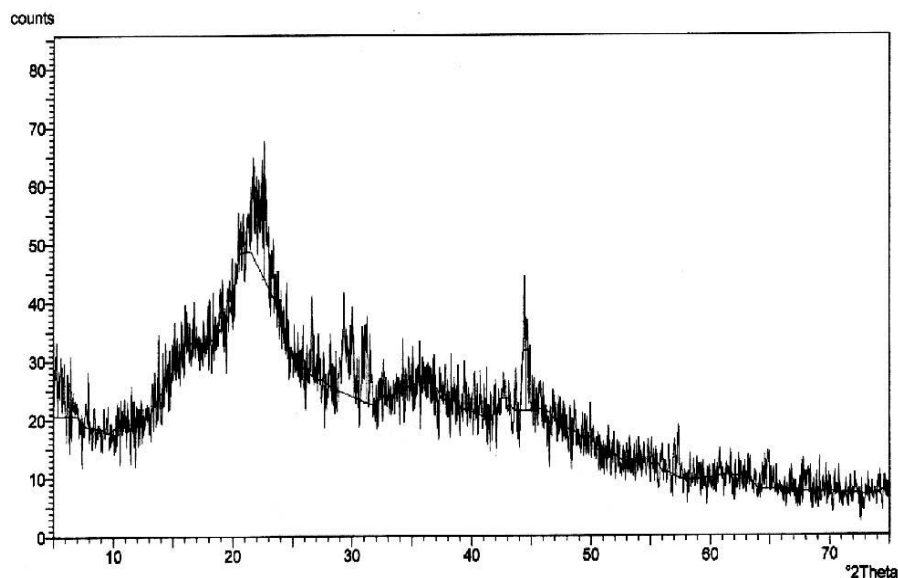


Figure II.12 : Diffractogramme de la poudre à l'état naturel de la fibre utilisée par les rayons X.

II.4.4. Morphologie et structure interne des fibres du palmier utilisées

L'examen de la texture des fibres utilisées par MEB est présenté sur les photos ci-dessous. La figure II.13 présente une coupe transversale de la fibre utilisée et qui montre que la fibre possède une section pleine comme les fibres de coir contrairement aux fibres cellulosiques qui ont une section creuse [11].

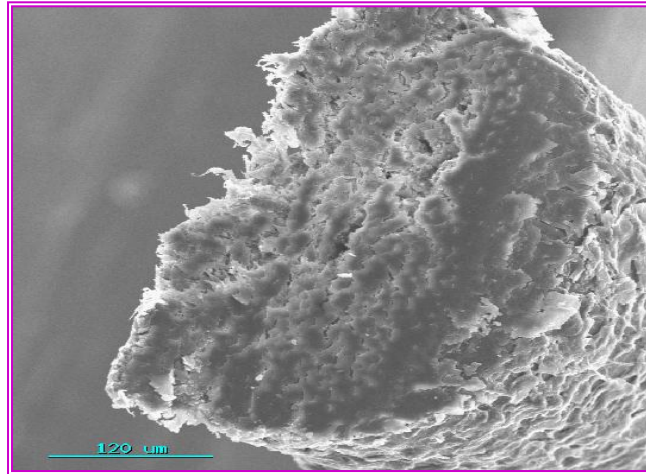


Figure II.13 : Observation d'une coupe transversale de la fibre du palmier par MEB.

La figure II.14 montre que la fibre est constituée de très petits filaments constitués d'un ensemble de feuillets (sous formes de pages de livres) orientés dans le sens de la longueur. Les feuillets désordonnés permettent la flexibilité du filament. En plus, on observe la présence de certains pores dans la fibre ce qui affirme qu'elle est hydrophile (pouvoir d'absorber l'eau) Fig. II.15.

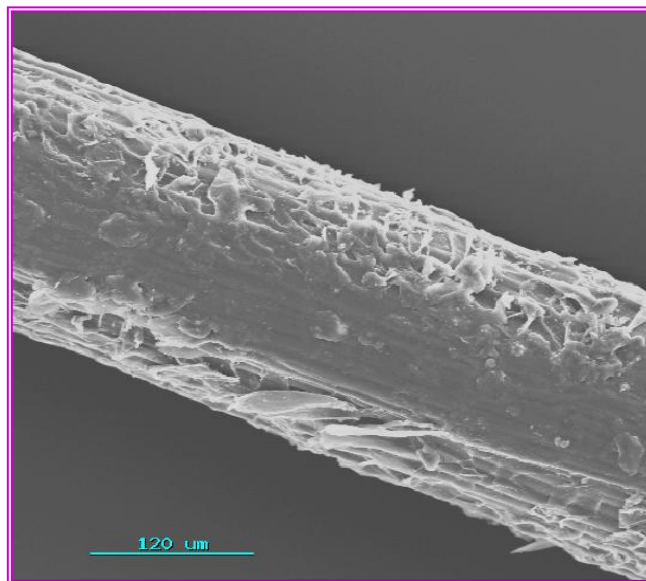


Figure II.14 : Observation longitudinale des faisceaux de la fibre du palmier par MEB.

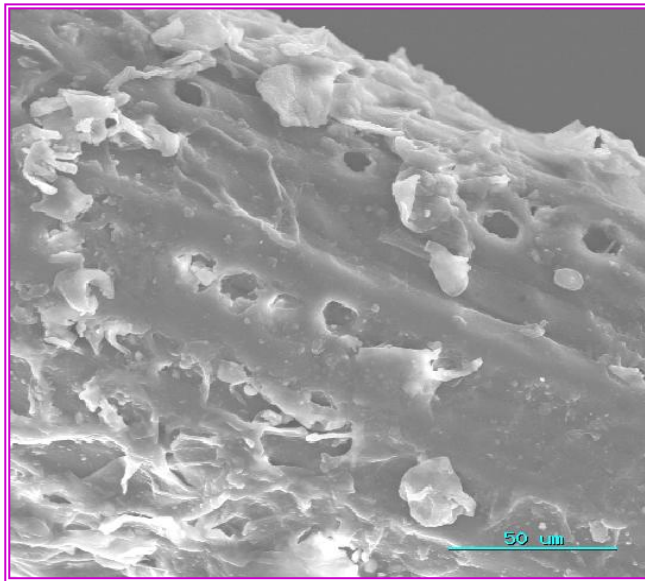


Figure II.15 : Observation des pores dans la fibre du palmier par MEB.

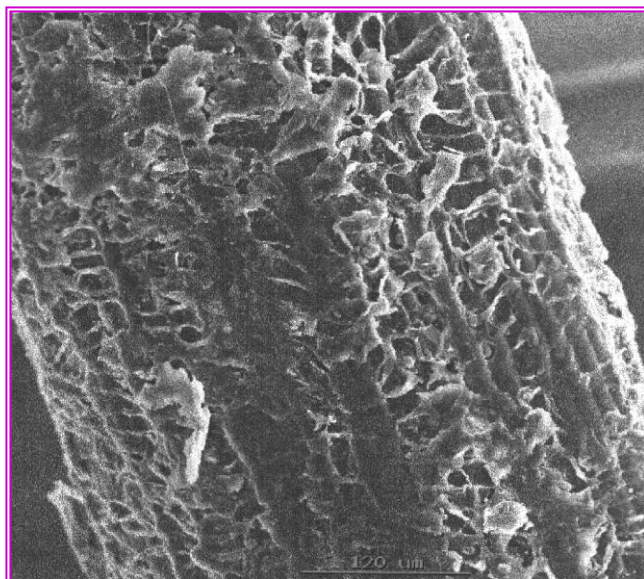


Figure II.16 : Observation d'une vue tangentielle de la fibre du palmier par MEB.

D'après la figure II.16, on remarque que la fibre possède des enchevêtrements sur sa surface, ce qui assure une bonne adhérence fibre – matrice.

II.4.5. Propriétés mécaniques des fibres du palmier dattier utilisées

Les principales propriétés mécaniques des fibres de surface du palmier dattier à savoir la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et le module d'élasticité sont déterminés selon la norme **NF EN ISO 5079 [19]** ; dans les conditions climatiques $20\pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 65\%$.

La machine de traction universelle utilisée est de type INSTRON, fig. II.17. Cette machine est équipée d'un capteur de charge de 250 N et deux capteurs de déplacement, la vitesse de chargement a été de 0,5 mm/min. La machine est aussi équipée d'un système d'acquisition automatique relié à un ordinateur qui permet de tracer la courbe contrainte-déformation.



Figure II. 17: Machine universelle d'essai de traction des fibres de type INSTRON au sein du laboratoire LGCIE à L' INSA de Lyon.

La méthode de préparation des échantillons de fibres à tester, le dispositif de fixation de la fibre à la machine de traction et le déroulement de l'essai de traction de la fibre du palmier sont présentés sur les figures ci-dessous.

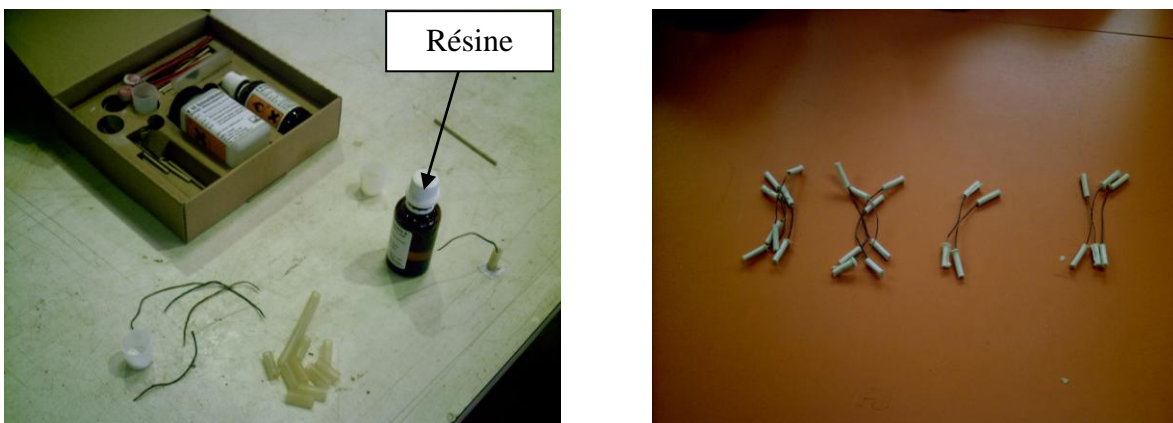


Figure II.18 : Préparation des fibres du palmier dattier pour l'essai de traction.

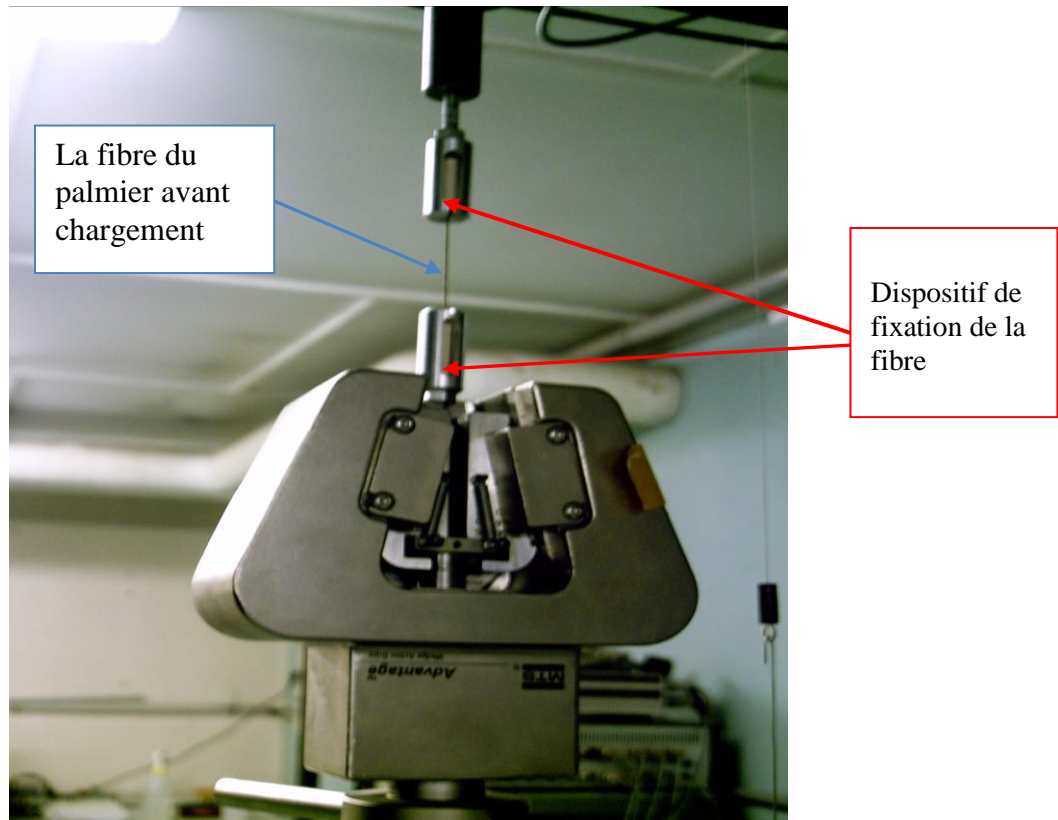
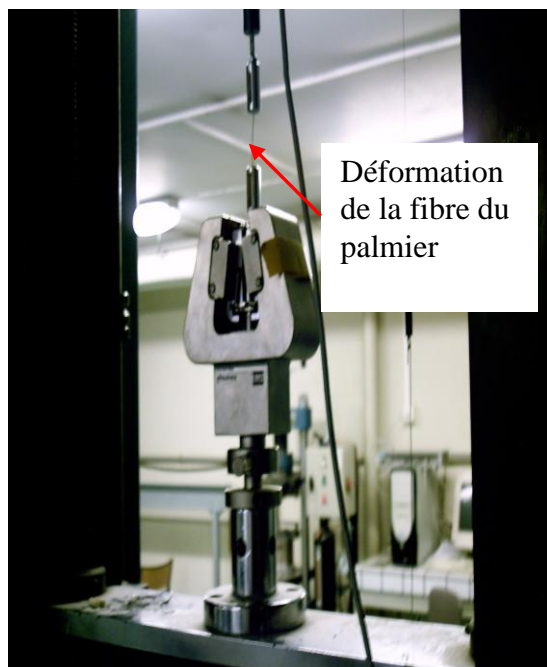
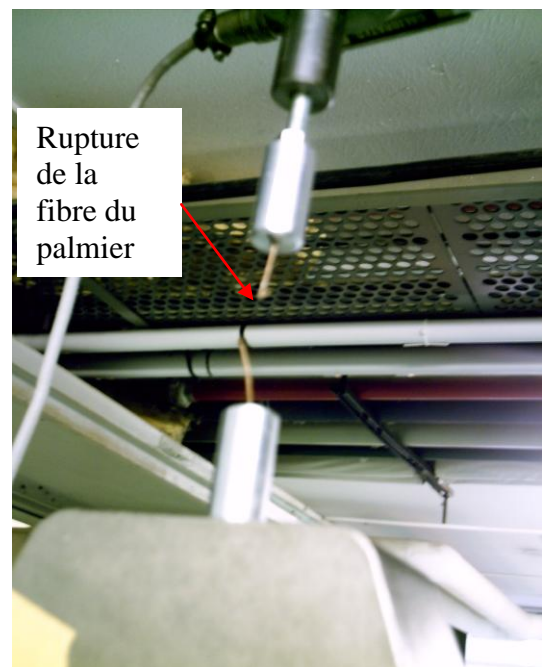


Figure II.19: Dispositif de traction de la fibre.



(a)



(b)

Figure II.20 : Comportement mécanique de la fibre du palmier dattier lors de l'essai de traction. (a) Déformation de la fibre par traction, (b) Rupture de la fibre par traction.

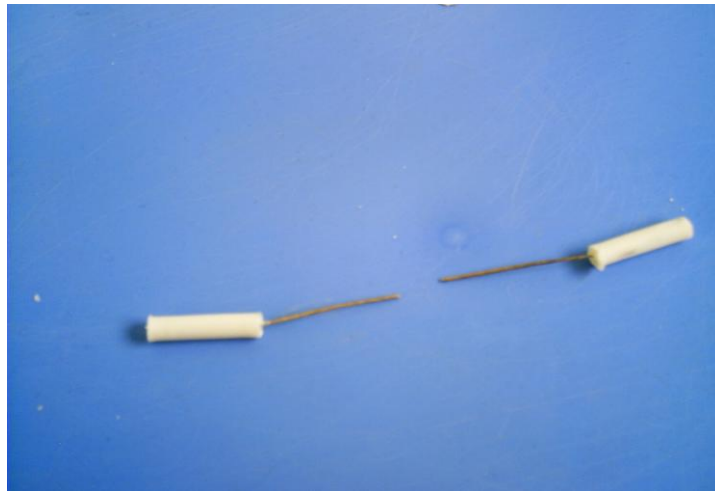


Figure II.21 : La fibre du palmier après l'essai de traction.

Les fibres sont testées à l'état naturel sec et à l'état humide saturé. Pour chaque type d'essai trente échantillons de fibres sont utilisés. Rappelons que la résistance à la traction des fibres est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \quad (II.10)$$

Avec F : Charge maximale enregistrée sur la machine;

S : section moyenne de la fibre.

Comme la fibre n'a pas le même diamètre sur toute sa longueur, le diamètre pris dans le calcul de la section moyenne des fibres est le diamètre moyen de trois mesures au minimum à l'aide d'un pied à coulisse digital.

Le tableau II.7 donne les résultats des propriétés mécaniques de fibre du palmier utilisées. Il est montré que les fibres saturées deviennent plus résistantes et allongeables à la rupture. Par contre à l'état sec, les fibres ont un module de Young légèrement supérieur à celui de l'état humide. Ces résultats mettent en évidence aussi une diminution de la résistance à la traction des fibres végétales lorsque la longueur de la fibre testée augmente.

Cette évolution est confirmée par les travaux de **Kriker et al. [20]** qui ont évalué la résistance en traction de fibres de palmier dattier. **Bledzki [10]** attribue ce phénomène à la présence de défauts. En effet, la rupture intervenant plus aisément au niveau d'un défaut, plus l'échantillon est long, plus le nombre de défauts est grand et plus la probabilité d'occurrence de la rupture est importante. La résistance en traction mesurée est donc d'autant plus faible.

Tableau II.7 : Propriétés mécaniques des fibres à l'état sec et saturé.

Longueur de fibre en (mm)	Naturel sec			Humide saturé		
	σ_t en(MPa)	ϵ en (%)	E_t en(MPa)	σ_t en(MPa)	ϵ en (%)	E_t en(MPa)
60	60,55±3,06	8,43±0,01	2,00±0,01	79,75±0,48	9,24±0,50	1,89±0,56
40	87,22±2,82	5,42±0,30	2,46±0,01	104,84±0,16	5,84±0,10	2,09±0,06
20	107,36±2,35	4,5± 0,81	2,54±0,11	139,00±1,20	5,09±0,22	2,46±0,25

Bos [21] observe le même phénomène lors de ses essais. La Figure II.22 ci-dessous présente les résistances à la traction de fibres techniques et de fibres élémentaires de lin pour différentes longueurs.

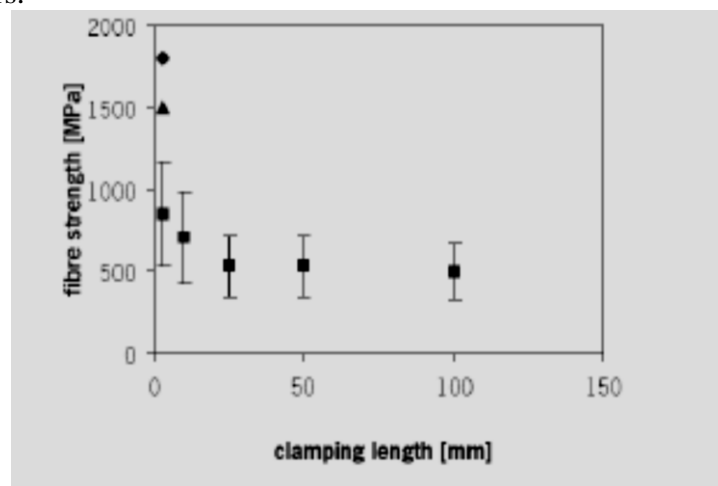


Figure II.22 : Evolution de la résistance à la traction de fibres de lin en fonction de la longueur des échantillons testés (losange : fibres techniques, triangle : fibres élémentaires séparées de manière standard, carré : fibres élémentaires séparées à la main) [21].

On remarque que la résistance à la traction est constante pour les fibres de longueur supérieure à 25 mm environ, elle vaut 500 MPa. En deçà de cette longueur, la résistance en traction augmente lorsque la longueur des fibres diminue. Ces différences proviennent de la structure même des fibres végétales, qui induit un mode de rupture distinct en fonction de la longueur des fibres. Le schéma de la Figure ci-dessous expose cette structure en faisceau.

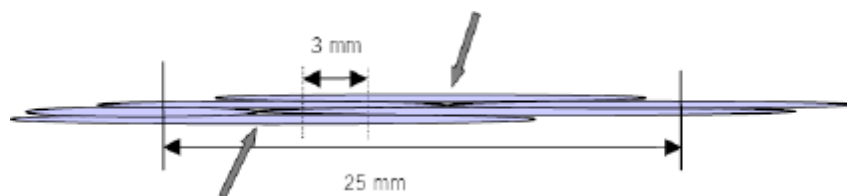


Figure II.23 : Structure en faisceau d'une fibre de lin [21].

Les fibres testées sont composées d'un faisceau de fibres élémentaires plus courtes. Pour des fibres testées de longueur supérieure à 25 mm, la rupture se fait au niveau de l'interface de

pectine qui lie deux fibres élémentaires (zones repérées par des flèches grises sur la Figure II.23. Cette zone constitue une zone faible du point de vue mécanique.

Ce mode de rupture est constaté pour toutes les fibres ayant une longueur supérieure à la longueur critique, ce qui explique le palier à 500 MPa observé par **Bos [21]**. En revanche, pour des fibres de longueur inférieure à la longueur d'une fibre élémentaire, la probabilité de rupture dans l'interface de pectine diminue. La fissure doit se propager à travers la paroi cellulosique plus résistante. L'augmentation de résistance est bien sûr graduelle en raison de la distribution des fibres élémentaires.

D'autres auteurs ont également identifié la section des fibres comme paramètre influençant le comportement en traction des fibres végétales [23].

Par ailleurs une comparaison de nos résultats avec les résultats de la littérature [10,23-25], permet de constater que les fibres du palmier utilisées se rangent parmi les fibres végétales moyennes du point de vue résistance à la traction et allongement à la rupture. Cela est due à la texture de ces fibres, et à leur composition chimique. En effet, les photos au MEB des coupes longitudinales de ces fibres ont montré que leurs filaments sont presque rectilignes et parallèles à la génératrice des fibres ce qui signifie que leurs angle spiral est très petit et par conséquent une diminution dans leur déformabilité. Aussi, nous constatons que ces fibres se rangent parmi les fibres faibles du point de vue module d'élasticité et cela est due à la faible teneur en hémicellulose, constituant responsable de l'élasticité.

Cependant, nous constatons que les propriétés mécaniques de fibres de surface du palmier utilisées, se rapprochent de celles de noix de coco et du palmier dattier présentées dans le tableau I.12 du chapitre précédent.

II.4.6. Etude de la compatibilité chimique des fibres du palmier dattier avec un milieu non alcalin (cas de gypse)

Nous rappelons que plusieurs chercheurs de la littérature ont remarqué que les fibres végétales (sisal, noix de coco) résistent mal aux alcalis. Et que la faible tenue, de ces fibres dans les milieux alcalins, en particulier dans la chaux libérée par les ciments lors de l'hydratation, constitue une contrainte qui limite le champ d'utilisation de ces fibres dans les ciments, Ce phénomène se manifeste au niveau de la fibre, soit par détérioration soit par diminution de la résistance à la traction.

Les études faites par **Kriker et al [26]** montrent que les fibres du palmier dattier comme toutes les autres fibres végétales résistent mal aux milieux alcalins, ce qui oriente les recherches vers l'utilisation de ces fibres dans des milieux non alcalins.

Dans cette étude on a essayé d'immerger les fibres du palmier dans une solution du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ cristallisé et disponible d'une masse molaire $M_m = 172,17 \text{ Kg / mol}$ avec une concentration de 10 % dans l'eau. Le pH de cette solution est de 6.6.

La vérification de la compatibilité chimique des fibres du palmier dans la solution de sulfate de calcium est exprimée par :

- La variation de leurs propriétés mécaniques à savoir la résistance à la traction; module d'élasticité et l'allongement à la rupture en fonction du temps d'immersion.

- Des observations microscopiques au MEB.

Le tableau II.8 présente les résultats de résistances à la traction, les allongements à la rupture et les modules d'élasticité des fibres du palmier utilisées en fonction du temps d'immersion dans la solution de $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$. Ces résultats montrent une amélioration notable de la résistance à la traction. Par contre une légère augmentation de l'allongement à la rupture des fibres et du module de Young a été enregistrée et cela est due à la saturation des fibres par la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$, qui n'a pas dégradé les fibres du palmier. Ce qui va être confirmé par les observations microscopiques.

Tableau II.8 : Variation des propriétés mécaniques des fibres du palmier immergées dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ dans le temps.

Temps d'immersion (mois) Propriétés	σ_t en (MPa)	ε en (%)	E_t en (MPa)
0	60,55±3,06	8,43± 0,01	2,00±0 ,31
6	148,76±0,24	9,73± 0,56	2,87±0,01
9	207,98±4,45	10,55±0,30	2,85±0,39

L'examen de la texture des fibres du palmier après l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ a été réalisé à l'aide d'un microscope électronique à balayage environnementale au centre de microscopie de l'université Claude Bernard, Lyon 1 de marque Hitachi 800 de haute résolution .Fig. II.24.



Figure II.24 : Microscope électronique à balayage Hitachi 800 équipé d'une microanalyse.

Les échantillons après fractionnement, sont collés sur des portoirs à l'aide d'une plaque d'argent conductrice puis métallisés en carbone de 20 à 30 mm en utilisant la technique d'observation en mode d'électrons secondaires. La figure II.25 visualise l'état de surface des fibres avant l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ et met en évidence la structure alvéolaire de la fibre. La figure II.26 présente l'état de surface des fibres après l'immersion dans la solution de $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ pendant 9 mois. Il est montré qu'il n'y a pas d'attaque du gypse et on observe des zones saines contrairement au comportement des fibres du palmier dans le milieu alcalin [26]. D'après la figure II.27, on observe le dépôt des cristaux sous formes tabulaires et

prismatiques sur la fibre. La figure II.28 montre la pénétration du gypse dans les alvéoles de la fibre, ce qui améliore l'adhérence fibre- matrice et évite le glissement de fibres.

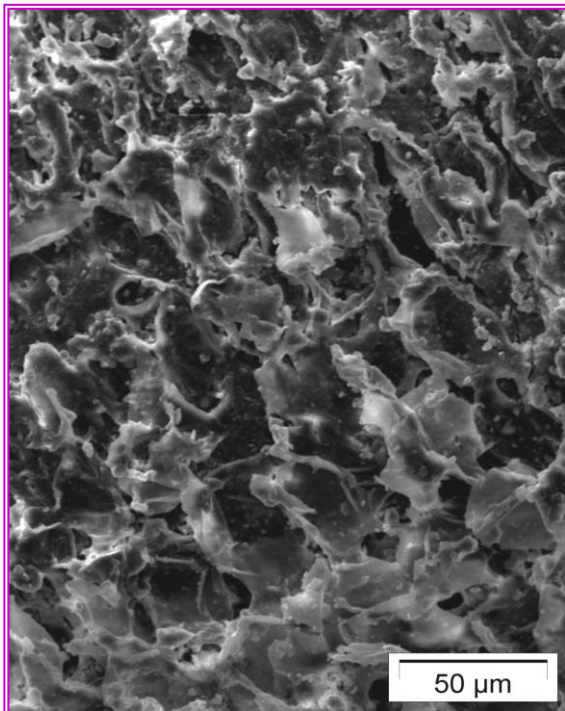


Figure II.25 : Etat de surface de la fibre du palmier Avant l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

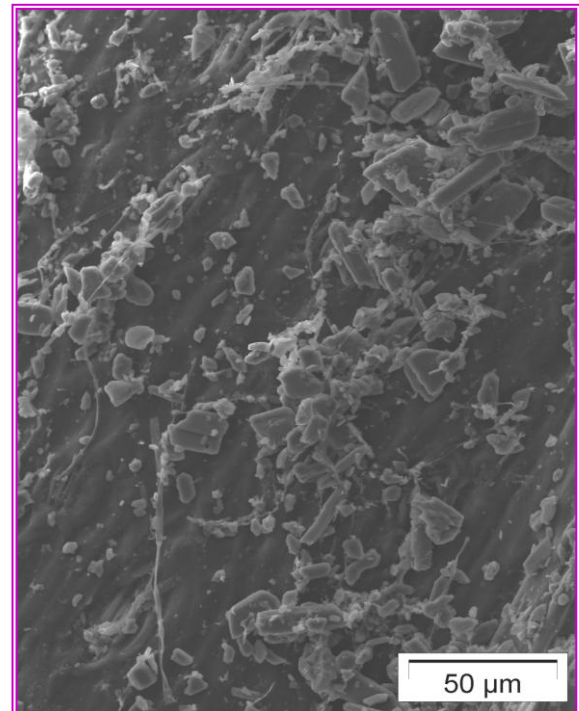


Figure II.26: Etat de surface de la fibre du palmier Après l'immersion dans la solution $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

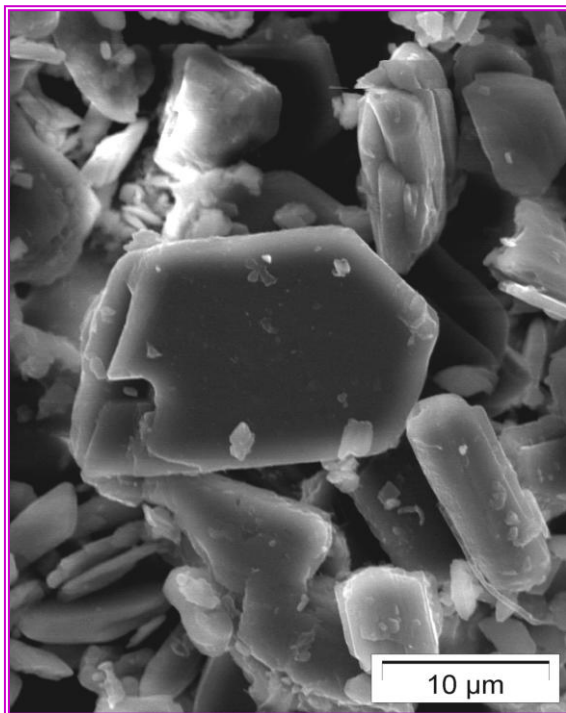


Figure II.27 : Dépôt des cristaux de gypse sur la fibre du palmier.

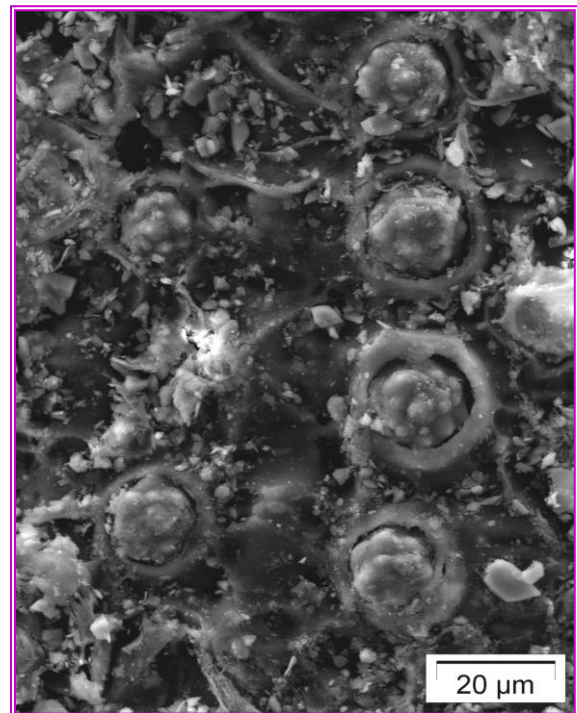


Figure II.28: Pénétration du gypse dans les alvéoles de la fibre.

II.5. Chaux

On a utilisé la chaux aérienne comme retardateur de prise du plâtre, car elle diminue la solubilité de ce dernier et permet d’augmenter son temps d’emploi. En plus elle, n’affecte pas ces propriétés mécaniques.

La chaux utilisée dans cette étude est un produit de l’usine de fabrication de chaux de la région de Saïda, L’analyse chimique réalisée au laboratoire de l’unité de fabrication de la chaux de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.9.

Tableau II.9 : Analyse minéralogique et chimique de la chaux utilisée [27].

<i>Composition chimique</i>	<i>Pourcentage</i>
Humidité	/
CaO	67.4%-73.25%
MgO	<0.4%
Fe ₂ O ₃	<2%
AL ₂ O ₃	<1%
SiO ₂	<2.2%
SO ₃	<1%
K ₂ O+NaO	<0.4%
CO ₂	<5%
CaCO ₃	<10%
Ca(OH) ₂	<80%
Constance volumique	bonne
Insoluble	<0.35%

D’après le tableau II.9, on constate que la chaux éteinte utilisée possède une faible concentration en éléments oxydes, comme les silicates SiO₂, et aluminates A12O₃ et une forte concentration en chaux libre CaO. Le Tableau II.10 résume quelques propriétés physiques de la chaux utilisée.

Tableau II.10: Propriétés de la chaux utilisée.

Masse volumique absolue (g / cm ³)	Masse volumique apparente (g / cm ³)	Surface spécifique (cm ² / g)	Temps début de prise (jour)	Temps fin de la prise (jour)
2.559	0.521	11053	1j	3j

Nos études précédentes [28] montrent que le temps de prise du plâtre utilisé évolue avec le pourcentage de la chaux ajoutée jusqu'à la valeur de 6 %, au delà de cette dernière, le temps de prise décroît. Fig. II.29.

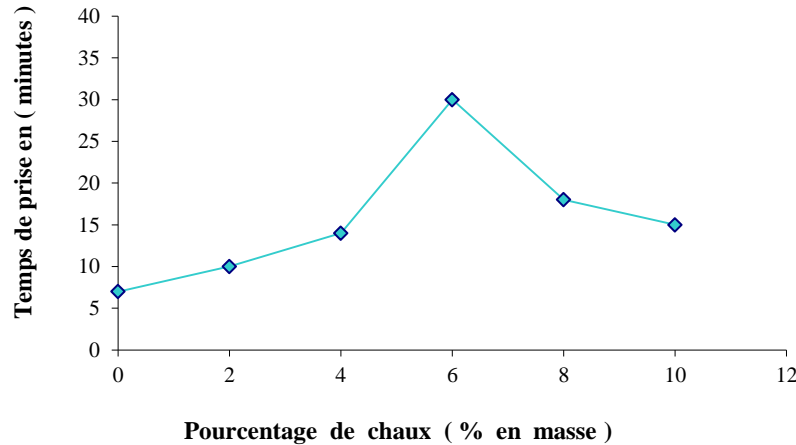


Figure II.29 : Influence du pourcentage de la chaux sur le temps de prise du plâtre utilisé [28].

II.6. Eau de gâchage

La qualité de l'eau joue un rôle primordial sur la qualité finale : les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du plâtre ou la résistance du béton. Pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage doit être contrôlée. La seule spécification, quant à la qualité de l'eau est qu'elle doit être potable. Généralement, la qualité de l'eau potable est convenable pour la fabrication du béton, de plus elle ne nécessite aucun essai (NF EN 1008-2003).

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable, provenant du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire. Une analyse physico-chimique a été faite au laboratoire de l'EPDEMI A pour la confirmation de la qualité de cette eau et les résultats de cette analyse sont présentés dans l'annexe I.

La norme Algérienne, qui est montré sur la figure 1 de l'annexe I, confirme la potabilité de l'eau. Ajouté à cela, l'eau est dépourvue des excès de sels, sulfures et des acides. Donc l'eau utilisée n'a aucun effet négatif sur le béton.

III. Formulation des bétons de plâtre renforcés avec des fibres du palmier

L'addition des fibres dans un béton change complètement le comportement rhéologique du mélange frais. Compte tenu de l'effet des paramètres liés aux fibres tels que, leurs dosages et leurs géométries sur l'efficacité mécanique après durcissement, on a essayé d'étudier dans nos études précédentes[28], l'influence du pourcentage en poids et de la longueur de fibres du palmier dattier sur la maniabilité des bétons de plâtre.

En utilisant la composition du béton de plâtre présentée dans le chapitre précédent, et en s'appuyant sur la méthode de **Baron-Lesage** adaptée par **P.Rossi [29]**.pour la formulation des bétons de fibres métalliques, on a essayé de déterminer la maniabilité de nos bétons, en utilisant le cône d'Abrams.

D'après **Gorisse [3]**, on a fixé une maniabilité correspondante à un affaissement variant entre 6 et 9 cm, maniabilité souhaitée sur chantier pour la mise en place du béton de structure.

Dans le but de déterminer la composition granulair optimale des bétons de plâtre sans fibres, on a procédé par les étapes suivantes :

- On fixe le rapport E/P égal aux taux de gâchage à saturation du plâtre ;
- On fait varier le rapport S/G, en tenant compte du rapport S/P fixé et qui est égal à 0,50 en poids.

A partir de la composition de base du béton de plâtre déjà utilisée, on doit garder toutes les proportions de (plâtre, eau, sable) et on fait varier le dosage de gravier de 60 à 80 Kg avec un pas de 5 Kg, on obtient respectivement les rapports S/G suivants : 0,33, 0,31, 0,29, 0,27, 0,25.

Les résultats de la maniabilité obtenus pour les bétons de plâtre avec différentes compositions granulaires sont illustrés dans la figure II.30 par la courbe de variation de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction du rapport S/G.

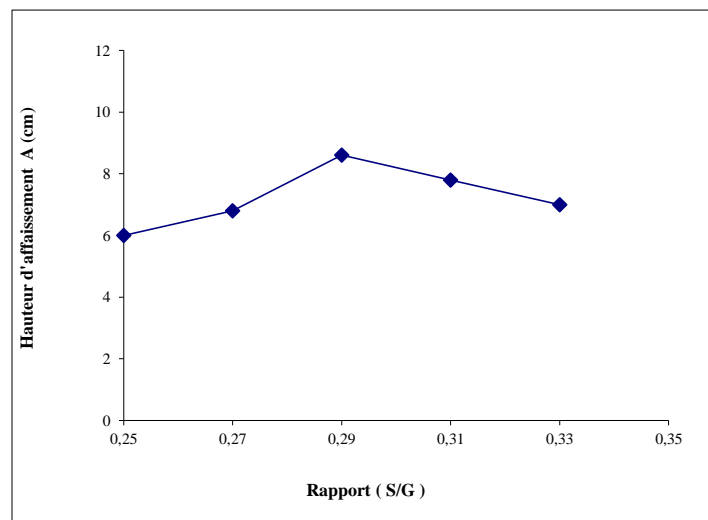


Figure II.30 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton de plâtre témoin sans fibres [28].

D'après la courbe ci-dessus, on remarque que la maniabilité croît avec l'augmentation du rapport S/G et que la composition granulair optimale pour le béton de plâtre témoin (qui donne une maniabilité maximale) correspond à un rapport S/G = 0,29.

La détermination de la composition granulair optimale des bétons de plâtre renforcés avec les dosages en poids de fibres, 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 % pour chaque longueur, 10 mm, 20 mm, 30 mm et 40 mm, est faite en utilisant la méthode de **Baron-Lesage** adaptée par **P.Rossi [29]**.

Pour chaque pourcentage et pour chaque longueur de fibres incorporées, on a mesuré la maniabilité par l'affaissement au cône d'abrams pour différents rapports S/G.

Pour le malaxage du béton de fibres, on a suivi une méthode recommandée par le **Committee 544 A.C.I [30]** et qui consiste à mélanger tout d’abord le gravier, le sable, les fibres puis ajouter le plâtre et l’eau.

Comme retardateur de prise, on a utilisé 6 % de la chaux éteinte dans l’eau de gâchage qui donne un temps suffisant pour la mise en œuvre des bétons de plâtre avec fibres.

Le tableau II.11 résume les résultats de l’étude de variation de la maniabilité en fonction de la composition granulaire optimale (S/G)_{opt} pour différents pourcentages avec différentes longueurs de fibres du palmier dattier.

Tableau II.11 : Résultats de Variation de la maniabilité en fonction de la composition granulaire optimale (S/G)_{opt} pour différents pourcentages et longueurs de fibres du palmier dattier [28].

Longueurs des fibres L en (mm).	Pourcentage de fibres (% en masse)	Composition granulaire optimale (S/G) _{opt}	Maniabilité Affaissement A (cm).
Béton témoin	0,0 %	0,29	8,6
10	0,5 %	0,29	7,60
	1 %	0,29	7,00
	1,5 %	0,31	6,80
	2 %	0,31	6,60
	0,5 %	0,29	7,00
20	1 %	0,29	6,80
	1,5 %	0,31	6,60
	2 %	0,31	6,40
	0,5 %	0,31	7,00
30	1 %	0,31	6,60
	1,5 %	0,31	6,40
	2 %	0,33	6,00
	0,5 %	0,31	6,80
40	1 %	0,31	6,60
	1,5 %	0,31	6,20
	2 %	0,33	6,00
	0,5 %	0,31	6,80

On remarque d’après le tableau II.11, que les maniabilités obtenues sont acceptables pour toutes les longueurs par rapport à celles fixées au départ, c’est à dire dans l’intervalle 6 – 9 cm.

En plus, on a complété l’essai de cône d’abrams par l’essai-Vebe, qui donne des résultats plus réalistes par son aspect dynamique. On a obtenu, avec une légère vibration inférieure à 3 secondes, un béton de plâtre plastique pour toutes les longueurs de fibres.

Comme la vibration peut être un avantage pour l’orientation préférentielle des fibres dans le béton selon [30], on a supprimé pour notre cas la troisième hypothèse de la méthode de **Baron-Lesage** adaptée par **P.Rossi [29]**, et qui consiste à faire un réajustement de la composition du béton de fibres pour atteindre une maniabilité dans l’intervalle fixé au départ. On préfère

l'épaississement de la pâte du liant par une légère vibration (chose déjà mentionné dans la littérature) et non pas par l'ajout du liant et de l'eau, comme dans le cas des bétons de fibres métalliques, car notre but pour les bétons de plâtre c'est d'avoir un rapport E/P réduit et S/P fixé au départ.

IV. Conclusions

En exploitant les résultats obtenus lors de la caractérisation des matériaux utilisés, on peut conclure que :

- Le plâtre utilisé est un plâtre de qualité et cela d'après sa teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ élevée.
- le sable est propre, très riche en quartz, ce qui est recommandé par la littérature et il est à granulométrie serrée avec une faible capacité d'absorption d'eau.
- Le gravier est constitué d'un calcaire compact, dur et il est à granulométrie continue.
- La chaux aérienne utilisée possède une prise lente et permet d'augmenter le temps d'emploi du plâtre.
- les fibres du palmier ont une section pleine et possèdent des alvéoles sur leur surface, ce qui améliore l'adhérence fibre- matrice, une capacité d'absorption d'eau, des propriétés mécaniques moyennes et un allongement à la rupture suffisant.
- Une bonne compatibilité chimique entre le gypse et les fibres du palmier.
- L'eau de gâchage a une potabilité moyenne, et n'a aucun effet négatif sur le béton.
- La méthode de formulation des bétons de plâtre, renforcés avec des fibres végétales du palmier dattier, ne nous a pas conduit de faire l'optimisation des mélanges comme c'était le cas des bétons de ciment de fibres métalliques, une légère vibration semble suffisante pour avoir des bétons de fibres maniables et compacts avec une bonne orientation des fibres dans la matrice.
- Les fibres végétales utilisées jouent un rôle similaire aux gros granulats dans le comportement rhéologique des bétons de fibres à l'état frais.
- D'après les résultats expérimentaux obtenus et la mise en oeuvre des bétons de fibres au laboratoire, il faut signaler qu'il est impossible d'introduire plus de 2 % de fibres (en poids) et pas plus de 40 mm de longueur de fibres, et cela est due à leurs faibles maniabilités enregistrées.

V. Bibliographies

- [1] **C.N.E.R.I.B.**, Recommandations pour la construction en plâtre. Ministère de l'habitat. Centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment, 1993, Algérie.
- [2] **Dreux.G., Festa.J.**, Nouveau guide du béton. Editions Eyrolles, Mai 1998.
- [3] **Gorisse. F.**, Essais et contrôle des bétons. Edition Eyrolles, Paris, 1978.
- [4] **Dupain.R, Lanchan.R. , Saint- Arroman.J-C.**, Granulats, sols, ciments et bétons ,caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoires. Editions Casteilla, Paris, 2000.
- [5] **Jones.D.L.**, Palms throughout the world. Editor Reed book. 1995.
- [6] **Delenze. J.**, Palmier pour le climat méditerranéen. Edition champflour, 1995.
- [7] **Dari.K.**, Analyse des systèmes Agronomiques dans les oasis algériennes, Etude technico-économique. Département d'agronomie, Université d'Ouargla.
- [8] **Norme européenne NF EN ISO1973.**, Fibres textiles. Détermination de la masse linéique. Méthode gravimétrique et méthode de vibroscope. L'association française de normalisation (AFNOR), France, 1996, p.16.
- [9] **ASTM C127/88.**, Standards test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, 2001, p.6.
- [10] **Bledzki, A.K., Gassan, J.**, Composite reinforced with cellulose based fibres. Progress in polymer science, 24, 1999, pp. 221-274.
- [11] **Khenfer, M.M.**, Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et plâtres renforcés de fibres cellulosiques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France, 1990, p.151.
- [12] **Baley, C.**, Analysis of the flax fibres textiles behavior and the Analysis of the tensile stiffness increase. Composites: part A, vol. 33, 2002, pp. 939-948.
- [13] **Magniont, C.**, Contrubition à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agro ressources. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III- Paul Sabatier, France, 2010, P.343.
- [14] **ACI 96.**, State-of-the-art report on fibre reinforced concrete Reported by ACI Committee 544, 1996.
- [15] **Juarez C.A.**, Concretos base cemento Portland reforzados confibras naturales(Agava lechiguilla) como materials para construccion en Mexico. PhD Thesis, Univesita Autonoma de Nuevo –Leon, 2002. P.148.
- [16] **Garcia Jaldon C., Duperyre D., Vignon M.R.**, Fibres from semi-retted bundles by stream explosion treatment. Biomass & Bioenergy, vol. 14, 1998, 251-260.

- [17] **Savastano H., Agopyan V., Nolasco A. M., Pimentel L.**, Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction and Building Materials*, vol. 13, 1999, pp. 433-438.
- [18] **Kriker A.** Caractérisation de fibres du palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec. Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2004, p.165.
- [19] **Norme européenne NF EN ISO5079.** Fibres textiles- Détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture des fibres individuelles. AFNOR, France,1996, p.220.
- [20] **Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M. M., Chabannet M.**, Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, 2005, pp. 554-564.
- [21] **Bos. H.**, The potential of flax as reinforcement for composite materials. Technische Universitat Eindhoven, 2004, Proefschrift, ISBN 90-386-3005-0, P. 192
- [22] **Lamy B., V. Baley.**, Stiffness prediction of flax fibers-epoxy composite materials. *Journal of Materials Science Letters*, vol. 19, 2000, pp. 979-980.
- [23] **Toledo Filho R. D., K. Scrivener, England G. L., Ghavami K.**, Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 2, 2000, pp. 127-143.
- [24] **Toledo Filho R. D., Ghavami K., England G. L., Scrivener K.**, Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, 2003, pp.185-196.
- [25] **Savastano Jr H., Agopyan V.**, Transition zone studies of vegetable cement paste composites. *Cement and Concrete Composites*, 21, 1999, pp.49-57.
- [26] **Kriker A., Bali A., Debicki G., Bouziane M., Chabannet M.**, Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climate. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, 2008, pp. 639-648.
- [27] **Bachar M.** Optimisation de la composition d'un mortier de chaux en vue de l'élaboration d'un béton de chaux léger à base de copeaux de bois. Mémoire de MagistEr, Université de Laghouat, 2006, P.98.
- [28] **Djoudi A.** Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2002, P.117.
- [29] **Rossi P., Harrouche N., Albert B.**, Méthode de composition des bétons de fibres métalliques. *Annales de L' I.T.B.T.P*, N ° 475, Juin 1989.
- [30] **A. C. I. Committee 544.**, State of the art report on fiber reinforced concrete. A.C.I, U.S.A, 1982.

CHAPITRE III

Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Chapitre III : Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

I. Introduction

La durabilité est définie comme la capacité du béton à conserver les performances structurelles à long terme. La durabilité du béton est une propriété relative puisqu'elle dépend, simultanément, des caractéristiques chimiques et physiques du béton et des conditions environnementales. L'atmosphère, les eaux et le sol sont les environnements aux quels le béton est exposé. Dans ces environnements, le béton est soumis aux attaques des acides, la carbonatation, les réactions alkali- granulats, gel- dégel, l'abrasion, etc.... [1].

Parmi les nombreux paramètres susceptibles d'intervenir sur la durabilité des bétons de fibres, on peut retenir :

- La nature des fibres;
- La nature du liant;
- Les conditions de conservation (température, hygrométrie);
- La nature du milieu ambiant (composition chimique).

En tenant compte des paramètres liés aux fibres végétales du palmier dattier sur le comportement mécanique des bétons de plâtre étudiés [2, 3], on a essayé dans cette étude d'examiner le comportement dans le temps, des bétons de plâtre et ceux renforcés de fibres de palmier dattier avec la longueur et le pourcentage optimaux, qui donnent les meilleures propriétés mécaniques du point de vue résistance à la flexion, tel que $L = 30$ mm avec une fraction massique de fibres de 1,5 %. Cette partie est également consacrée à une étude de durabilité vis-à-vis les cycles de gel et dégel, attaque du composite par des acides, des sulfates et les chlorures ainsi que la résistance à l'érosion et l'abrasion.

II. Détails expérimentaux

II.1. Mode opératoire

- Les fibres du palmier utilisées dans cette étude ont une longueur de 30 mm, elles sont bien lavées puis séchées à l'air ambiant du laboratoire avant leur utilisation.
- La matrice est un béton de plâtre préparé selon la composition sélectionnée dans les études précédentes [2] et qui correspond à une composition granulaire $S/G = 0.31$ avec un rapport $E/P = 0.60$, on a obtenu la composition suivante :
 - ✓ Plâtre : 40 Kg;

- ✓ Sable : 20 Kg ;
 - ✓ Gravier : 65 Kg ;
 - ✓ Eau : 24 l.
- On ajoute 6% de la chaux aérienne comme retardateur de prise et qui offre un temps suffisant sans perte de maniabilité, en plus elle n'affecte pas les propriétés mécaniques du matériau [2].

Selon la méthode recommandée par le **Comité 544 de L'A.C.I** [4], on a procédé aux étapes suivantes :

- On mélange tout d'abord le sable, les graviers et les fibres à sec;
- On ajoute le plâtre, tout en mélangeant avec les granulats et les fibres;
- On ajoute l'eau de gâchage et la chaux en malaxant le mélange;
- On verse rapidement le produit final dans des moules prismatiques en métal de dimensions $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ pour l'essai de flexion quatre points et des cubes de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour l'essai de compression à savoir six éprouvettes pour chaque essai;
- Les moules sont placés sur une table vibrante pour quelques secondes afin d'assurer une bonne distribution et une orientation correcte des fibres dans la matrice et une bonne compacité du composite.

Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après, elles 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 trois milieux hygroscopiques :

- Dans les conditions du laboratoire ($T=20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 65\pm 5\%$), durant 360 jours.
- Dans une enceinte sous les conditions climatiques ($T=20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 95\%$), durant 360 jours.
- Soumises à des cycles de séchage-humidification, conservation pendant 24 heures dans une enceinte ($T=20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 95\%$) et 24 heures dans une étuve à une température de 70°C , durant 180 jours (90 cycles).

II.2. Méthode d'essai

L'essai de compression est effectué conformément à la norme NF EN12390-4 [5], sur une presse universelle de type CONTROLS à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000 kN avec une vitesse de chargement de $3,0 \pm 0,5 \text{ kN/s}$. Cette presse fonctionne avec un système de pression hydraulique. L'unité de mise en charge est composée d'un bâti rigide avec deux plateaux. La mise en charge est réalisée par pression hydraulique qui fait déplacer la partie inférieure vers le haut jusqu'à la rupture. Fig. III.1.



Figure III.1 : Presse de l'essai de compression.

L'essai de flexion 4 points a été réalisé sur une presse de type CONTROLS de quatre échelles de capacité, 10, 20,50 et 60 kN. Fig.III.2. La résistance à la flexion 4 points est mesurée selon le dispositif montré sur la figure III.3, et conformément à la norme NF EN 18-409 [6]. La vitesse de chargement est de 1.27 mm/min.



Figure III. 2 : Presse de l'essai de flexion.

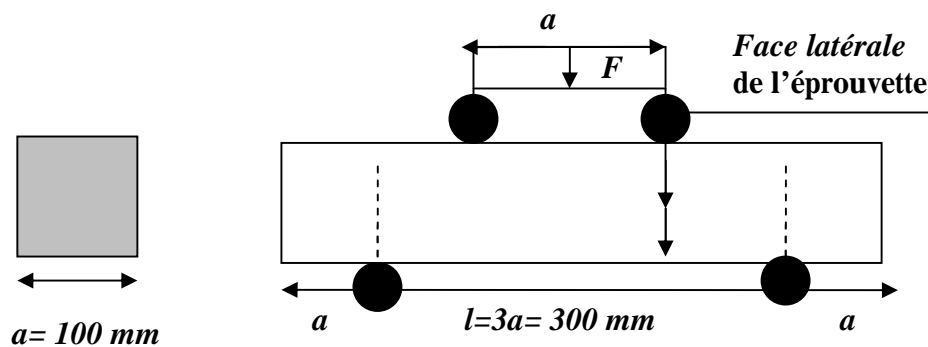


Figure III.3 : Dispositif de la flexion 4 points.

La résistance à la flexion est donnée par la formule suivante :

$$\tau_f = 3F/a^2 \quad \text{(III-1)}$$

τ_f : Résistance à la flexion;

F : La charge de rupture en flexion 04 points ;

a: Coté de l'éprouvette (cm).

III. Présentation et discussion des résultats

III .1. Influence des différents milieux hygrométriques sur les propriétés mécaniques des bétons de fibres en fonction du temps

III .1 .1. Résistance à la compression

D'après la figure III.4, on remarque que la résistance à la compression du béton de plâtre sans fibres croît dans le temps pour les éprouvettes conservées à l'air ambiant du labo et tend à se stabiliser à l'âge de 388 jours. Cela est due à la carbonatation lente du béton et l'effet d'ajout de la chaux comme retardateur de prise. Une augmentation a été enregistrée entre 28 et 58 jours (après 15 cycles de séchage - humidification), ensuite la résistance décroît. On peut attribuer cette diminution de la résistance de manière concomitante au plâtre qui a subi des variations dimensionnelles lors du processus de séchage- humidification et que le retrait se produit lorsqu'on élimine le dernier pourcentage d'humidité résiduelle. De plus l'amplitude du retrait ne dépendrait pas du mode de séchage, lent ou rapide à séchage équivalent [7]. Cette dernière référence insiste aussi sur le caractère réversible du processus humidification- séchage, et que jusqu'à 10 cycles successifs, il n'est pas noté des variations au niveau des caractéristiques mécaniques, précisons que, à court temps d'exposition à l'eau, il y'a aucun risque de pourrissement du plâtre. Concernant la résistance des éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité, elle varie sensiblement dans le temps, cette variation peut être due au fait que la tenue du plâtre à l'état saturée serait assurée par les liaisons de type Tenon- mortaise et que ces dernières ne sont pas affectées à court terme et peuvent cependant modifier à long terme la

morphologie des contacts et donc la composante mécanique de la cohésion du plâtre. D'autres études ont montré que 5 % d'eau adsorbée (% en masse rapportée à la masse du plâtre sec suffisant à abaisser la résistance, une adsorption supplémentaire n'ayant plus d'effet significatif d'où la stabilisation de la résistance à l'état humide pour notre cas. La légère diminution de la résistance à l'état humide après 388 jours peut être expliquée, du point de vue microstructure, à la destruction des liaisons et l'augmentation de la taille des cristaux, sachant que les petits cristaux, améliorent les propriétés mécaniques.

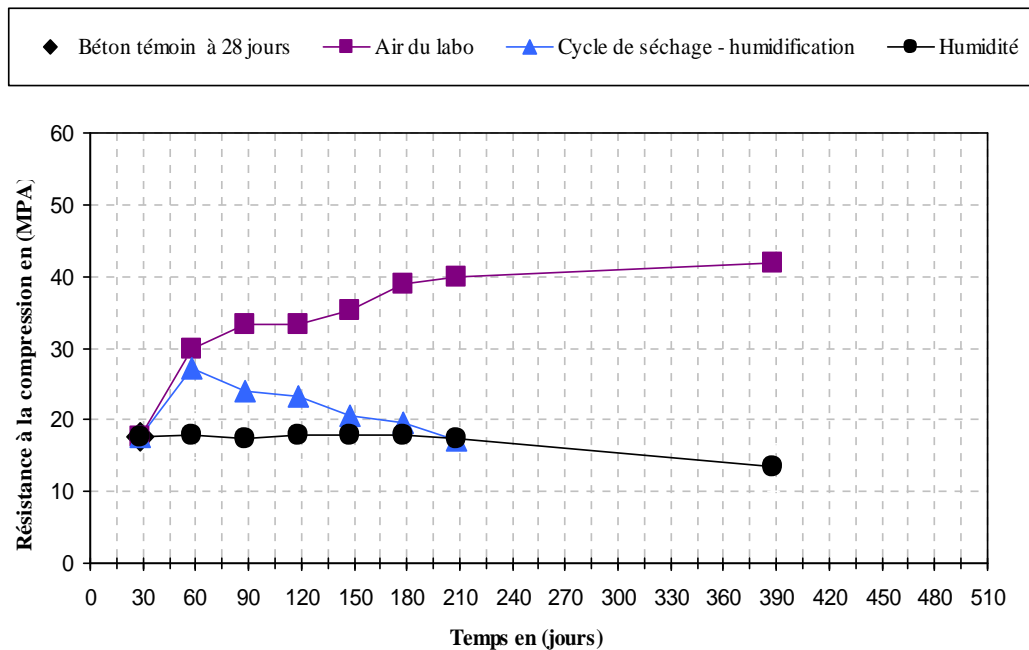


Figure III.4 : Variation de la résistance à la compression du béton de plâtre en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques.

La figure III.5 montre une légère diminution de la résistance à la compression des bétons de fibres soumis aux cycles de séchage – humidification par rapport à ceux conservés à l'air ambiant du laboratoire et dans l'humidité. Cette diminution est due au vieillissement du matériau à cause du gonflement suivi du retrait, et aussi à cause de l'altération de la matrice par le gradient thermique. Nos résultats sont accord avec les travaux [7]. On a enregistré aussi une légère diminution de la résistance à l'état humide et une augmentation de la résistance à l'air ambiant du labo. Qui est due toujours à l'évolution de la réaction d'hydratation et l'effet de la carbonatation lente qui stabilise le pH du milieu dans le temps [8].

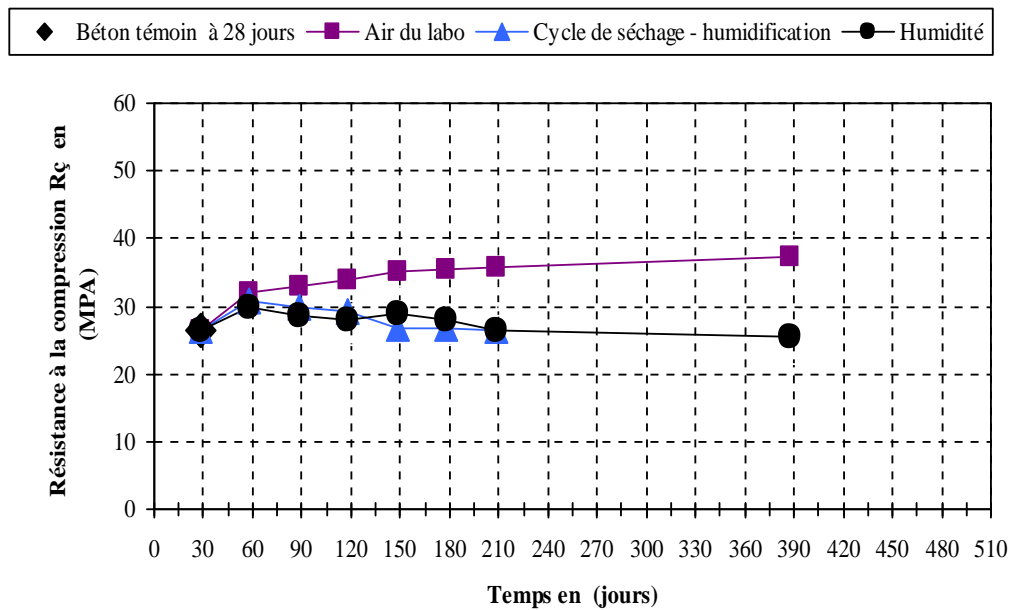


Figure III.5 : Variation de la résistance à la compression du béton de plâtre renforcé avec 1,5% de fibres de 30 mm de longueur en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques.

III.1.2. Résistance à la flexion

La Figure III.6 montre que la résistance à la flexion des éprouvettes du béton de plâtre conservées à l'air ambiant du laboratoire croît considérablement dans le temps. Ceci est dû à l'effet bénéfique de l'ajout de la chaux aérienne comme retardateur de prise, tandis que pour les éprouvettes conservées dans une ambiance humide, la résistance à la flexion décroît dans le temps et cela peut être expliquée d'après la littérature par la quantité de l'eau adsorbée qui est un paramètre important pour repérer les modes d'actions de l'eau sur le comportement mécanique. L'évolution de la contrainte à la rupture en fonction de la reprise d'eau a été enregistrée par **Coquard [7] et Badens[9]**. Les toutes premières quantités d'eau adsorbées agissent très défavorablement sur les propriétés mécaniques, une reprise d'eau de 2% en masse est considérée comme valeur limite au-delà de laquelle les propriétés sont stabilisées. La diminution de la contrainte à la rupture en flexion est proche de 60% entre l'état sec et l'état saturé en eau, et d'après **Badenes [9]**, en flexion 3 points, il apparaît aussi que les premières quantités d'eau adsorbées conduisent à une forte diminution de la contrainte à la rupture. D'autres auteurs montrent que la modification due au gonflement à long terme de la structure cristalline (grossissement des cristaux de gypse) semble réponse de la baisse des propriétés mécaniques. Pour les éprouvettes soumises aux 30 cycles de séchage- humidification, la résistance à la flexion augmente par rapport au béton témoin à 28 jours, ensuite, elle diminue et cela peut être attribuée au phénomène de dissolution – recristallisation du gypse dû aux variations dimensionnelles du matériau.

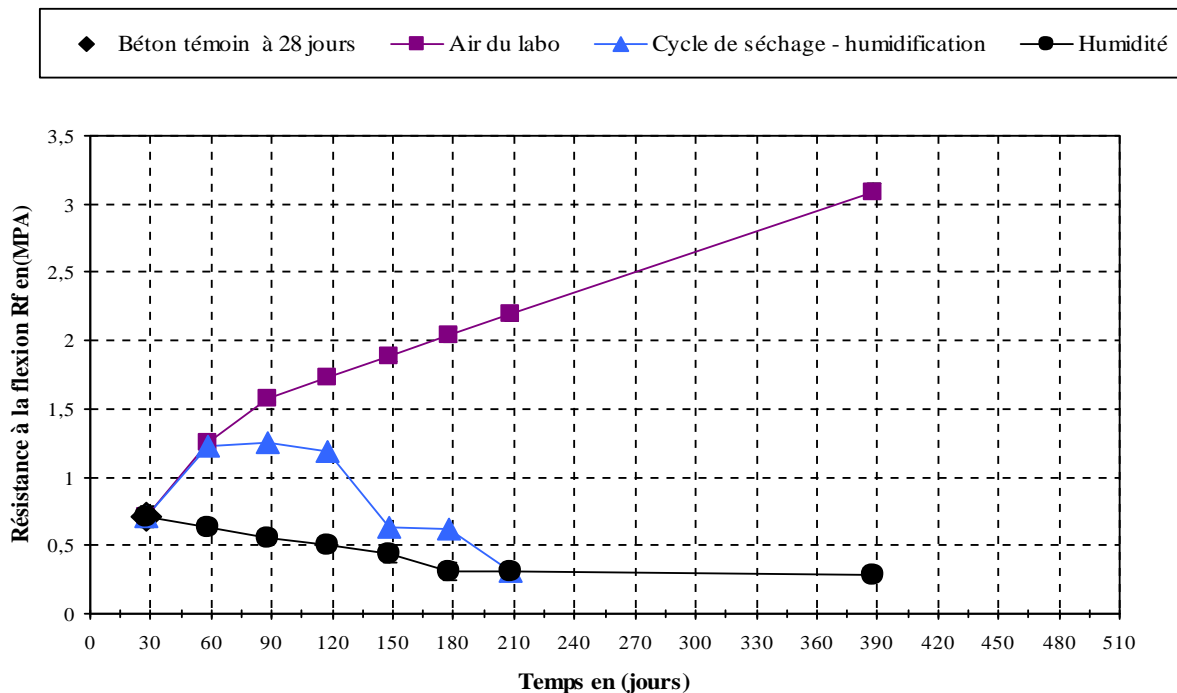


Figure III.6 : Variation de la résistance à la flexion du béton de plâtre dans le temps et pour différents milieux hygroscopiques.

D'après la figure III.7, on remarque une diminution de la résistance à la flexion des éprouvettes soumises à des cycles de séchage - humidification par rapport à celles conservées dans l'humidité et à l'air ambiant du laboratoire, cela peut être expliquée par le gonflement dû à l'absorption d'humidité suivi du retrait, d'une part et les variations dimensionnelles causées par le gradient thermique des deux matériaux, qui ne sont pas compatibles mécaniquement, d'autre part à cause de l'altération des fibres dans la matrice par la rupture des molécules de cellulose durant le vieillissement [10,11,12]. En considérant les différents travaux sur le comportement du plâtre à l'état sec et saturé, on peut attribuer la diminution de la résistance à la solubilité du gypse qui augmente avec l'élévation de la température et la décomposition de l'ettringite au delà de 27 °C. [13]. Nos remarques sont en accord avec les résultats de Toledo [14] sur les matrices cimentaires renforcée par les fibres de sisal et les fibres de coco et contredisent les résultats de Sharman et Vautier [15] qui ont plutôt observé une légère amélioration de la résistance à la flexion des ciments renforcés par des fibres de bois après le dixième cycle de séchage – mouillage.

On a constaté aussi une augmentation de la résistance pour les éprouvettes conservées pendant 30 jours en milieu humide puis une légère diminution en fonction du temps jusqu'à 388 jours. Cette diminution est due à l'effet de l'humidité sur le matériau que ce soit fibre ou matrice, car dans un milieu saturé en eau, les liaisons d'hydrogène dans les fibres sont détruites par une forte pression de gonflement et des forces de friction considérables sont développées. Si les forces sont importantes sur une longueur suffisante de la fibre, celle-ci se charge jusqu'à la rupture. Du point de vue propriétés géométriques de la fibre dans l'humidité Canovas [16] a montré que l'humidité augmentait le diamètre et produisait un désordre intermoléculaire et augmentait également la perméabilité du composite. Par ailleurs, Coutts [17], du point de vue chimique, a rapporté que l'humidité possédait une grande influence sur les composés de la fibre

telles que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine et que la résistance de la fibre diminuait de 50 %, quand la fibre est utilisée dans un composite exposé à une humidité élevée.

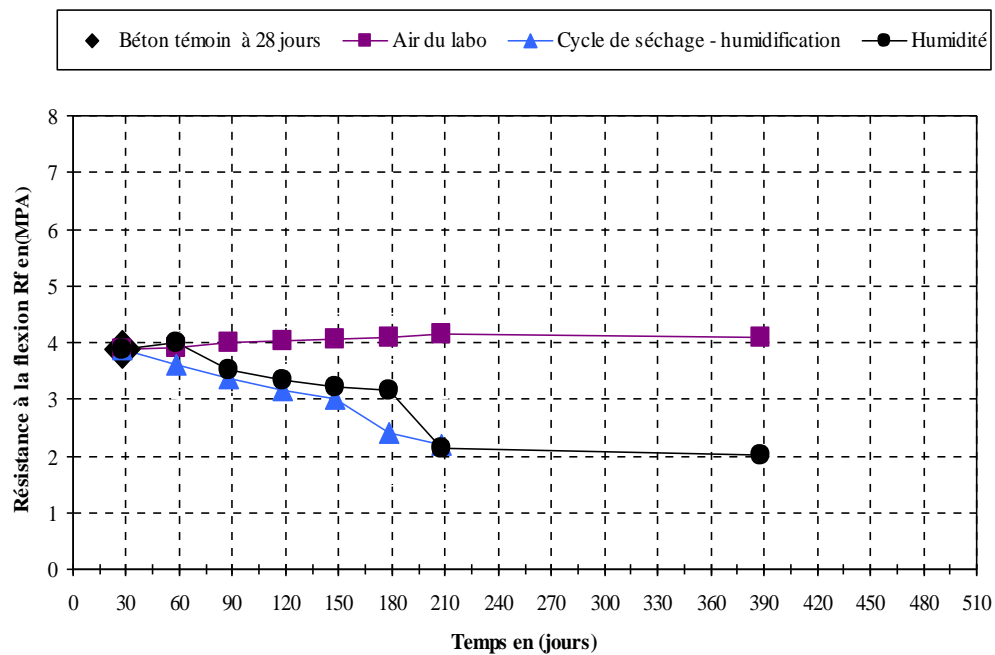


Figure III.7: Variation de la résistance à la flexion du béton de plâtre renforcé avec 1,5% de fibres de 30 mm de longueur en fonction du temps et pour différents milieux hygroscopiques.

III.2. Variation de la perte de masse lors de processus séchage – humidification

La figure ci-dessous montre que la perte de masse évolue pendant les premiers cycles. Après elle se stabilise dans le temps et cela pourrait être attribué à la dégradation de gypse qui est due au phénomène de dissolution – recristallisation.

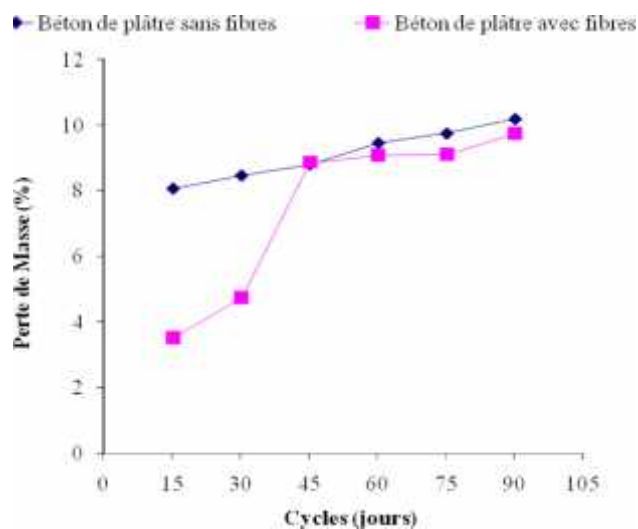


Figure III.8 : Variation de la perte de masse en fonction de nombre de cycles de séchage -humidification.

III.3. Hypothèses proposées pour l'explication de l'étude de la durabilité des bétons de fibres étudiés

- ✓ L'évolution de la résistance mécanique dans le temps pour les éprouvettes conservées à l'air ambiant du laboratoire pourrait être attribuée à la carbonatation lente de la chaux introduite comme retardateur de prise du plâtre, donc il faut vérifier la présence de la chaux par différents techniques ATD, DRX, EDS, en identifiant la présence du calcaire.
- ✓ La perte de résistance en ambiance humide pourrait être due à la dissolution du gypse et recristallisation en macles plus gros. Dans ce cas, on doit contrôler la taille des cristaux du gypse au MEB.
- ✓ Les cycles de séchage- humidification reproduisent en accéléré le phénomène de dissolution – recristallisation de gypse. Il faut vérifier la taille de la zone affectée.

III.4. Différentes techniques utilisées pour la validité des hypothèses proposées

III.4.1. Analyse thermique (ATD, ATG)

Les résultats des thermo- grammes enregistrés sur les échantillons étudiés sont présentés dans les tableaux 1 et 2 (voir Annexe II). Il est montré qu'entre 147°C et 208°C, l'apparition de deux pics endothermiques consécutifs bien séparés, le premier pic est de hauteur importante. Cependant, ces deux pics traduisent la double déshydratation de gypse et du semi hydrate qui conduit à la formation de l'anhydrite III, dit "anhydrite soluble ».

En poursuivant le traitement thermique et après déshydratation du gypse pour les deux cas, cœur et surface de l'échantillon, on a détecté deux autres pics endothermiques. Le troisième pic d'après la littérature, qui se situe entre (200 - 600°C) [18], correspond probablement au calcium - silico- aluminat hydraté (l'eau chimique autour du composé hydraulique. Pour nos échantillons, ce pic se situe cependant à une température supérieure à 600°C. Le quatrième pic correspond à la décomposition de la calcite à une température comprise entre 882 à 920°C, or la décomposition de la calcite pure se produit entre 820 et 900 °C. La littérature montre qu'entre les deux pics endothermiques et le troisième pic, il y a un pic exothermique d'intensité relativement faible et qui correspond à une transformation cristalline hexagonale en orthorhombique. On obtient alors l'anhydrite II, dit insoluble et se manifeste entre 350 et 400° [19].

On remarque d'après les deux tableaux 1 et 2 (Annexe II) que les bétons de référence sans fibres à 28j et 208j conservés à l'air du labo ont des températures de déshydratation de gypse et de décomposition de calcite très proches, c'est-à-dire que la réaction de l'hydratation se déroule normalement dans le temps contrairement à celles obtenues pour les bétons de fibres qui est gêné par l'introduction de fibres. La perte en masse de calcite est plus importante à 208 jours par rapport à celle de 28 jours, ce qui explique l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme par la carbonatation de la chaux introduite comme retardateur de prise.

On trouve beaucoup de calcite dans les bétons de fibres que les bétons de plâtre sans fibres et cela peut être attribuée à la présence de fibres qui favorisent la réaction de carbonatation, d'où les meilleures propriétés mécaniques. Si on compare les résultats de la température entre le béton de fibres à 208 jours conservés à l'air ambiant du labo. avec celles soumis aux cycles de séchage- humidification (90 cycles). On trouve que les températures de déshydratation de gypse de celles de l'air du labo sont supérieures à celles de séchage – humidification parce que le gypse dégradé se déshydrate bien avant, voir photo MEB. Alors que

le béton sans fibres soumis à des cycles de séchage humidification se déshydrate et donne le plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$, et le plâtre reste sans déshydratation et cela confirme que les cycles de séchage- humidification influent sur la thermodynamique de la réaction de l'hydratation d'où une chute considérable des propriétés mécaniques dans le temps due à la présence de demi molécule d'eau $1/2 \text{H}_2\text{O}$.

D'une manière générale on a pu identifier la présence de la calcite dans les différents échantillons étudiés d'où la vérification de la première hypothèse.

III.4.2 Diffraction par les rayons X

Les différents diffractogrammes obtenus sont illustrés sur les figures ci-dessous. Concernant le diffractogramme des bétons de plâtre sans fibres à 28 jours. Fig.III.9, on constate qu'il y'a une cohérence entre le cœur et la surface de l'échantillon Fig.III.10.

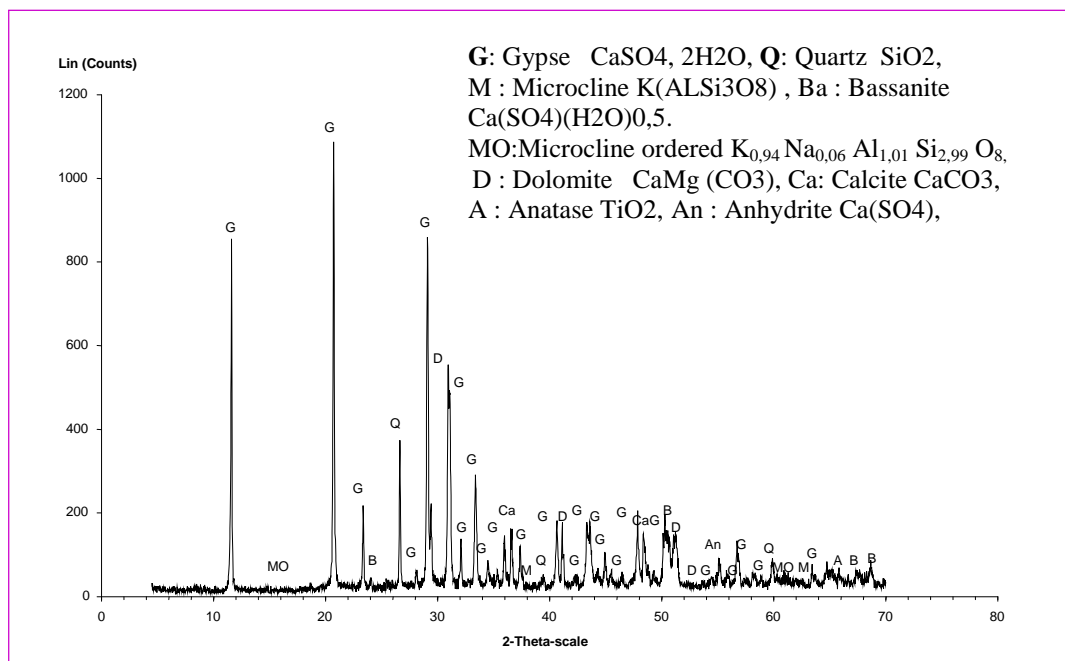
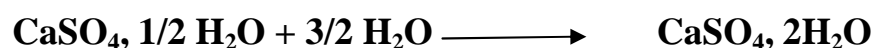


Figure III.9 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres à 28 jours (cœur de l'échantillon).

On trouve différentes phases cristallines au cœur de l'échantillon, où on a détecté beaucoup de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ qui représente le résultat de la réaction de l'hydratation du plâtre suivante :



On a enregistré un pic intense de quartz SiO_2 à l'extérieur par rapport au cœur de l'échantillon. Nous avons pu, en plus, observer d'autres phases telles que :

L'anatase TiO_2 , microcline ordered $\text{K}_{0,94}\text{Na}_{0,06}\text{Al}_{1,01}\text{Si}_{2,99}\text{O}_8$ et microcline $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ provenant des granulats siliceux, sable utilisé.

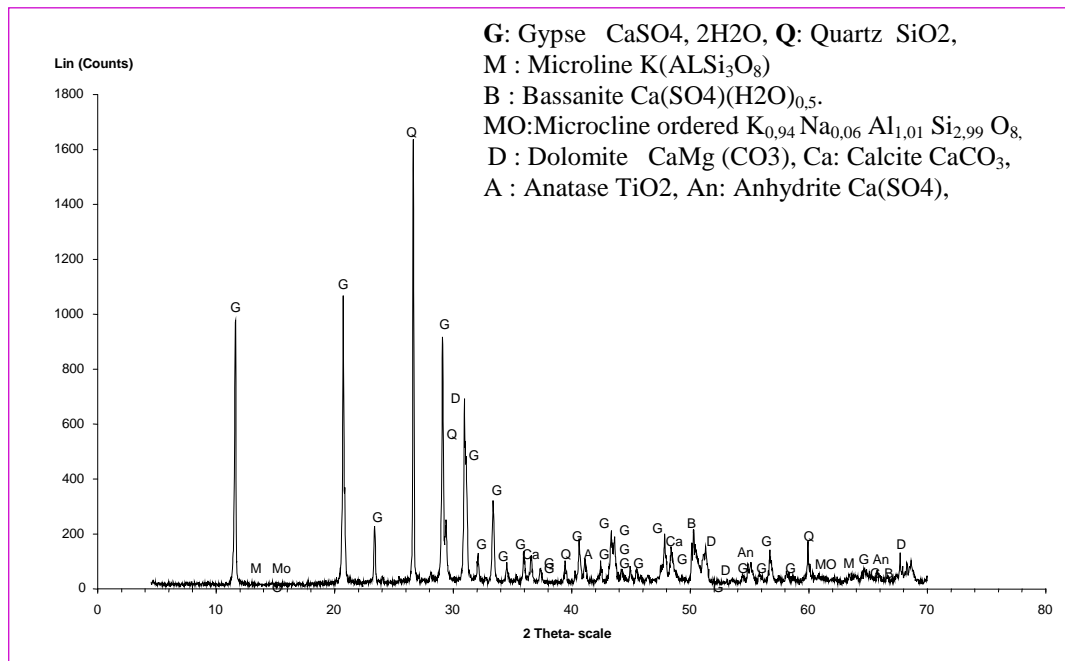


Figure III.10 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres à 28 jours (surface de l'échantillon).

On a rencontré également un peu de calcite qui est formée par la réaction de la carbonatation et qui est responsable du développement des propriétés mécaniques dans le temps. La dolomite participe aussi, ce sont des petits cristaux qui améliorent les propriétés mécaniques [20].

Pour les échantillons du béton de plâtre sans fibres à 208 jours et conservés à l'air ambiant du laboratoire et d'après les figures III.11 et III. 12, il y a toujours une cohérence entre le cœur et la surface de l'échantillon. Beaucoup de gypse a été détecté au cœur et sur la peau de l'échantillon. La présence du gypse à l'extérieur est très bénéfique du point de vue pollution. Par contre on a détecté un pic de quartz d'une intensité faible à l'extérieur par rapport à celui obtenu dans le cœur de l'échantillon (fig.III.11).

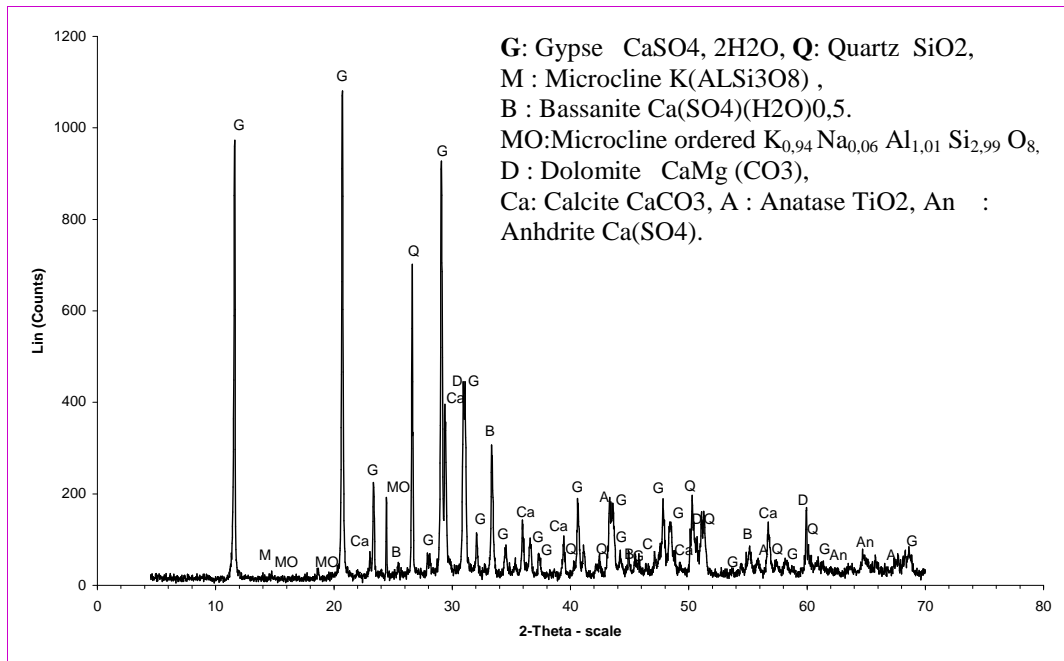


Figure III.11 : *Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres conservé 208 jours à l'air ambiant du laboratoire (cœur de l'échantillon).*

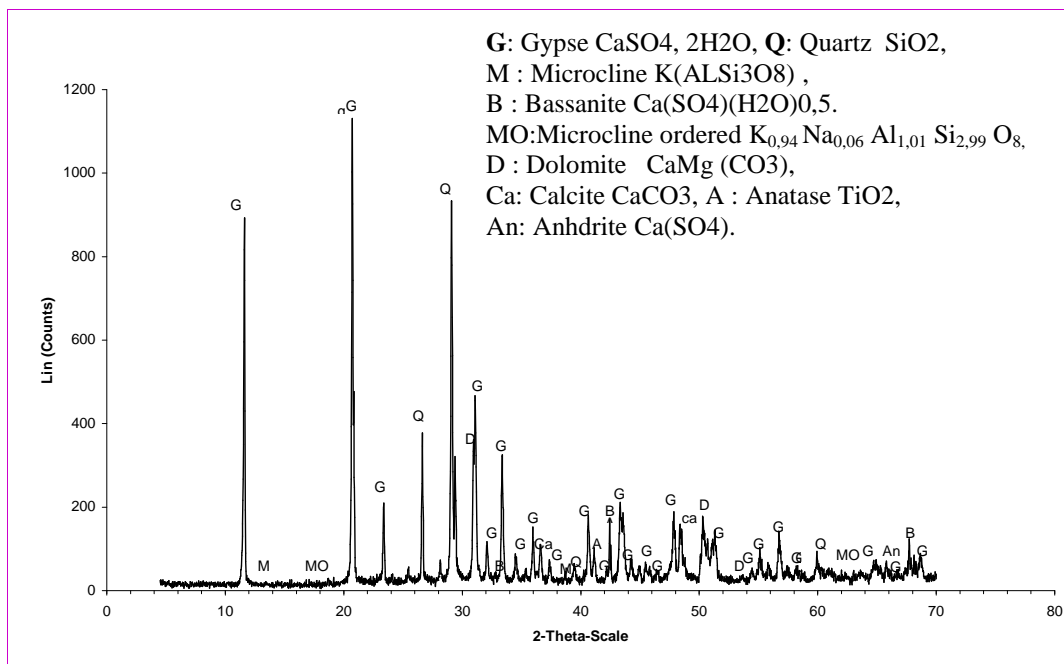


Figure III.12 : *Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres conservé à 208 jours à l'air ambiant du laboratoire (surface de l'échantillon).*

Chapitre III: Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Concernant les phases qui ont amélioré les propriétés mécaniques en fonction du temps telles que la calcite et la dolomite, des pics plus intenses que ceux obtenus à 28 jours ont été observés. On a détecté d'autres pics moins importants comme :

- Microcline orderd , Microcline, et l'Anatase provenant des granulats siliceux
- Basanite et l'anhydrite.

Pour les échantillons soumis à des cycles de séchage – humidification, la première remarque c'est l'affaiblissement des pics de gypse par rapport à ceux obtenus à 28 jours (dégradation du gypse) Fig.III.13 et III.14, ce qui a été aussi confirmé par microscopie électronique.

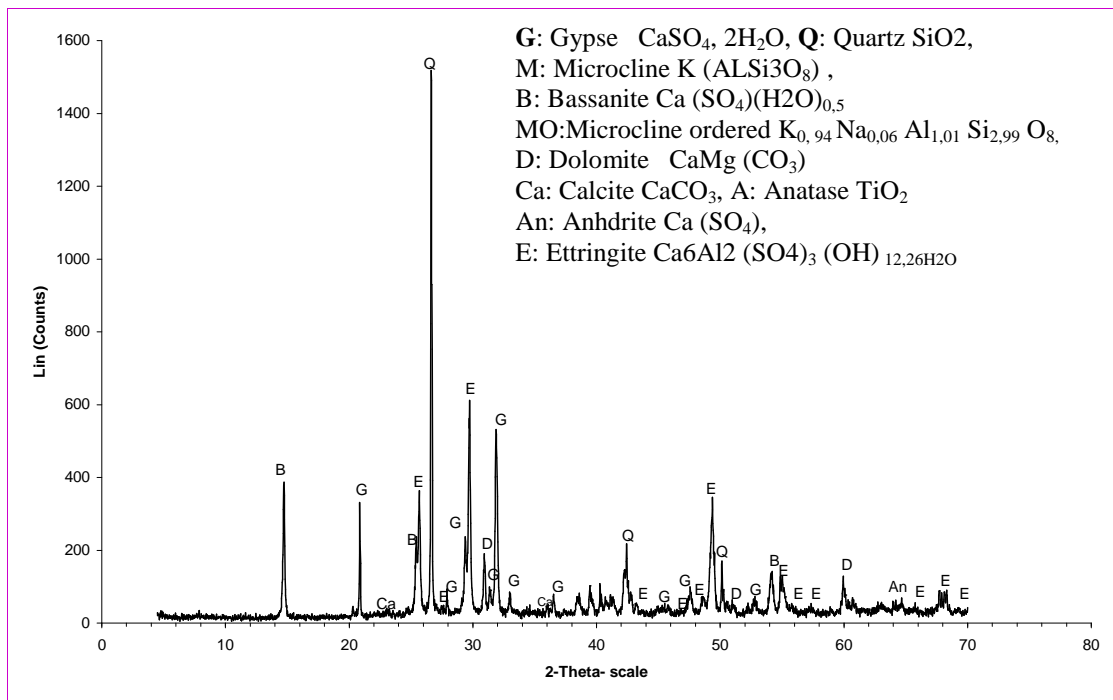


Figure III.13 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres soumis à des cycles de séchage-humidification (90 cycles, cœur de l'échantillon).

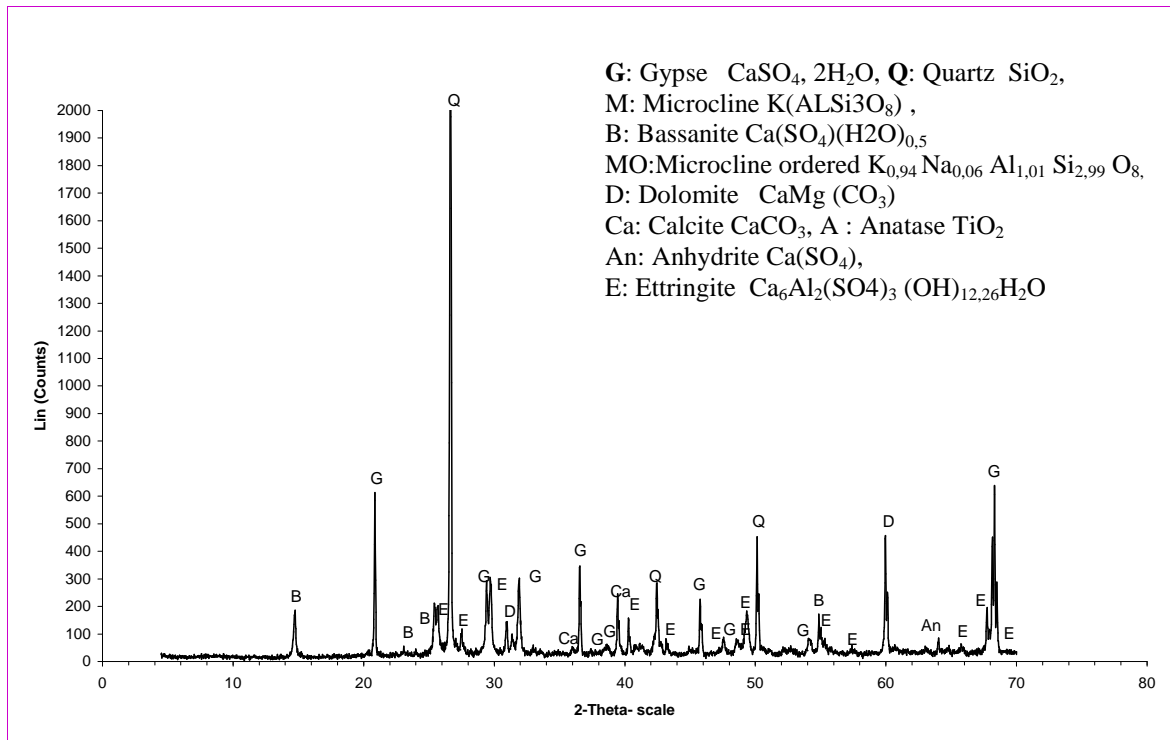


Figure III.14 : Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre sans fibres soumis à des cycles de séchage-humidification (90 cycles, surface de l'échantillon).

Par ailleurs un pic intense du quartz a été observé sur l'extérieur du matériau Fig.III.14, provenant des granulats siliceux qui améliorent les propriétés mécaniques après la dégradation du gypse, ce qui a été le cas après 90 cycles de séchage –humidification. On a pu aussi observer un pic de bassanite CaSO_4 , le résultat du processus de séchage – humidification du gypse. Et le plus important, c'est la présence de l'ettringite due au séchage et celle qui produit les forces d'expansion, d'où la diminution des propriétés mécaniques dans le temps, ce qui est en accord avec nos résultats et rapportés également dans la littérature [13].

Pour les échantillons du béton sans fibres conservés dans un milieu humide pendant 180 jours, on a détecté des pics de gypse peu intenses par rapport à ceux obtenus à 28 jours et peu d'anhydrite d'où l'influence de l'humidité sur la réaction de l'hydratation. On a trouvé aussi un peu de calcite, ce qui confirme que la réaction de la carbonatation a été favorisée par l'humidité. On a rencontré de l'ettringite et beaucoup d'anatase TiO_2 provenant des granulats siliceux. On a détecté des traces de dolomite. Concernant la surface de l'échantillon, on a trouvé beaucoup plus de gypse par rapport au cœur de l'échantillon.

III.4.3. Microscopie électronique à balayage équipée d'une microanalyse

L'examen de la texture des différents échantillons a été réalisé avec un microscope électronique à balayage de marque HITACHI S.800 de haute résolution.

On observe d'après la figure III.15, la calcite amorphe au milieu et les cristaux de gypse qui l'entourent bien et l'aider à se cristalliser. La majorité des cristaux de gypse ont la forme prismatique. Avec la microanalyse, on a pu détecter un pic de calcite (figure III. 16) et la partie gypse est présentée sur la figure III.17, on observe deux pics intenses de calcium et de soufre, les constituants les plus essentiels du gypse.

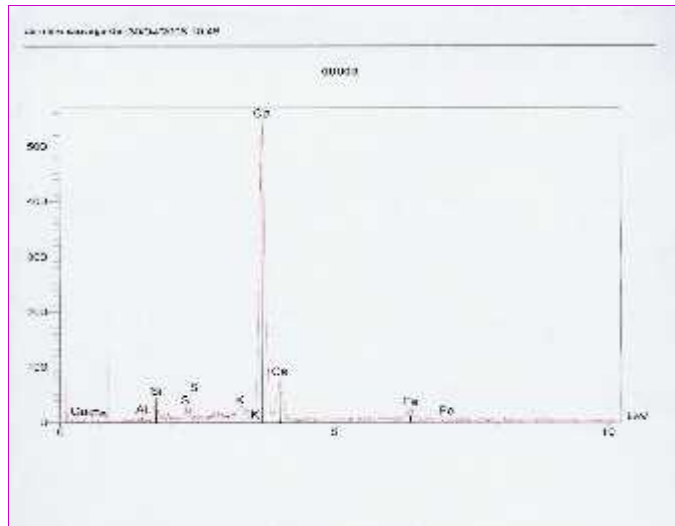
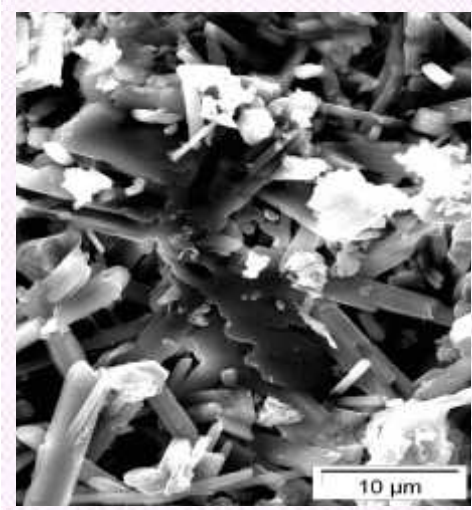


Figure III.15 : La calcite amorphe au milieu et le gypse qui l'entoure. (air ambiant du laboratoire).

Figure III.16 : Microanalyse de la partie calcite (air ambiant du laboratoire).

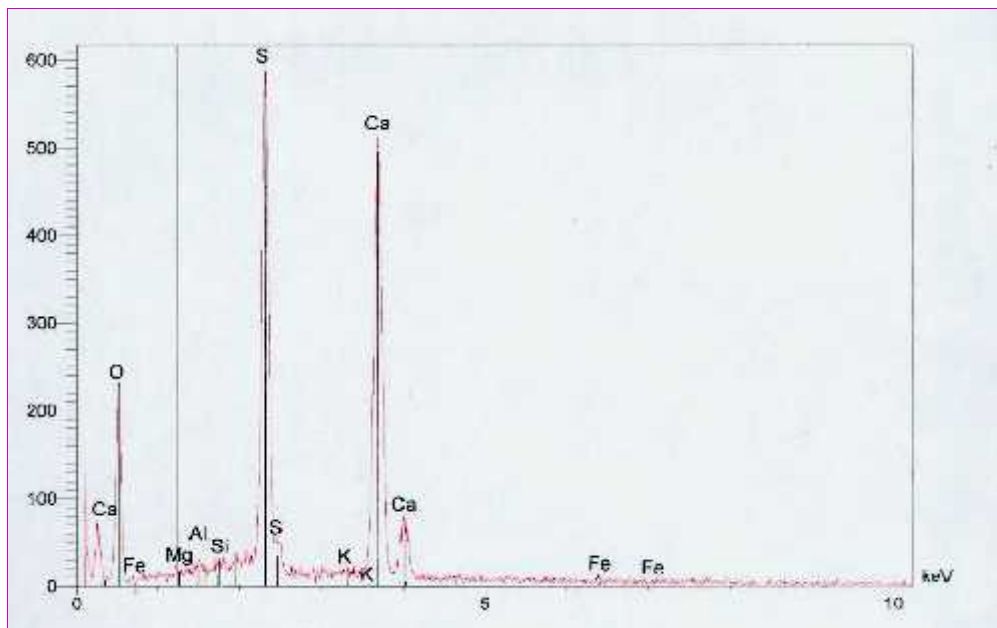


Figure III.17 : Microanalyse de la partie gypse par MEB (air ambiant du laboratoire).

Chapitre III: Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

La figure III.18 montre l'interface gypse – calcite, et une bonne interaction entre eux. par contre sur la figure III.19, on observe l'interface gypse- granulats, on distingue le gypse à droite et la silice à gauche, le gypse adhère bien sur les granulats. La figure III.20 montre la microanalyse des granulats siliceux.

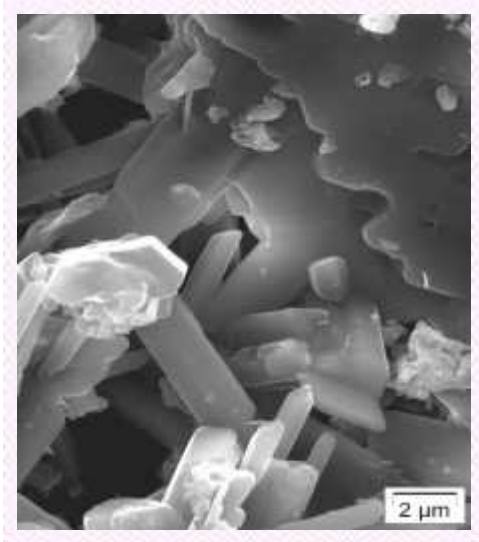


Figure III.18 : Interface gypse- calcite.
(air ambient du laboratoire).

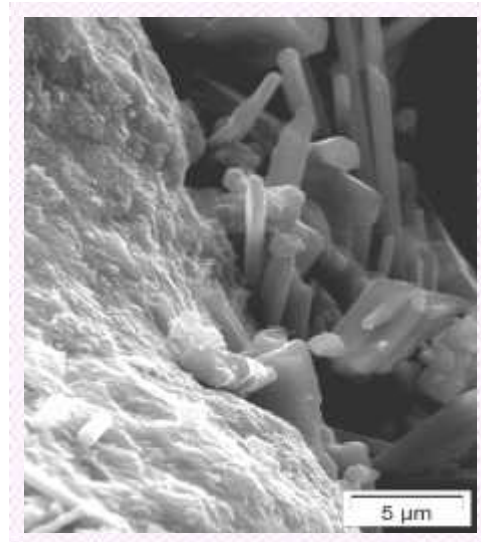


Figure III.19 : Interface gypse-granulats.
(air ambient du laboratoire).

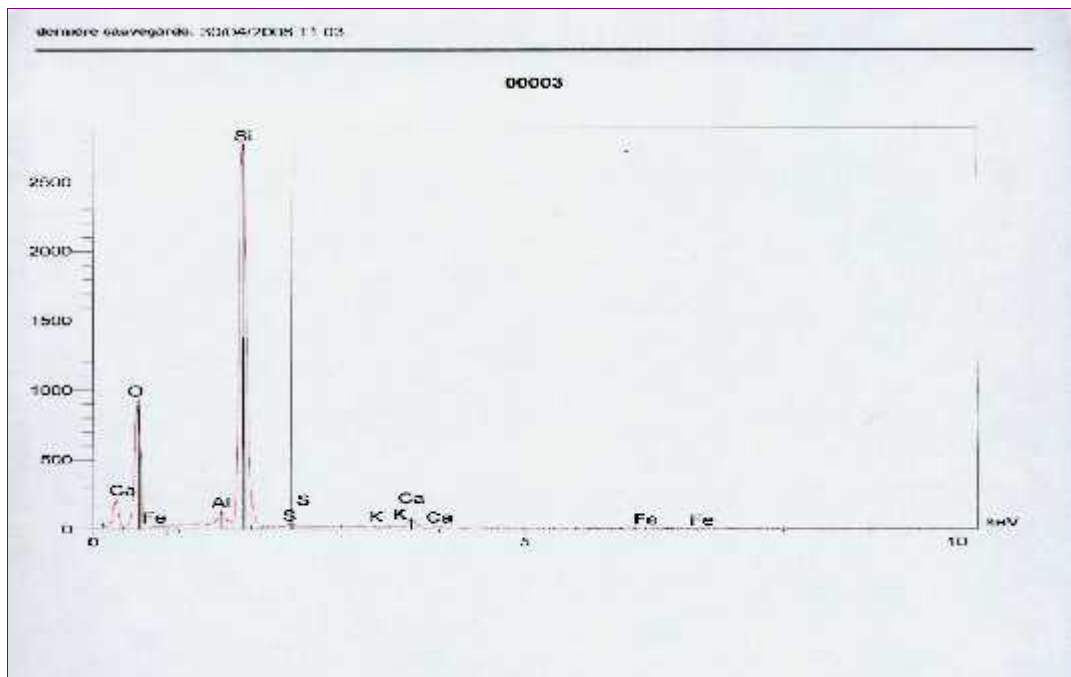


Figure III.20 : Microanalyse des granulats siliceux par MEB (air ambient du laboratoire).

La figure III.21 montre que la silice adhère bien avec le gypse et les cristaux de gypse ont une orientation aléatoire. Par contre sur la figure III.22, on observe que les cristaux sont sous forme d'aiguilles et ont la même orientation préférentielle.

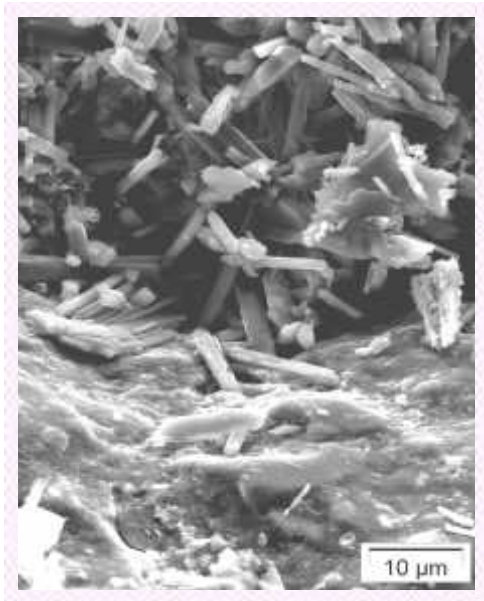


Figure III.21 : Orientation aléatoire des cristaux de gypse (interface gypse-granulats).

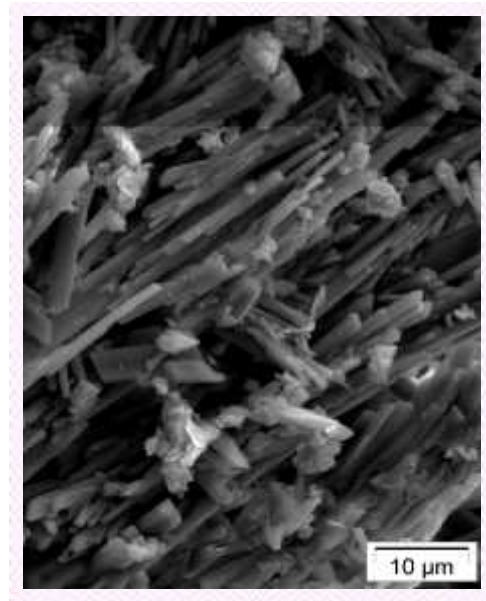


Figure III.22: Cristaux de gypse sous forme d'aiguille avec une orientation préférentielle (air ambiant du laboratoire).

Si on compare la figure III.23 de l'échantillon soumis aux 90 cycles de séchage – humidification) avec la figure III.24 de l'échantillon conservé 208 j à l'air ambiant du labo, on remarque sur la figure III. 23, l'interface gypse - granulats, la taille des cristaux se diffère et cela est due au phénomène de recristallisation, on a remarqué qu'il n'existe pas des cristaux sur la silice en séchage – humidification, et on observe le gypse qui se dissout et se recristallise. Alors qu'on trouve quelques cristaux qui se déposent sur la silice (air ambiant du laboratoire).

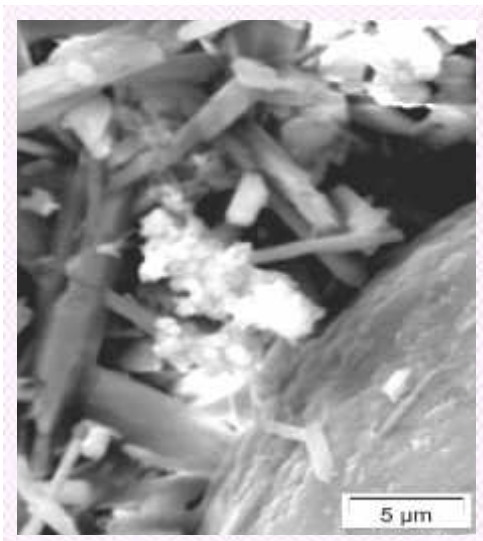


Figure III.23: Dégradation du gypse après séchage –humification, Interface (gypse- granulats).

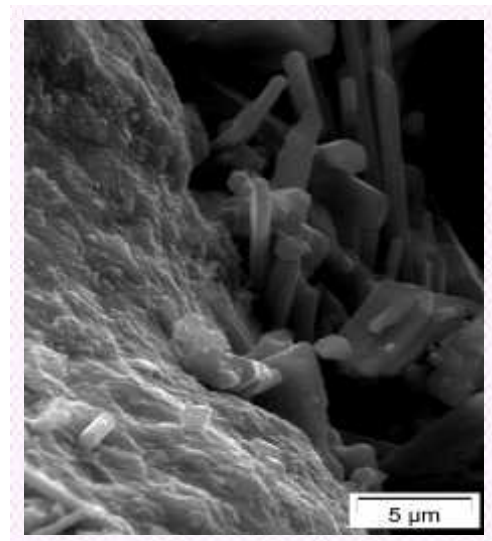


Figure III.24: Dépôt de cristaux de gypse sur la surface des granulats siliceux (air ambiant du laboratoire).

La figure III.25 montre l'adhérence fibre- gypse lors du processus de séchage - humidification, tandis que la figure III.26 montre la liaison performante entre la calcite, gypse avec la fibre utilisée et cela est due à la surface de la fibre qui présente beaucoup d'alvéoles ou elle pénètre la matrice d'où la meilleure adhérence (air ambiant du laboratoire).

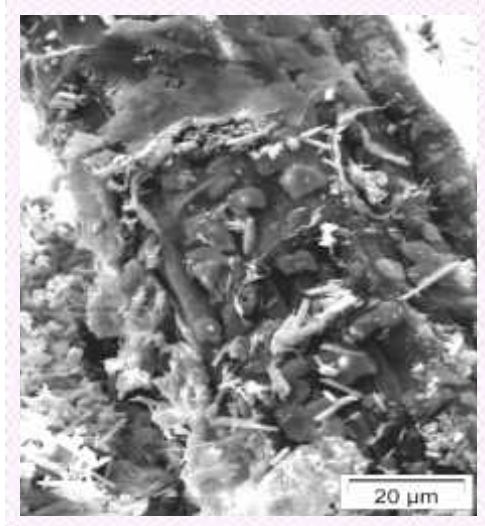


Figure III.25 : Bonne adhérence fibre-gypse après le processus séchage – humidification.

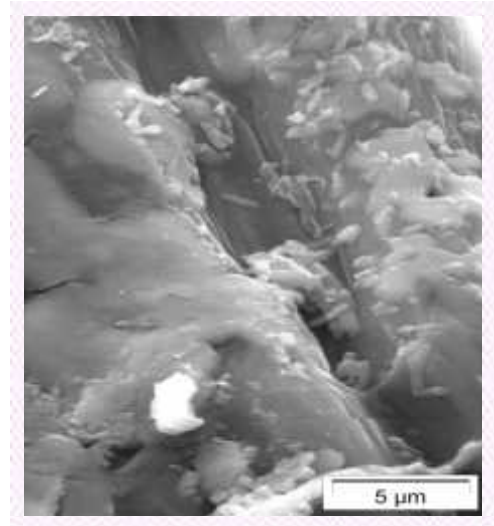


Figure III.26: Liaison performante entre la calcite - gypse avec la fibre utilisée (air ambiant du laboratoire).

Les figures III. 27 et III.28, montrent les interfaces gypse- calcite de l'échantillon soumis à des cycles de séchage - humidification et celle de l'échantillon conservé à l'air ambiant du laboratoire. Et avec une acquisition de 100 s, on a pu détecter le pic intense de calcium par microanalyse (fig.III.29).

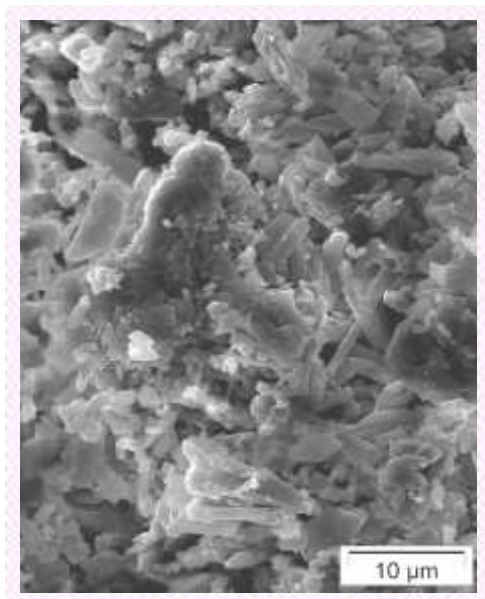


Figure III.27: Calcite peu cristallisée après le processus séchage –humidification.

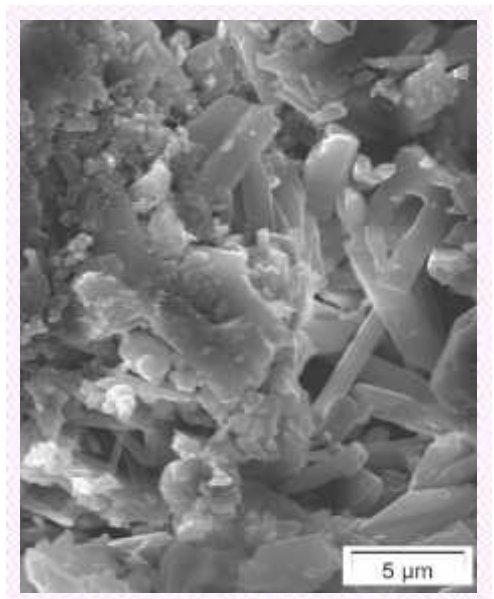


Figure III.28: Calcite plus cristallisée après la conservation à l'air ambiant du laboratoire.

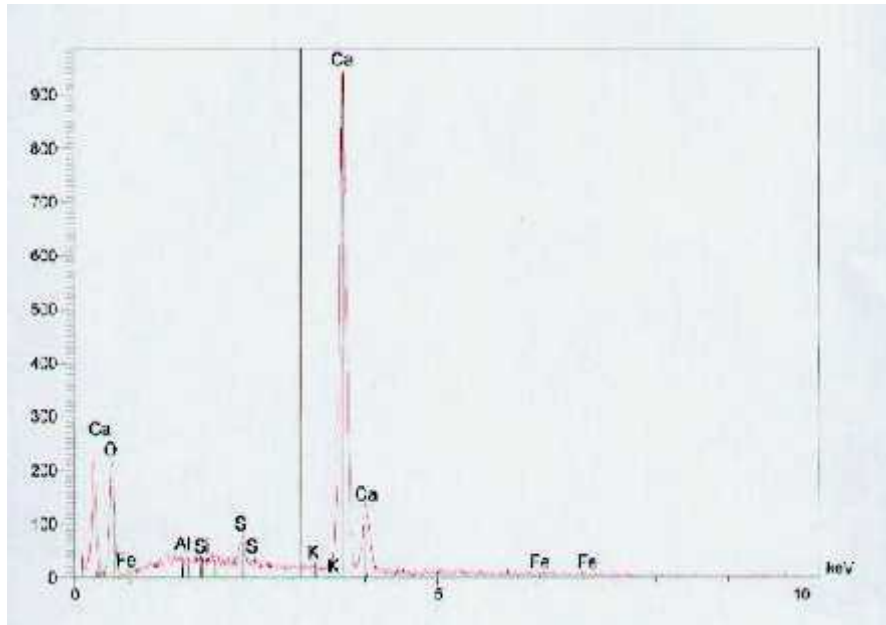


Figure III.29: Microanalyse de la partie calcite lors du processus séchage – humidification.

La figure III.30 montre une vue générale sur la matrice béton de plâtre avec fibres, qui est très dense avec différentes formes de petits cristaux qui ont amélioré la résistance à 208 jours (air ambiant du labo), par contre la figure III.31 représente une vue générale sur la matrice lors du processus séchage –humidification (90 cycles). On observe beaucoup de pores et les cristaux sont maigres et cela est due au phénomène de recristallisation du gypse.

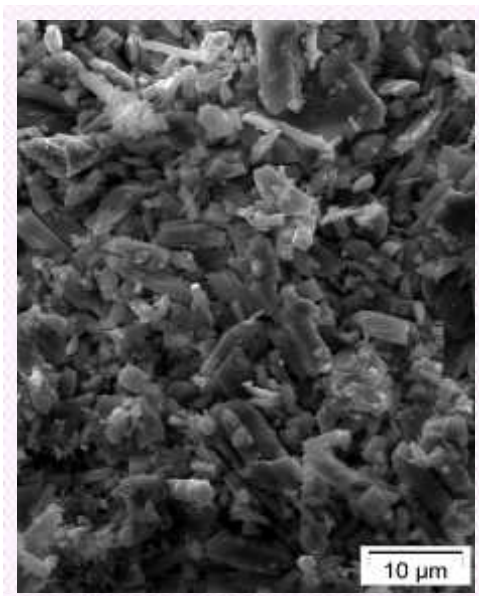


Figure III.30: Vue générale sur la matrice du béton de plâtre fibré conservée 208 jours à l'air ambiant du labo.

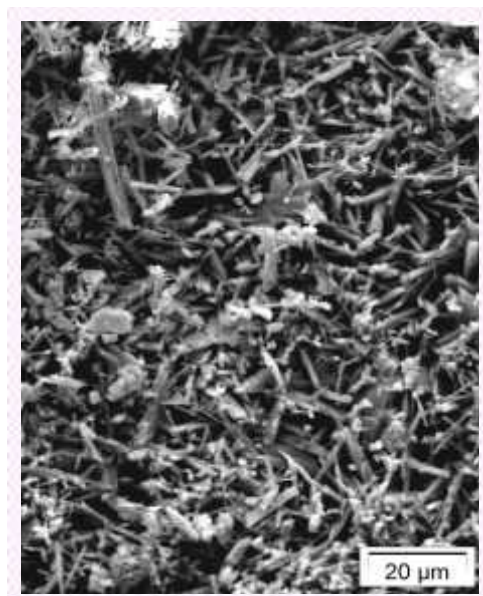


Figure III.31: Vue générale sur la matrice du béton de plâtre après 90 cycles de séchage-humidification.

Concernant l'échantillon du béton de plâtre de référence conservé dans l'humidité, on remarque que les cristaux de gypse sont bien enchevêtrés. Fig. III.32, mais pour le cas des éprouvettes soumises aux cycles de séchage-humidification, les cristaux sont mal enchevêtrés avec dégradation du gypse. Fig. III.33.

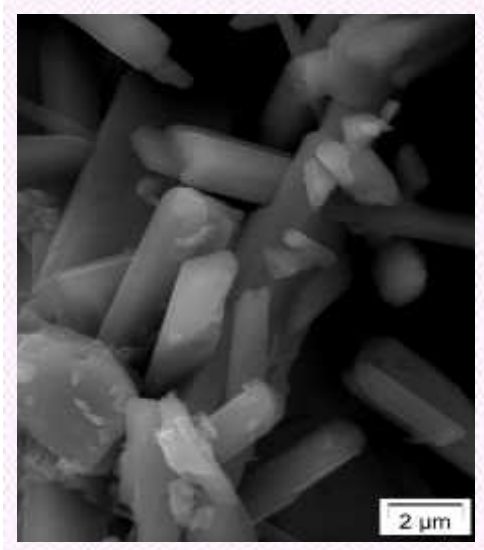


Figure III.32: Juxtaposition des cristaux bien enchevêtrés pour le béton de plâtre conservé 208 jours (28j à l'air ambiant du labo. et 180j dans l'humidité).

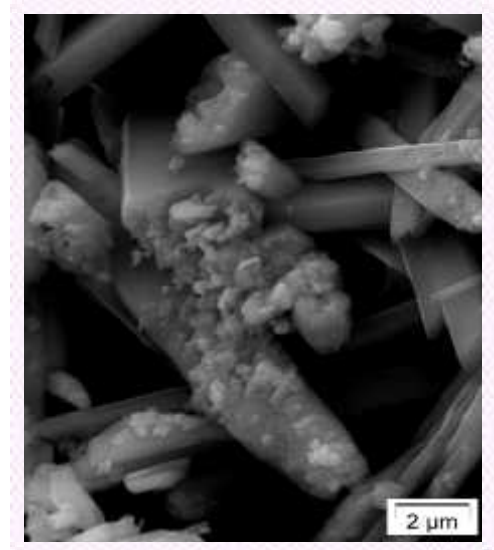


Figure III.33: Les cristaux de gypse sont mal enchevêtrés pour le béton de plâtre soumis aux cycles de séchage- humidification.

La figure III.34 montre l'effet du processus de séchage- humidification sur la matrice qui apparaît moins dense avec dégradation du gypse et les points de contact (ancrages mécaniques) sont touchés et les liaisons sont de type tenon- mortaise. Par contre lors de ce processus, l'interface gypse-granulats est dense et on voit un peu de gypse dégradé (fig.III.35).

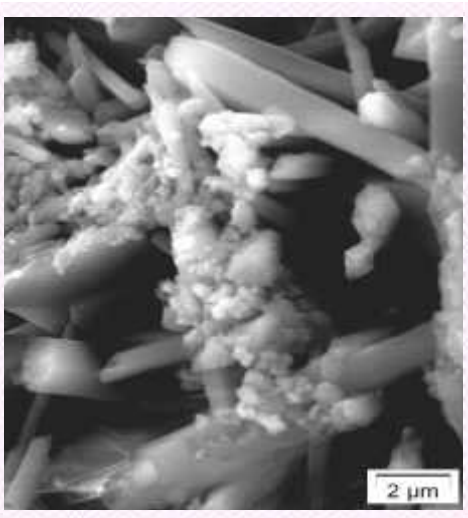


Figure III.34 : Points de contact entre les cristaux de gypse lors du processus séchage-humidification.

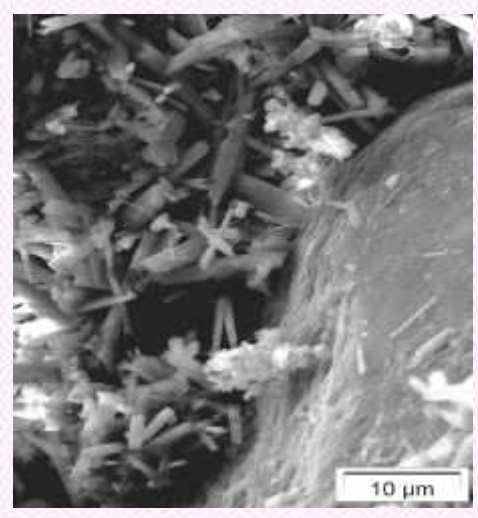


Figure III.35 : Interface gypse-granulats après 90 cycles de séchage-humidification.

Chapitre III: Etude de la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Les cycles de séchage-humidification ont fait travailler la fibre au maximum, on remarque qu'elle est bien étirée d'une façon à perdre sa section initiale. Fig.III.36, donc l'abaissement de résistance mécanique est due au vieillissement de la matrice. La Figure III.37 montre l'état de surface de la fibre et le dépôt du gypse dégradé sur elle.

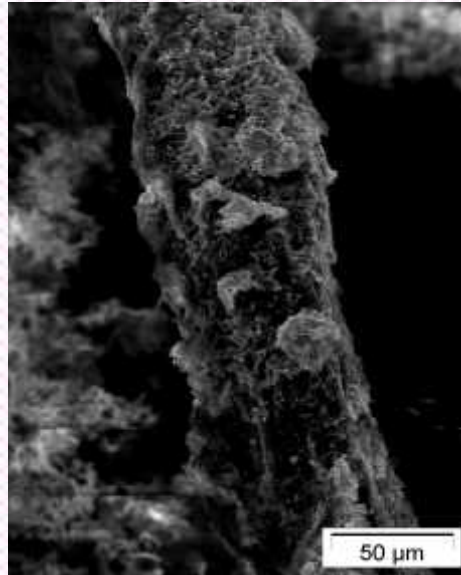


Figure III.36: Fibre bien étirée après le processus séchage –humidification.

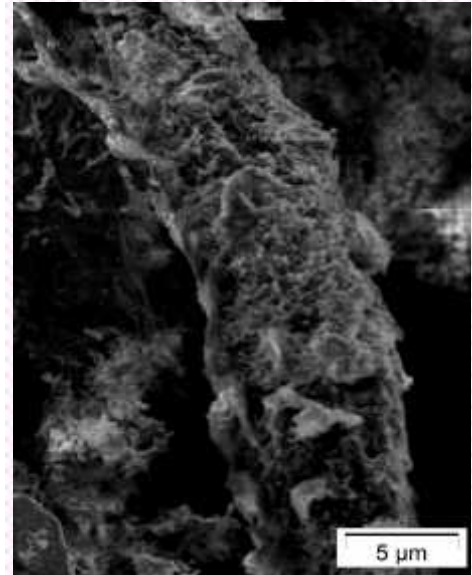


Figure III.37: Etat de surface de la fibre du palmier soumise à 90 cycles de séchage humidification.

IV. Autres essais complémentaires de durabilité

IV.1. Résistance aux cycles de gel –dégel

La cause principale des dégâts dus au gel dans le béton est l'effet d'éclatement provoqué par l'eau entrain de geler dans les pores capillaires. L'eau en gelant, le volume augmente (plus 9%) et peut créer de fortes pressions et des tensions élevées dans le béton. Selon la résistance du béton, ces forces font l'objet d'une absorption élastique ou peuvent donner lieu à des affaiblissements dans la structure voire une destruction complète du béton. Plus le béton humide gèle rapidement et fréquemment, plus les effets dommageable sont importants, d'où la nécessité de l'étude du comportement des matériaux de construction vis-à-vis au gel- dégel.

Il existe deux procédures d'essais de gel sur le béton durci, la Norme NFP18-406 de gel et dégel dans l'eau et la norme NFP 18-425 de gel dans l'air et dégel dans l'eau, inspirés de la norme américaine ASTM 666 5 Résistance of concrete to rapid freezing and thawing.

Dans notre cas, l'étude du comportement des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier dattier a été faite en s'appuyant sur les travaux de durabilité réalisés sur un composite à base de plâtre [21], pour pouvoir comparer nos résultats.

Les éprouvettes en béton de plâtre et celles renforcées avec des fibres végétales du palmier dattier ont été réalisées selon le mode opératoire présenté dans le chapitre précédent; les éprouvettes sont des cubes de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, après 28 jours de cure à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$, elles sont soumises aux conditions suivantes :

- 1) 2h à une température de -15°C ;

2) 2h à une température de + 15° C dans l'eau.

Les taux de perte de résistance ainsi que de perte de masse sont déterminés pour les compositions étudiées selon la relation suivante :

$$R = \frac{R_{Ci} - R_{Cg}}{R_{Ci}} \quad \text{(III-2)}$$

Avec R_{Ci} : Résistance à la compression initiale (avant l'essai de gel- dégel);

R_{Cg} : Résistance à la compression finale (après l'essai de gel- dégel);

R : Perte en résistance à la compression.

$$m = \frac{M_i - M_g}{M_i} \quad \text{(III-3)}$$

Avec M_i : Masse initiale de l'éprouvette (avant l'essai de gel- dégel);

M_g : Masse finale (après l'essai de gel- dégel);

m : Perte en masse.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Résultats de l'essai de la résistance aux cycles gel- dégel

Echantillons	Propriétés	Après 1 mois de l'essai gel-dégel	Après 2 mois de l'essai gel-dégel
Béton de plâtre (sans fibres)	R_C avant l'essai de gel- dégel	17,55	17,55
	R_C Après l'essai de gel- dégel	22,5	20,4
	R	-	-
	m	1,27	4,60
Béton de plâtre renforcé de fibres du palmier dattier	R_C avant l'essai de gel- dégel	26,38	26,38
	R_C Après l'essai de gel- dégel	32,00	29,00
	R	-	-
	m	0,60	4,04

D'après le tableau III.1, on remarque que les cycles de gel-dégel n'ont pas influé sur la résistance à la compression; une bonne tenue à été enregistrée pour les deux bétons de plâtre sans fibres et celui renforcé avec les fibres du palmier dattier.

Une légère augmentation de la résistance à la compression a été enregistrée pour les bétons de plâtre sans fibres, peut être attribuée à la présence de la chaux qui est en plus de son rôle retardateur de prise, elle étanchéifie la structure interne du matériau et développe sa résistance à long terme [22], ce qui a été aussi remarqué lors de la vérification du comportement des composites étudiés dans le temps et affirmée par la structure dense du matériau par SEM, on peut signaler aussi que cela est dû à la présence des gros granulats qui sont denses d'après leur caractérisation dans le chapitre II et cela par leur faible porosité obtenue.

L'augmentation de la résistance du béton de plâtre renforcé de fibres du palmier soumis à des cycles de gel- dégel est due au fait que le nombre des microfissurations internes et la meilleure uniformité du béton renforcé de fibres dosés, augmentent la résistance aux cycles gel-dégel en diminuant la conséquence des lézards en surface [23]. Les pertes en masse enregistrées sont très faibles par rapport aux limites recommandées par la norme ASTM D560, les résultats obtenus confirment que le gel -dégel n'a pas causé de fissurations considérables dans le matériau. Notons enfin qu'en général, la résistance des bétons de plâtre au gel-dégel est très bonne et elle est d'autant meilleure pour les bétons de plâtre renforcés de fibres de palmiers, nos résultats sont en accord avec les travaux sur les fibres de polypropylène [23].

La figure III.38 montre l'état de surface des bétons de plâtre témoin et le béton de plâtre renforcé de fibres et cela avant l'essai de gel-dégel, on remarque, d'après cette figure que la surface des deux échantillons est de bonne qualité avec un aspect uniforme.

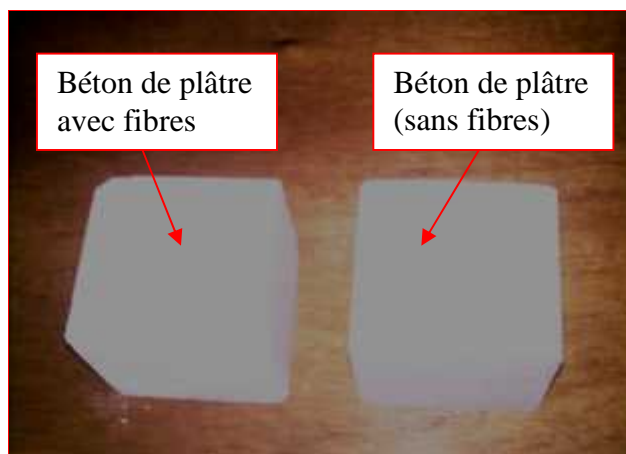


Figure III.38 : Aspect et état de surface des prismes en béton de plâtre témoin sans fibres et le béton de plâtre renforcés avec les fibres du palmier dattier avant l'essai de gel-dégel.

Lorsque des éprouvettes du béton sont soumises à des cycles de gel-dégel dans l'eau comme notre cas, il peut y avoir des problèmes de l'écaillage des surfaces qui sont indépendants des problèmes de microfissurations dus à la pression interne.

Sur la figure III.39(a) et qui correspond à l'état de surface des deux échantillons étudiés, il semble qu'il y'a un endommagement réduit au niveau des arêtes et l'apparition de quelques fibres sur la surface de l'échantillon en béton renforcés de fibres et cela après un mois de cycle de gel-dégel.

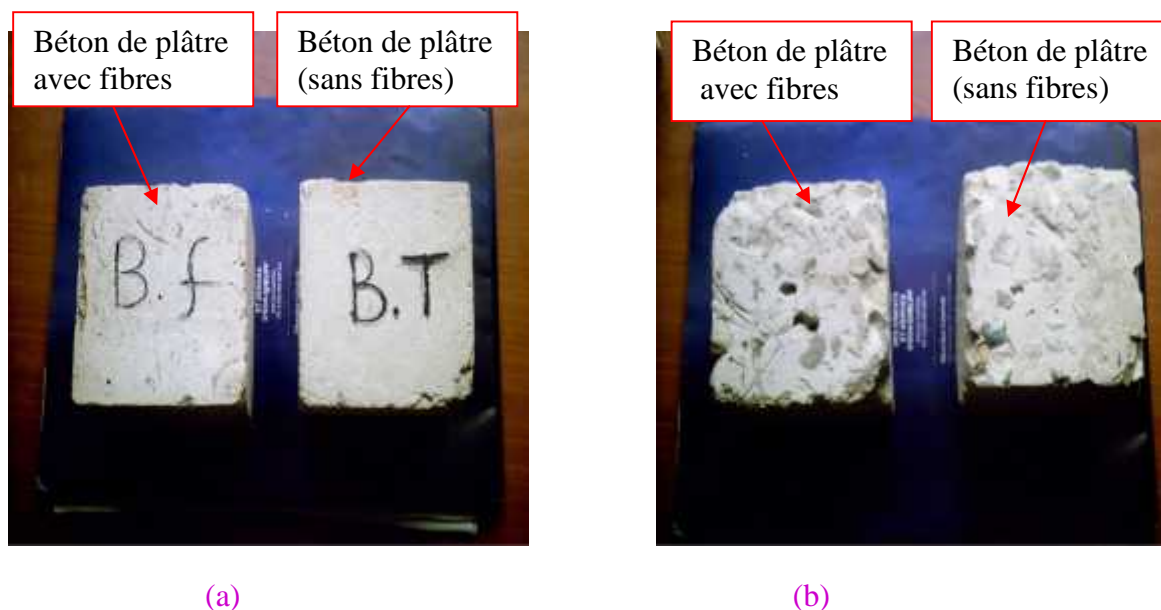


Figure III.39: Etats de surface des prismes en béton de plâtre sans fibres et le béton de plâtre renforcés avec les fibres du palmier dattier (a) Après 1 mois de gel dégel, (b) après 2 mois de gel dégel.

Après deux mois de cycles de gel-dégel et d'après la figure III.39(b), on remarque clairement, le phénomène d'écaillage sur les deux surfaces des échantillons étudiés, l'apparition des gros granulats ainsi que les fibres du palmier sur la surface des bétons de plâtre renforcé et cela parce que les granulats et la pâte en surface sont saturés. Il ne faut que quelques microfissures pour détacher de petites particules de pâte ou de mortier de la surface.

Donc l'écaillage ne peut généralement pas être totalement empêché si le béton gèle toujours dans l'eau, en plus la mauvaise tenue du plâtre dans ce dernier, est probablement la raison pour laquelle l'écaillage est un problème plus courant que la fissuration interne.

IV.2. Résistance à l'abrasion

Dans plusieurs circonstances, les surfaces du béton sont sujettes à l'usure. Cela peut être due au frottement causé par un glissement, au grattage ou à des chocs. Dans les cas des structures hydrauliques, l'action abrasive des matériaux charriés par l'eau provoquée par l'écoulement de l'eau est également une cause d'usure, Neville [24].

Parmi les facteurs influençant fortement la résistance à l'abrasion, sont la résistance et la dureté de la surface; par conséquent la résistance à la compression du béton est le principal facteur contrôlant l'abrasion.

La norme ASTM C779-89 a recommandé trois essais qui peuvent être utilisés en laboratoire ou sur chantier. Dans l'essai au disque tournant, on applique un mouvement de la rotation à l'aide de trois disques plats tournant chacun sur leur axe à une fréquence de 4,6 HZ suivant une trajectoire circulaire à une de 0,2 HZ. Des grains de carbone de silicium sont utilisés comme matériau abrasif. Dans l'essai d'abrasion par billes d'acier, on applique une charge sur une plaque tournante séparée de l'éprouvette du béton par des billes d'acier, l'essai est effectué en faisant couler l'eau pour retenir l'eau.

D'après Neville [24], l'essai aux billes d'acier plus fiable et, plus sensible et en s'appuyant sur les travaux [21] qui s'inspirent de la norme standard ISO 5470 pour étudier la résistance à l'abrasion des composites à base de plâtre. Des échantillons préparés pour l'essai de l'abrasion sont des éprouvettes en plâtre, béton de plâtre et béton de plâtre renforcé de 1,5% en masse de fibres du palmier avec 30 mm de longueur, elles sont de dimensions $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$.

Après 28 jours, les éprouvettes ont été soumises à 50 rotations dans un tambour cylindrique à l'aide des billes d'acier.

Les résultats de l'essai d'abrasion sont résumés dans le tableau ci- dessous.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai d'abrasion.

Type d'échantillon	Masse avant l'essai d'abrasion	Masse après l'essai d'abrasion	Perte de masse en (g)
Masse (g)			
Plâtre témoin	$143,0 \pm 0,5$	$143,0 \pm 0,5$	Complètement broyé après 20 rotations
Béton de plâtre témoin (sans fibres)	$348,5 \pm 0,5$	$347,5 \pm 0,5$	1
Béton de plâtre renforcé de fibres	$383,0 \pm 0,5$	$383,0 \pm 0,5$	0

D'après le tableau III.2, on remarque que seul, le plâtre résiste mal à l'abrasion, après 20 rotations, il est complètement broyé et ceci est dû à sa fragilité. Lorsqu'on ajoute des granulats tel que le sable et le gravier, on augmente notablement sa résistance à l'abrasion parce que comme on a déjà signalé que la résistance à l'abrasion dépend des propriétés mécaniques, d'élasticité et de dureté superficielle.

Concernant les bétons de plâtre renforcés de fibres, on a enregistré une excellente résistance à l'abrasion, pas de pertes de masse, comme il a été déjà signalé dans la littérature que les bétons de fibres dosés possèdent de meilleures caractéristiques d'uniformité, cela se traduit par une meilleure résistance mécanique à l'usure [23]. Les tests indiquent qu'un béton renforcé de fibres distribuées uniformément a une résistance au choc considérablement supérieure à celle d'un béton sans fibres. En plus les fibres augmentent la qualité de la surface par rapport à un béton sans fibres et réduisent la formation des trous et des irrégularités en surface, la surface alvéolaire des fibres du palmier fait aussi amortir le choc [25].

Ces résultats démontrent également une réduction des lézards et de l'endommagement des arêtes, voir fig.III.40. Nos résultats sont accord avec la littérature [26].

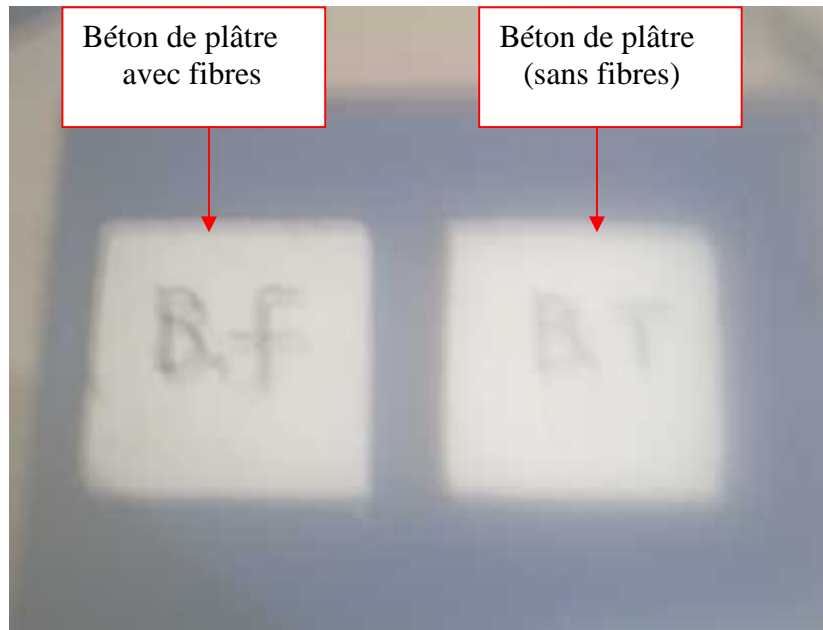


Figure III.40 : Etats de surface après l'essai d'abrasion des échantillons de béton de plâtre et le béton de plâtre renforcé par les fibres du palmier dattier.

IV.3. Résistance à l'érosion

L'érosion d'un béton est un type important d'usure que peut survenir lorsque le béton est en contact avec l'eau en mouvement; il est recommandé d'établir une distinction entre l'érosion causée par les particules solides charriées par l'eau et les dégâts provoqués par la formation et l'effondrement des cratères à la surface du béton sous l'action de l'écoulement de l'eau à grande vitesse.

Dans tous les cas, seule la qualité de la couche superficielle du béton importe; même les meilleurs bétons résisteront rarement à une érosion sévère sur les périodes prolongées.

Dans notre cas et en respectant le document technique réglementaire DTR C₂-45 de notre pays [27] et qui détaille l'essai d'érosion comme suit :

L'essai d'érosion a pour objectif d'apprécier, l'amplitude des dégradations pouvant être provoquées par la chute répétitive de la goutte d'eau, ce qui permet de vérifier l'impact des pluies sur ces matériaux.

Le dispositif est facile à réaliser (voir figure ci-dessous). Il consiste à placer l'éprouvette (matériau entier est maintenu 0,5 l / heure et la hauteur de chute de la goutte est de 50 cm ; il sera déterminé un début d'érosion sur la surface de l'éprouvette.

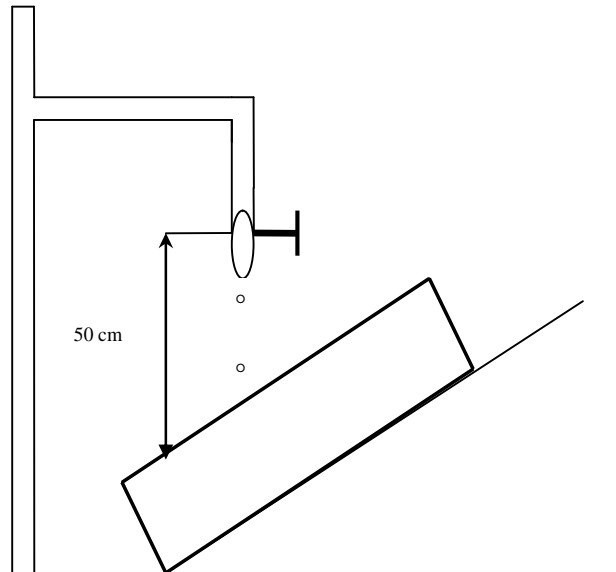


Figure III.41: Dispositif d'essai d'érosion à l'eau.

Le tableau III.3 résume les résultats de l'essai de l'érosion sur éprouvettes en béton de plâtre témoin et celui renforcé de fibres du palmier dattier de dimensions $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ après 28 jours de conservation à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Tableau III.3 : Résultats de l'essai de l'érosion.

Type d'échantillon	Masse avant l'essai d'érosion)	Masse après l'essai d'érosion)	Quantité érodé (g)
Béton de plâtre témoin (sans fibres)	2323,3 \pm 0,5	2270,0 \pm 0,5	47,00 \pm 0,50
Béton de plâtre renforcé de fibres	2268,0 \pm 0,5	2240,0 \pm 0,5	28,00 \pm 0,50

D'après les résultats obtenus lors de l'essai d'érosion et mentionnés dans le tableau III.3, on remarque bien que le béton de fibres possède une meilleure résistance d'érosion par rapport au béton sans fibre et cela d'après la quantité érodée obtenue, cela est dû au fait que les fibres augmentent généralement la qualité de surface par rapport au béton sans fibres, car elles réduisent la formation des trous et des irrégularités en surface; l'eau et la saleté donc sont absorbées plus lentement [23]. Voir fig.III.42 (a) et III.42(b). En plus on observe la dégradation de la matrice gypse en contact avec l'eau autrement la dissolution du gypse due à l'écrantage des forces d'adhésion entre les cristaux et l'apparition des gros granulats et les fibres du palmier dattier utilisées.

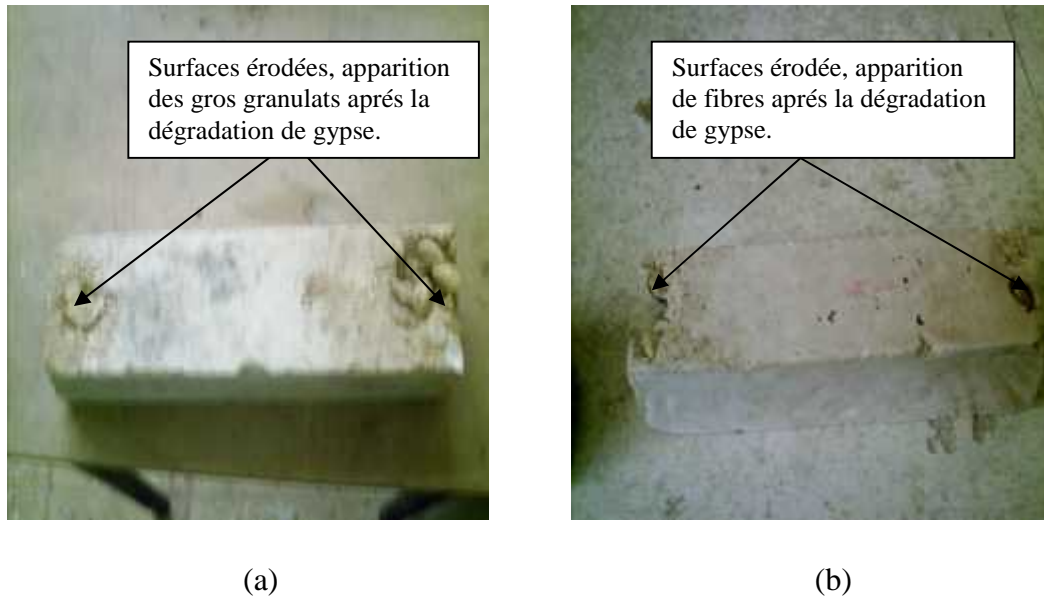


Figure III.42: Etats de surface après l'essai d'érosion des éprouvettes en béton de plâtre (a) et les éprouvettes en béton de plâtre renforcé de fibres du palmier (b).

Le DTR C₂-45[27] recommande que :

- En région humide (à forte pluviométrie), l'utilisation de ces matériaux (plâtre ou BTS) nécessite une protection au moyen d'un enduit. Par conséquent, ils ne peuvent être destinés à rester apparents.
- En zone aride (à faible pluviométrie), l'enduit de protection est facultatif.

IV.4. Résistances aux sulfates

Un élément en béton qui subit des cycles de chargement et de déchargement ou de mouillage et de séchage, par exemple, peut se fissurer à cause de ces cycles. Des agents agressifs extérieurs pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées. Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, à l'état sec, ces roches ne présentent aucune agressivité envers le béton. Ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton.

Pour la détermination de la résistance aux sulfates, des éprouvettes de plâtre, béton de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier dattier ont été confectionnées. Les éprouvettes sont cylindriques de $90 \times 40 \text{ mm}^2$ en s'appuyant sur des travaux sur des composites à base de plâtre [21]. Elles sont conservées à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours ensuite elles sont immergées dans une solution de 5% de sulfate de magnésium MgSO_4 . Tous les 30 jours, la solution est renouvelée et la résistance aux sulfates est évaluée par la détermination de la variation du volume et l'observation de l'état de surface. Le tableau III.4 résume les résultats obtenus lors de l'essai de résistance aux sulfates de magnésium.

Tableau III.4 : Résultats de l'essai de résistance aux sulfates de magnésium.

Echantillons	Plâtre	Béton de plâtre sans fibres	Béton de plâtre avec fibres
Variation du volume V (%) après 7 jours	5,11	8	7,89
Variation du volume V (%) après 14 jours	8,66	16,81	11,10
Aspect superficiel	Dégradation de la surface supérieure de l'échantillon	Apparition des granulats	Apparition des granulats et des fibres

La figure III.43 montre l'état de surface des échantillons conservés pendant deux semaines dans la solution $MgSO_4$.



Figure III.43 : Etats de surface des échantillons immergés pendant deux semaines dans la solution $MgSO_4$.

La dégradation des échantillons conservées dans la solution $MgSO_4$, valide l'hypothèse de Kato sur l'influence de la tension superficielle des liquides, plus la tension superficielle est élevée plus la dégradation est importante et les liaisons entre les cristaux sont touchées d'où une diminution des propriétés mécaniques dans le temps.

IV.4.1. Interprétation des résultats de la résistance aux sulfates par DRX

D'après le diffractogramme 1 (Annexe II), on remarque la présence des pics de gypse très intenses et peu d'anhydrite $CaSO_4$ insoluble et la présence de trois composés à base de magnésium tels que la brucite $Mg(OH)_2$, dolomite $CaMg(CO_3)$ et l'hexahydrate, synthétique $Mg(SO_4)(H_2O)$ qui est le résultat de la réaction chimique entre la matrice béton de plâtre et le milieu sulfate.

IV.4.2. Interprétation des résultats de la résistance aux sulfates par MEB équipé d'une microanalyse

Si on compare la figure III. 44, échantillon immergé dans la solution de $MgSO_4$ avec la figure III.45 et qui montre une vue générale sur la matrice du béton de plâtre conservée à l'air ambiant du laboratoire, on peut constater qu'avec une immersion d'une semaine dans la solution $MgSO_4$, on a pu modifier et désordonner la structure et l'orientation des cristaux du gypse et par microanalyse, on a pu constater, si les cristaux ont la même forme, les pics de diffraction sont en équilibre et si les cristaux n'ont pas la même forme, il y'a un déséquilibre dans les pics. Fig. III.46.

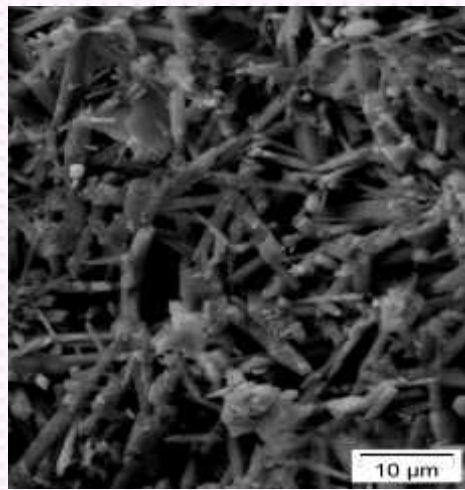


Figure III.44: L'attaque de $MgSO_4$ de la matrice gypse pendant une semaine.

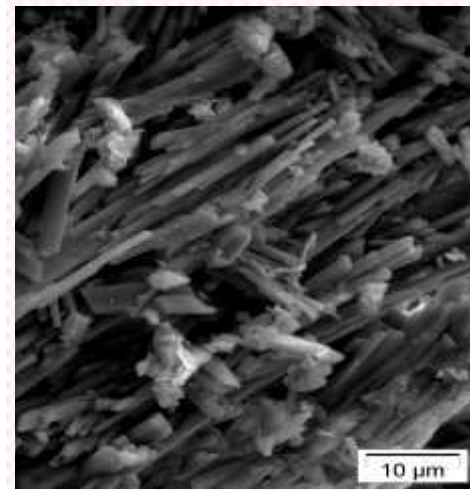


Figure III.45: Vue générale sur la matrice conservée à l'air ambiant du labo.

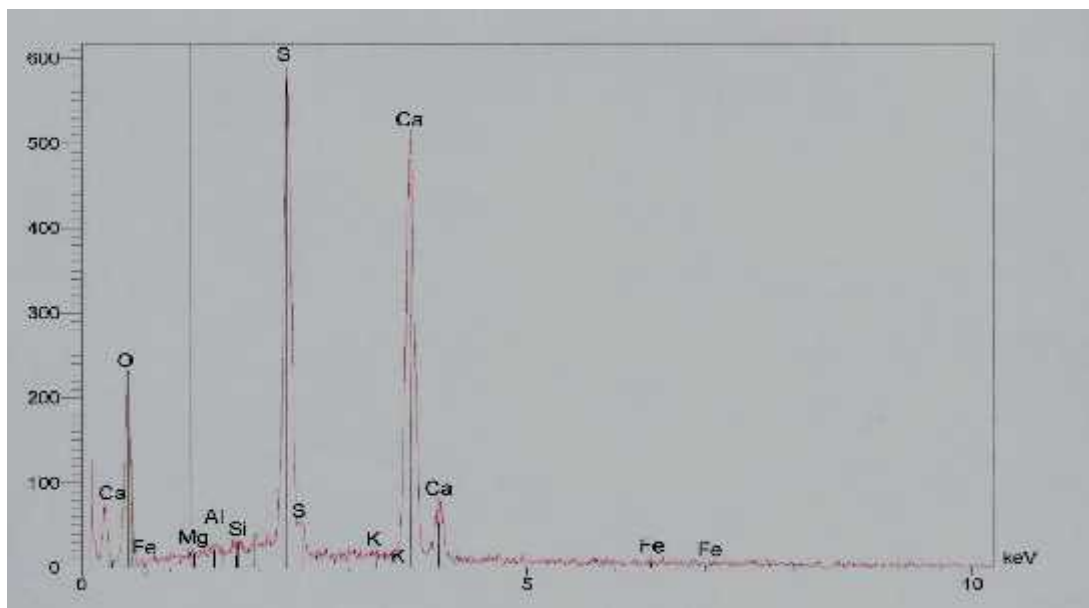


Figure III.46 : Microanalyse de l'échantillon du béton de plâtre renforcé de fibres, conservé une semaine dans la solution $MgSO_4$.

IV.5. Résistance aux acides

Il est bien connu qu'il ya des attaques acides des bétons et de nombreux matériaux de construction qui font partie du paysage urbain et du patrimoine culturel [28, 29,30]. Les acides peuvent provenir des sources extérieures du béton, telles que la terre autour d'une structure du béton, les eaux souterraines, l'eau de pluie et de polluants dans l'air. Certains granulats y compris siliceux (contenant de la silice) ne sont pas attaqués par l'acide, mais les granulats calcaire (contenant du calcium) réagissent facilement avec des acides. De cette façon, les granulats calcaires protègent seulement le béton. Les acides attaquent la pate et les granulats également, qui par processus de diffusion, réduit l'endommagement de la pâte. Les pluies acides (pH souvent compris entre 4 et 4,5) peuvent attaquer la surface du béton, ordinairement sans effet sur le comportement des structures du béton exposé. Des précautions spéciales doivent être prises en compte lors de la réalisation des constructions dans les lieux submergés [31]. Le renouvellement continu d'acide à PH < 4 est considéré très agressif pour les bétons enterré, comme les tuyaux, les bétons exposé à un liquide dont le pH < 3 doit être protégé de la même manière que le béton exposé à des solutions acides diluées [31].

La résistance aux acides dans cette étude a été réalisée en s'appuyant sur les travaux faites sur la durabilité des composites en plâtre [21].

L'attaque par l'acide des bétons de plâtre renforcés de fibres du palmier à été déterminée sur des éprouvettes cubiques de 100×100×100 cm³ pour l'essai de compression et des éprouvettes 100 ×100×500 cm³ pour l'essai de flexion 4 points.

Après 28 jours de cure dans les conditions (20 ±2 ° C et 65 % d'humidité, les éprouvettes sont conservées dans deux environnements :

- L'eau déminéralisée comme référence.
- Dans une solution de 1% de H₂SO₄.

Les solutions ont été renouvelées chaque 15 jours pendant 6 mois. La résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette.

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad \text{III-4}$$

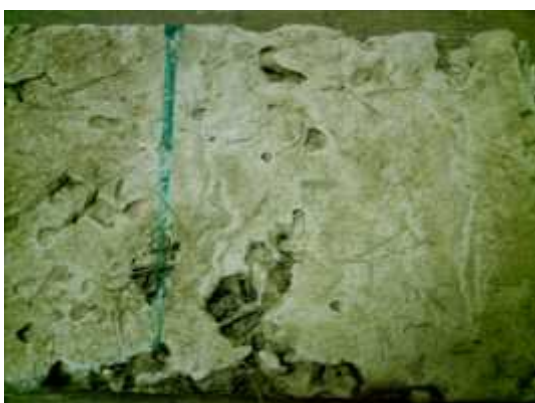
Avec M₁ et M₂ les masses des éprouvettes avant et après l'immersion.

Les résistances à la compression et à la flexion 4 points ont été aussi déterminées. Le tableau III.5 et les figures ci-dessous résument les résultats de cette étude.

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques et la perte de masse pour les bétons de plâtre renforcés de fibres du palmier dattier pour des éprouvettes conservées continuellement dans l'eau et dans l'acide sulfurique.

Echantillons / Propriétés	Résistance à la compression en (MPa)	Résistance à la flexion en (MPa)	Perte de masse (%)
Béton de plâtre renforcé de fibres avant l'immersion	26,38 ± 0,32	3,88 ± 1,80	-
Béton de plâtre renforcés de fibres immergé 6 mois dans l'eau	25,00 ± 2,30	3,90 ± 1,05	9,03
Béton de plâtre renforcé de fibres immergé 6 mois dans une solution de l'acide sulfurique	26,80 ± 3,05	3,96 ± 0,66	7,02

D'après le tableau III.5, on remarque qu'il n'ya pas une variation significative des propriétés mécaniques des éprouvettes conservées dans les deux milieux (eau, acide sulfurique), cela confirme d'après la bibliographie que la solubilité du gypse dans une solution n'est pas sans doute l'explication de la chute de résistance mécanique du plâtre [32], et que la stabilisation des propriétés mécanique obtenues, ça peut être due à la présence de la chaux aérienne utilisée comme retardateur de prise. La figure III.47a montre la dégradation considérable des bétons de plâtre renforcés de fibres et conservés continuellement dans l'eau par contre la figure III.47b présente qu'il n'ya pas une dégradation superficielle de la surface des éprouvettes conservées dans la solution H₂SO₄.



(a)



(b)

Figure III.47 : Etats de surface des échantillons après conservation, (a) 6 mois dans l'eau (b) 6 mois dans la solution de 1% de H₂SO₄.

IV.6. Résistance aux efflorescences

Les efflorescences sont des cristallisations de sels solubles apparaissant à la surface ou au voisinage des maçonneries et des enduits. Le point de cristallisation dépend principalement des propriétés capillaires de matériaux et de leur teneur en humidité. Celle-ci favorise le transport des sels solubles vers la surface. Les figures ci-dessous montrent le phénomène d'efflorescence sur le plâtre.

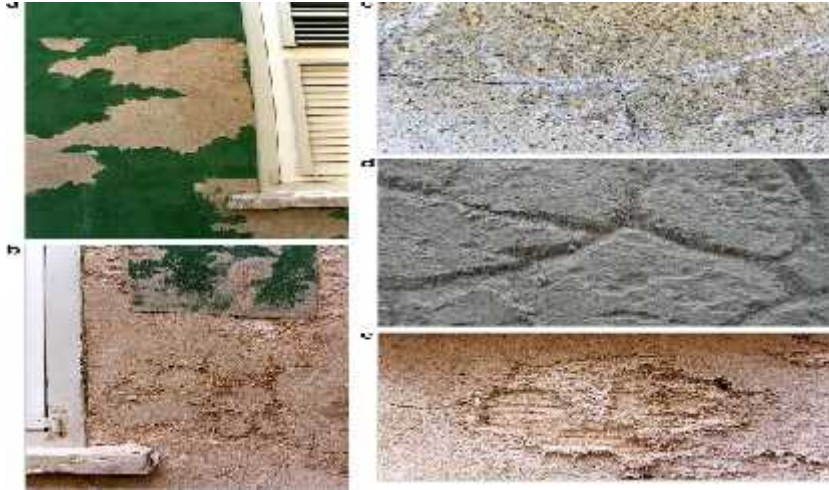


Figure III.48 : a-e Dégradation du plâtre due à l'effet de sel [33].



Figure III.49 : Effet des sels et des eaux de pluies sur la construction (Zaouïa de Ghemar) [34].

Pour notre cas, nous avons étudié de quelle manière le transport et l'accumulation des sels dans le plâtre, béton de plâtre et béton de plâtre renforcés de fibres du palmier dépend du matériau de construction sous-jacent. Pour cela on a développé un test pour simuler la cristallisation des sels solubles dans les échantillons élaborés, appliqués sur une ancienne maçonnerie saturée en sel [21]. Des briques ont été récupérées des anciennes constructions, elles

sont composées, d'après l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X de deux phases telles que :

- Le quartz SiO_2 .
- La Berlinite AlPO_4 .

Les anciennes briques ont été immergées dans la solution de NaCl pendant trois jours. Ensuite les trois échantillons de plâtre, béton de plâtre et béton de plâtre renforcé par les fibres du palmier de dimensions $4 \times 9 \times 15 \text{ cm}^3$ ont été appliqués sur les briques immergées dans l'eau et soumises aux cycles suivants :

1. Appliquer sur les briques en sol saturées en NaCl et cela pendant 24 heures ;
2. Sécher les échantillons pendant 48 heures à 23°C et 50% d'humidité relative ;
3. La procédure a été répétée pendant 28 jours et la poudre résultante formée sur la surface des 3 échantillons (sel+mortier dégradé) a été pesée de la partie inférieure de l'échantillon (à proximité des briques).

Le deuxième consiste à mesurer la conductivité spécifique des échantillons élaborés. On commence par la définition de la conductance spécifique, ensuite on passe à la présentation de la conduite d'essai.

IV.6.1. Définition de la conductance spécifique

La conductivité spécifique inverse de la résistance, mesurée dans des conditions spécifiées entre les faces opposées d'un cube unité (de dimensions déterminées) d'une solution aqueuses. Pour l'examen de la qualité de l'eau, celle-ci est souvent appelé (Conductivité électrique) et peut être utilisée comme mesurage de la concentration des solubles ionisable présents dans l'échantillon (Définition tirée de L'ISO 6107/2). Elle est exprimée en siemens par mètre.

IV.6.2. Conduite d'essai

La conductivité spécifique est mesurée à l'aide d'un conductimètre portable multi gamme étanche HI8633 sur les échantillons soumis à l'essai précédent, le dispositif d'essai est présenté sur la figure ci-dessous.



Figure III.50 : Essai de mesure de la conductivité spécifique sur l'échantillon béton de plâtre (sans fibres).

IV.6.3. Présentation et interprétation des résultats

Les résultats de l'essai de la mesure de la quantité dégradé et la conductivité spécifique sont illustrés sur le tableau et les figures ci-dessous.

Tableau III.6 : Valeurs de la quantité de mortier dégradé+sel, conductivité spécifique et l'état de surface des échantillons testés.

Type d'échantillon	Quantité de mortier dégradé + Sel en (g)	Conductivité spécifique (milli siemens /seconde)	Etat de surface
Plâtre	3.05±0,05	4,96	Pas d'altération
Béton de plâtre témoin (sans fibres)	4,3 ±0,05	8,22	Pas d'altération
Béton de plâtre renforcé de fibres du palmier dattier	0,5 ±0,05	2,36	Pas d'altération

Les Figures III.51 et III.52 montrent l'état de surface des échantillons de plâtre, béton de plâtre et béton de plâtre renforcé de fibres du palmier et cela avant et après l'essai d'efflorescence. On remarque, qu'il n'ya pas de dégradation sur les surfaces qui ont été en contact avec les anciennes briques saturées en NaCl (1mol/litre).

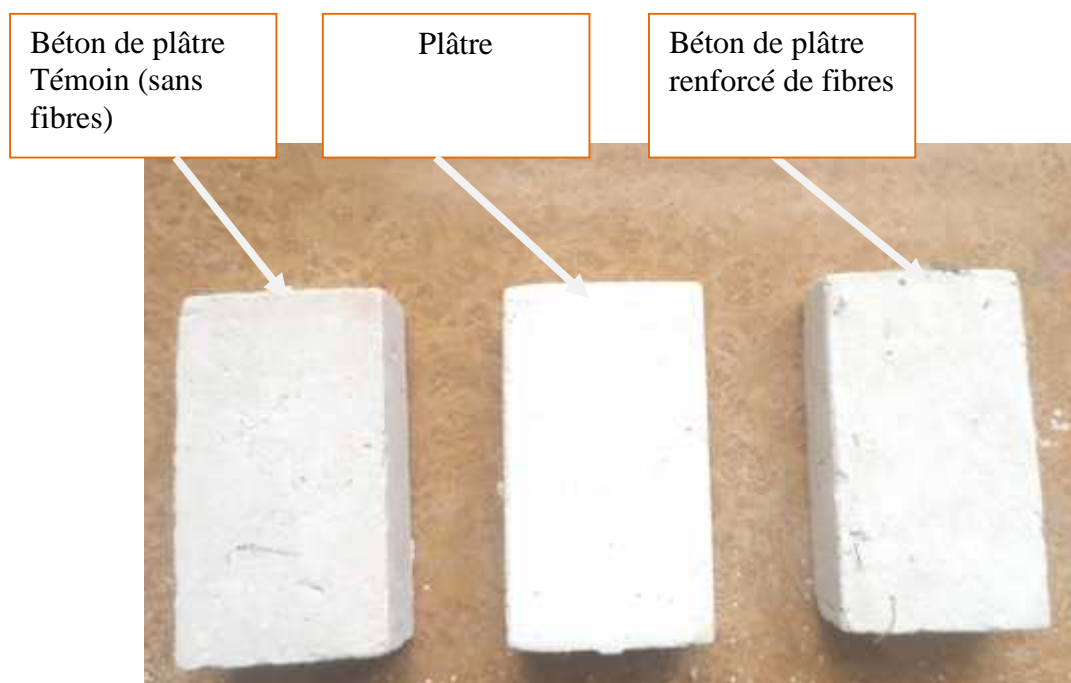


Figure III.51 : Etats de surface des échantillons avant l'essai d'efflorescence.

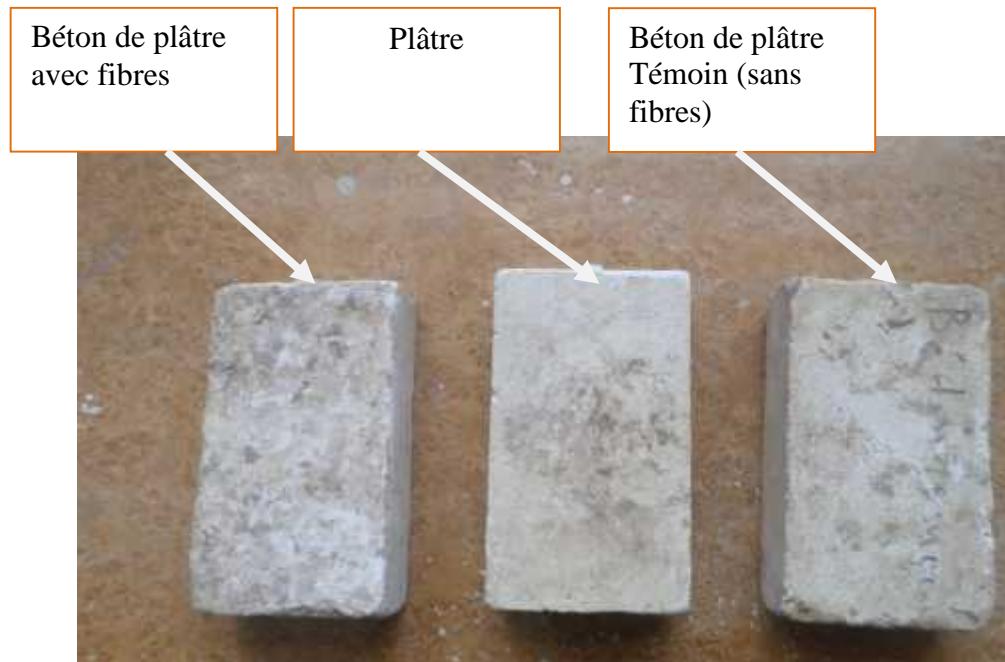


Figure III.52 : Etats de surface des échantillons après l'essai d'efflorescence.

D'après le tableau III.6 , on Remarque que l'échantillon qui possède une performance vis-à-vis de ce phénomène, est le béton de plâtre renforcé avec les fibres du palmier parce qu'une faible quantité de matière dégradée et de sel a été récupérée à la fin de cycle (28 jours d'exposition) et généralement, on peut souligner des dégradations lorsque la pression produite par la cristallisation du sel est supérieure à la résistance mécanique du matériau et la pression qui peut être développée dépend de la taille des pores. En outre une faible conductivité (relié à la concentration de chlorures) a été mesurée. Cet effet pourrait être lié à une capacité inférieure de chlorures de passer à travers le spécimen et une porosité totale inférieure de celle du mortier. On peut dire aussi qu'il y'a une relation directe entre la conductivité et la quantité de la matière récupéré car lorsque la conductivité augmente la quantité récupérée est importante. On peut signaler aussi que les fibres du palmier sont capables d'absorber de la solution saline ainsi pré-desservant la matrice et limitant ainsi les phénomènes de dégradation. Ce dernier effet, qui augmente la durabilité en milieu salin et pourrait se réduire, si les fibres ont tendance à se gonfler excessivement. Nos résultats sont accord avec des travaux sur des composites à base de sisal et de kenaf dans le milieu salin [35].

Ce point à été aussi confirmée par l'examen de l'échantillon par MEB équipé d'une microanalyse que le dépôt de l'halite NaCl a été détecté sur la surface de la fibre du palmier (Fig.III.53) et non pas sur la matrice béton de plâtre et cela est dû à l'absorption de la solution NaCl par les alvéoles existantes sur sa surface. Fig. III.54.

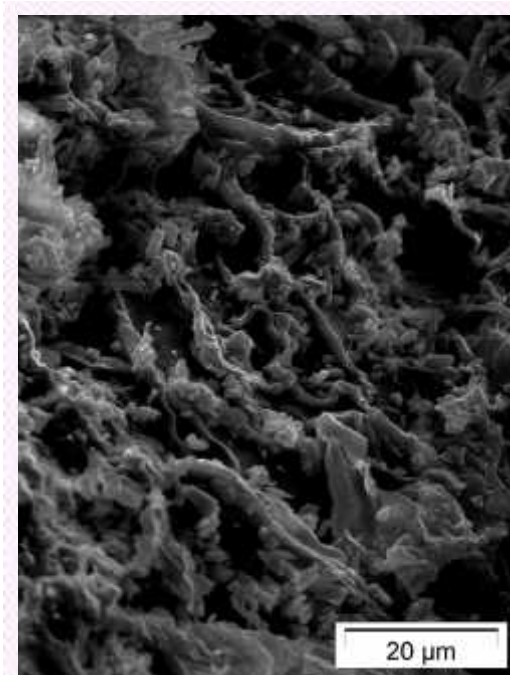


Figure III.53 : Dépôt de chlore de sodium sur la fibre du palmier.

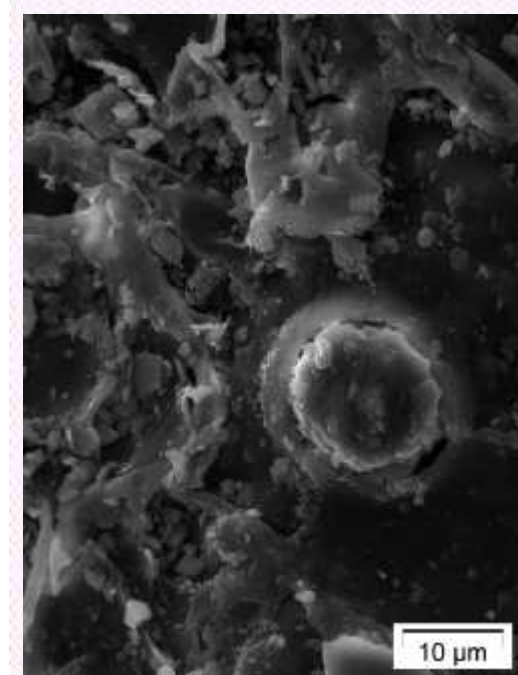


Figure III.54: Pénétration du gypse dans l'alvéole de la fibre du palmier.

Concernant l'échantillon de plâtre seul, on n'a pas remarqué des dégradations significatives sur sa surface et qui sont dues à l'accumulation des sels, cela peut être attribué tout d'abord à l'ajout de la chaux aérienne qui a étanchéifié la microstructure interne du plâtre, ce qui a été aussi recommandé par la littérature [22], vu son rôle important dans la protection du plâtre. En plus les pores de substrat à base de quartz et de berlinite sont plus petits que ceux du plâtre c'est pour ça une quantité importante de sel a été cristallisé sur le substrat lui-même. En pratique le transport et l'accumulation des sels sont influencés par beaucoup de paramètres tels que l'augmentation de la température extérieure ou la vitesse de l'air et aussi avec la diminution de l'humidité relative de l'environnement [36], et même sans connaître les quantités de sel ou de l'eau dans le plâtre et le substrat, il est possible de donner une explication et une estimation du nombre d'efficacité à l'aide de la taille de pores cumulés des deux matériaux.

En fin pour l'échantillon du béton de plâtre sans fibres, on a détecté une quantité importante de sel + mortier dégradé sur sa surface et une conductivité spécifique supérieure à celle obtenue pour le béton de plâtre renforcés de fibres, chose qui a été confirmée par microanalyse de la surface en contact avec le substrat (surface de l'échantillon).Fig.3, annexe II et cela peut être traduit par les pores de l'échantillon qui sont plus petits que le substrat s'est à cause de ça que la majorité de sel a été disparu du substrat et se concentre sur l'échantillon du béton de plâtre, chose aussi confirmée par l'analyse minéralogique de la poudre de la surface de l'échantillon(fig.2, annexe II).

V. Conclusions

L'étude de la durabilité des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier dattier, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les propriétés mécaniques évoluent dans le temps pour les éprouvettes conservées à l'air ambiant du laboratoire, ceci est due au phénomène de carbonatation et on a pu vérifier la présence de la calcite par différentes techniques telles que ATD, DRX, MEB.

Le gain de résistance à la compression pour le béton de plâtre est de l'ordre de 139,31 % et de 42,26 % pour le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier. Concernant la résistance à la flexion, on a enregistré un gain de 335,25 %, pour le béton de plâtre et 5,15 % pour le béton de plâtre renforcé de fibres.

- La perte des propriétés mécaniques en ambiance humide et des cycles de séchage-humidification a été attribuée à la dégradation du gypse et on a pu détecter du gypse dégradé par MEB et des pics moins intenses du gypse par ATD et DRX.
- La perte de résistance à la compression pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité est de 2,38 % pour le béton de plâtre et de 4,21 % pour le béton de plâtre renforcé de fibres. Concernant les éprouvettes soumises aux cycles séchage-humidification, elle est de l'ordre de 2,22 % pour le béton de plâtre et de 3% pour le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier.
- La perte de résistance à la flexion pour les éprouvettes conservées dans une ambiance humide est de l'ordre de 60,56 % pour le béton de plâtre et de 48,19 pour le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier. Concernant les éprouvettes soumises aux cycles séchage-humidification, elle est de l'ordre de 56,35% pour le béton de plâtre et de 43,04 % pour le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier.
- La résistance au gel –dégel est très bonne et elle est d'autant meilleure pour le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier.
- Une excellente résistance à l'abrasion a été trouvée pour le béton de plâtre et celui renforcé par les fibres du palmier.
- Le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier possède une meilleure résistance à l'érosion et cela par la faible quantité érodée enregistrée par rapport au béton de plâtre sans fibres.
- Une exposition d'une semaine au $MgSO_4$ a pu modifier et désordonner la structure interne de la matrice béton de plâtre.
- L'acide sulfurique n'a pas modifié les propriétés mécaniques du béton de plâtre renforcé de fibres.
- Le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier offre une meilleure résistance aux efflorescences.

V.I. Bibliographies

- [1] **Genea T., Yaziciogly S.,** The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Construction and building materials*, vol. 42, 2007, pp. 3080-3085.
- [2] **Djoudi A.,** Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2002, P.118.
- [3] **Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Kadri E.H., Debicki G.,** Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. *International journal of physical sciences*, vol.7 (21), 2012, pp. 2845-2853.
- [4] **A. C. I. Committee 544,** State of the art report on fiber reinforced concrete. A.C.I, U.S.A, 1982.
- [5] **Norme Européenne NF EN ISO 123906-4.** Essais pour béton durci-partie 4 : Résistance en compression – Caractéristiques des machines d’essai AFNOR, France, 2000, p.19.
- [6] **NFP18-409.,** Béton avec fibres métalliques. Essai de flexion. AFNOR, France, 1993, p.8.
- [7] **Coquard P.,** Résistances mécaniques des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat. Université d’Aix-Marseille, 1992, P.100.
- [8] **Dupain R., Lancho R., Saint Arroman J.C.,** Granulats, sols, ciments et bétons-caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoires. Collection Capliez. Edition casteilla, vol.235, Paris, 1995.
- [9] **Badens E.,** Etude de l’absorption de l’eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques de plâtre pris et additive. Thèse de doctorat, Université d’Aix-Marseille, 1997, P.110.
- [10] **Mokhtari F.,** Contribution à l’étude des composites à base de liants pouzzolaniques et de bambou. Thèse de doctorat, INSA du Lyon, 1991. P.161.
- [11] **Khenfer MM, Morlier P.** Caractérisation et microstructure des ciments renforcés de cellulose . *Buletin des laboratoires des ponts et chaussées* 224, Réf 4236, 2000, pp. 49-58.
- [12] **Ghorab H.Y, Kishar E.A.,** Studies on stability of the calcium sulpho aluminate hydrate part : Effect of temperature on the stability of ettringite in pure water. *Journal of cement and concrete research* 75(1), 1985, pp.93-99.
- [13] **Singh M., Garg M.,** Fibre reinforced gypsum binder composite; its microstructure and durability. *Journal of materials and structure*, vol.33, 2000, pp. 525-528.
- [14] **Toledo F.R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavani K.,** Durability of Alkali –Sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Journal of cement and concrete composite*, vol.22, 2000, PP. 127-143.

- [15] **Sharman WR, Vautier BP.** Durability studies on wood fibre reinforced cement sheets. Third international symposium on development in fibres reinforced cement and concrete, vol.2, 1986. pp.255-275.
- [20] **Toledo RD., Ghavami K., England G., Scrivener K.,** Development of vegetable fibres-mortar composite of improved durability. Cement Concrete Research, vol. 25, 2003, pp.185–196.
- [17] **Coutts RSP.,** Eucalyptus wood fibre reinforced cement. Journal of Materials Science Letters, 1987, 955-7.
- [18] **Anastasiou M., Hasapis Th., Zorba T., Palvidou E., Chrissafis K., Pavaskevopoulos KM.,** TG – DTA and FTIR analyses of plaster from Byzantine monuments in balakan region (comparative study). Journal of thermal analyses and calorimetry, vol.84, 2006, pp.27-32.
- [19] **Slaoui S., Bounahmidi T.,** Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de décomposition de la pierre à chaux. Communication, Compte rendu, Chimie, vol. 7, 2004, pp.559-568.
- [20] **Ghorab H.Y., Zayed A.,** Advanced methods in the quality of concrete materials. Proceeding of the 8th international conference on concrete technology in developing countries Hammamat-Tunisia, 8-9 December 2007, pp. 381-390.
- [21] **Cerulli T., Pistolesi C., Maltese C., Salvioni D.,** Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster, Cement and Concrete Research, vol.33, 2003, pp. 1375–1383.
- [22] **Debouci Z., Teggour. H., Chili T.,** Rôle de la chaux dans les protections extérieures en plâtre. Séminaire pour la construction en plâtre, C.N.E.R.I.B, 4, 5, 6 Décembre 1989.
- [23] **[http://www.themeroil.com.](http://www.themeroil.com)** Fibres de polypropylènes pour mortiers, plâtre et béton.
- [24] **Neville Adam M.,** Propriétés des bétons, Edition Eyrolles, 2000.
- [25] **Astanojlovic –Davidovica A.,** Matériaux biodégradables à base d’amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l’emballage alimentaire. Thèse de doctorat. Université du Sud Toulon-Var 2006, P.183.
- [26] **Mattone R.,** Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique, Cement & Concrete Composites, vol.27, 2005, pp. 611–616.
- [27] **D.T.R.C2-45.,** Règles de conception et de calcul des maçonneries. 2^{ème} Edition, CNERIB, Algérie, 2005.
- [28] **Brown PW., Clifton JR.,** Mechanism of deterioration in cement –based materials and in lime mortar. Durability of building materials 5, 1998, pp.409-420.
- [29] **Martinez-Ramirez S., Puertas F., Blanco- Varela M.T., Thompson GE., Almendros P.,** Behavior of repair lime mortars by wet deposition process. Cement and Concrete Research 28, 1998, pp.221-229.

- [30] **Okochi H., Kameda H., Hasegawa S., Saito N., Kubota K., Igawa M.,** Detrioration of concrete structures by acid deposition of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens. *Atmospheric Environment* 34, 2000, pp.2937-2945.
- [31] **Živica V., Bajza.,** Acidic attack of cement based materials –A review, Part 2. Principle of acidic attack, *Construction and Building Materials* 16, 2002, pp.215-222.
- [32] **Meille, S.,** Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure, Thèse de doctorat de l'INSA Lyon, France, 2001, p. 219.
- [33] **Groot C., Hees R.B., Wijffels T.,** Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates. *Construction and building materials* 23(5), 2009, pp.1743-1750.
- [34] **Ghoulam Allah S.,** Etude des caractéristiques des matériaux de construction de zaouïa Tidjania de Ghemar, Oued Souf. Préparation d'un mortier de plâtre pour restauration. Institut d'archéologie, Université d'Alger 2, 2011. (Document en arabe). P.143.
- [35] **Di Bella G., Fiore V., Galtieri G., Borsellino C. Valenza A.,** Effects of natural fibers reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. polypropylene). *Construction and building materials* 58, 2014, pp.159-165.
- [36] **Petković J., Huinink H.P., Pel L., Kopinga K. Van Hees R.P.J.,** Salt transport in plaster/ substrate layers, *Materials and structures*, vol. 40, 2007, pp.475-490.

CHAPITRE IV

*Etude du comportement thermique des
bétons de plâtre renforcés par des fibres du
palmier dattier*

Chapitre IV : Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

I. Introduction

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existants dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels : la conductivité et la diffusivité a .

Ce chapitre dresse dans un premier temps un bilan rapide des différents modes classiques de transferts de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sans transfert de masse. Il vise à décrire le comportement thermique des bétons de plâtre et ceux renforcés avec les fibres du palmier dattier. Il confronte les résultats de campagnes de mesures expérimentales avec un modèle, en considérant notre composite de type biphasique (Modèle de Assaad) et d'une modélisation par homogénéisation auto cohérente (HAC), un motif générique de type inclusion tri composite est testé. Cette première phase conduit à un modèle prédictif fiable de la conductivité thermique sèche du matériau en fonction de sa formulation et de sa densité.

II. Nécessité de l'isolation thermique

Les deux critères nécessaires de la conception thermique des bâtiments sont la protection des occupants d'une manière automatique et passive, des facteurs climatiques pluies, vent, rayonnement, chaud ou froid de diverses parois, et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la réglementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort défini par le maître d'ouvrage. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de bénéficier d'un meilleur confort de vie.

II.1. Principe

Dès que deux éléments en contact possèdent des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que leurs températures deviennent identiques. Le but de l'isolation est de freiner cet échange de thermique, et de permettre ainsi de garder les parois de l'habitation à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur. La répartition des déperditions dans une habitation non isolée est illustrée par la figure IV.1.

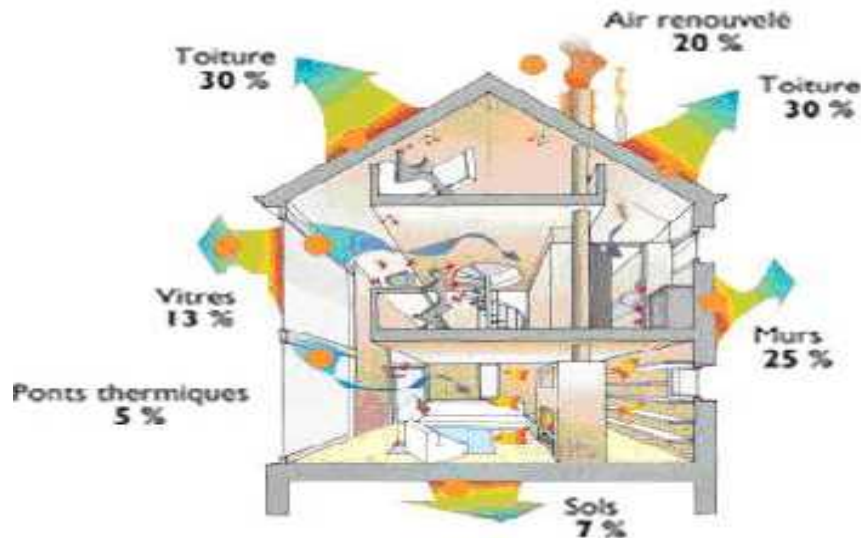


Figure IV.1: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.

On compte approximativement des valeurs de déperditions thermiques de l'ordre de :

- Toits : 30 %;
- Murs : 25 %;
- Renouvellement d'air : 20 %;
- Portes fenêtres : 13 %;
- Sols : 7 %;
- Ponts thermiques : 5 %.

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60%.

II.2. Isolation des parois

Il existe trois types d'isolation des parois :

II.2.1. Isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en oeuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter.

II.2.2. Isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas

diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique.

II.2.3. Isolation intégrée au matériau porteur

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable.

III. Transfert de chaleur

III.1. Généralités

Le transfert de chaleur correspond à une transmission de l'énergie contenue dans une zone vers une autre, ce transfert a lieu sous trois formes : la conduction sous l'effet d'un gradient de température, la convection et le rayonnement.

La conduction désigne le transfert d'énergie par contact sans déplacement global de matière. Ce sont des porteurs élémentaires (molécules, électrons ou photons) qui véhiculent l'énergie. Ce mode de transfert est très étudié car il dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants. La conductivité est donc une valeur caractéristique intrinsèque du matériau.

La convection caractérise le transfert de chaleur entre matrice solide immobile et fluide qui s'écoule le long de la paroi solide, ces deux éléments étant à des températures différentes. On distingue la convection naturelle et la convection forcée. La convection naturelle recouvre les écoulements de fluides interstitiels, induits par les variations de masse volumique due aux différences de température. La convection forcée quant à elle, recouvre les cas où le fluide a un mouvement donc une vitesse de déplacement imposée par une cause d'origine mécanique (pompage...). La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection précédemment cités.

Le rayonnement enfin est dû aux émissions d'ondes électromagnétiques. La chaleur se transmet entre le corps émetteur qui joue le rôle de source et le corps récepteur qui emmagasine l'énergie sans aucun support matériel entre les deux matériaux. Compte tenu de la température à laquelle les tests sont réalisés $T=20^{\circ}\text{C}$, le rayonnement sera négligé vis-à-vis des phénomènes de conduction et de convection.

III.2. Différents paramètres thermiques

III.2.1. Conductivité thermique

La théorie de la conduction repose sur la relation proposée par Joseph Fourier en 1822, qui exprime que la densité de flux de chaleur Q est proportionnelle au gradient de température, et que la chaleur de la source chaude à la source froide, en tendant à diminuer l'amplitude du gradient :

$$Q = - \text{grad } T \quad (\text{IV-1})$$

Le coefficient de proportionnalité s'appelle la conductivité thermique du matériau en (W/mK), c'est une constante thermo-physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction.

III.2.2. Chaleur spécifique volumique

La chaleur spécifique volumique notée C en ($J.K^{-1}m^{-3}$) traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de l'énergie calorifique. Ce stockage d'énergie se manifeste, par exemple, par l'augmentation de la température du matériau. La chaleur spécifique volumique ne dépend pas de la température et de la composition du milieu considéré.

III.2.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique a en ($m^2.s^{-1}$), représente la vitesse à laquelle les changements de température peuvent avoir lieu dans une masse du béton, elle représente donc un indice de la facilité avec laquelle un béton peut subir des changements de température. La diffusivité est liée à la conductivité thermique par l'équation suivante :

$$a = \lambda / C \quad (\text{IV-2})$$

Où C est la chaleur spécifique massique et ρ est la masse volumique du béton.

III.2.4. Effusivité thermique

L'effusivité thermique b en $Jm^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$ mesure la propriété qu'a un corps d'arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact. Physiquement, elle représente la capacité d'un milieu à résister à une perturbation thermique. Elle caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Considérons un matériau semi-infini porté à une température uniforme T_0 . La face de ce matériau, située en $X=0$, est portée brusquement à une température constante T_1 . La résolution de l'équation de la chaleur permet le calcul de la densité de flux qui traverse le matériau en $X=0$; on obtient :

$$q = (T_1 - T_0) \left(\frac{C}{t} \right)^{1/2} \quad (\text{IV-3})$$

La densité de flux est proportionnelle au paramètre b :

$$b = \left(\frac{C}{t} \right)^{1/2} \quad (\text{IV-4})$$

Puisque l'effusivité intervient lors d'un contact thermique entre deux milieux, cette grandeur joue un rôle important dans l'étude en régime variable des parois multicouches.

D'une manière générale, on montre que le corps qui a la plus grande effusivité tend à imposer sa température.

III.2.5. Propriétés thermo-physiques effectives

Les propriétés thermo-physiques effectives ou équivalentes que l'on mesure sur des matériaux sont alors qualifiées d'apparentes [1], car elles résultent de la combinaison de la proportion volumique des constituants occupée par chaque phase, de leurs propriétés thermo-physiques, de l'influence des conditions thermiques et hydriques sur l'état de sa porosité et aussi du mode d'agencement des différents constituants les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire de la microstructure du milieu. Le tableau (IV.1) présente les propriétés thermo-physiques de quelques matériaux de construction [2].

Tableau IV.1 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [2].

	(kg / m ³)	Porosité	C (J/ kg.K)	(W/mK)	a (m ² .s ⁻¹)
Air	1,2	-	4180	0,026	2,2 E-05
Eau liquide	998	-	-	0,602	1,4 E-07
Styrodur	50	-	-	0,033	-
Cuivre	8900	-	390	400	1,2E-04
Contre Plaqué	700	-	1500	0,12	1,1 E-07
Béton hydraulique	2300	8 %	1050	1,80 à 2,00	7,4 à 8,2E-05
Béton argile expansé	1600	36 %	900	0,46	3,2 E-07
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82 %	880	0,16 à 0,33	5,2 à 5,8E-07
Béton de bois	600 à 900	52 %	1200	0,09 à 0,30	1,2 à 2,8E-07
Brique	1800	-	860	1,15	7,4E-07

IV. Méthodes de mesures de la conductivité thermique

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation, fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière. Le choix d'une méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau- précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte :

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini;
- Le type de régime thermique car il peut être permanent, transitoire, ou quasi établi;
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...);
- Les dimensions et les rapports de dimensions;

- La simplicité de la méthode;
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres. Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique.

Ce paragraphe souligne certaines méthodes dédiées à la mesure de la conductivité thermique d'un milieu. Afin de classer les méthodes de mesures, les définitions de l'excitation et le temps temporel s'imposent. Ces derniers paramètres nous permettent de distinguer les méthodes entre elles [3]. En première analyse, l'excitation repose sur deux méthodes : Les méthodes photo - thermiques [4], et les méthodes électrothermiques.

IV.1. Méthodes de mesure en régime permanent

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [5]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu. Le champ d'application de ces méthodes est limité. Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude gardée [6], la méthode de la barre [7], la méthode des boîtes [8], et la méthode du flux radial [9]. D'une façon générale, ces méthodes de mesure présentent des difficultés expérimentales tel que :

- L'existence de résistance de contact
- Les fuites axiales et radiales.
- Les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface.

Ces méthodes de mesure ne sont pas destinées à mesurer toutes les grandeurs physiques. En effet, avec ces méthodes seules la conductivité thermique et la résistance de contact sont mesurées, limitant ainsi leurs champs d'application.

IV.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure IV.2. Dans la méthode de la plaque chaude gardée, on utilise une garde active pour minimiser les pertes latérales aux extrémités de l'échantillon (conditions aux limites). Le transfert est unidirectionnel et assuré par un enroulement résistif. A l'aide de thermocouples disposés de part et d'autre de l'échantillon étudié, la température est ainsi mesurée [10].

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T1 - T2 = R \quad \text{(IV-5)}$$

R: Résistance thermique.

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants. Ce type de méthode est difficile à mettre en oeuvre et pose beaucoup de problèmes d'ordre expérimentaux comme :

- Atteindre le régime permanent qui est particulièrement long et peut atteindre une durée de 24h;
- Obtenir un flux unidirectionnel dans l'échantillon;
- Mesure de ce flux et les températures avec précision.

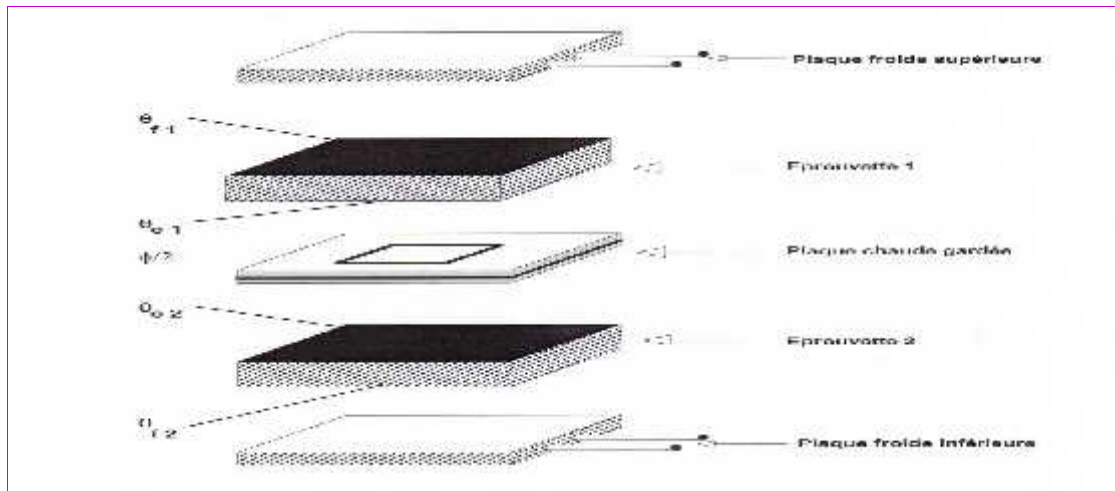


Figure IV.2: Principe de la plaque chaude gardée.

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres. La figure IV.3 montre en exemple des mesures du flux traversant l'échantillon donné par la moyenne du flux entrant et sortant.

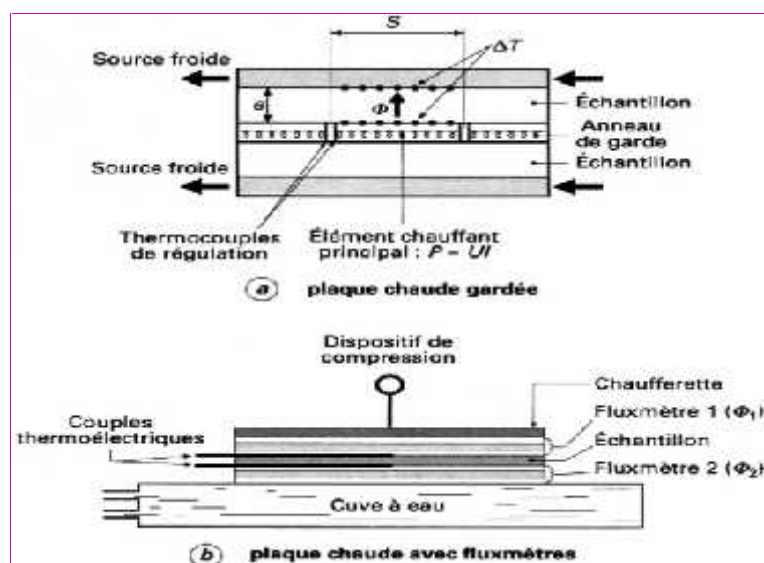


Figure IV.3 : Dispositif de la plaque chaude gardée et la plaque chaude avec fluxmètres.

IV.2. Méthodes non stationnaires (variables)

Le champ de leur application est très vaste, grâce à plusieurs avantages : mesures directes des paramètres thermo-physiques du milieu, la durée d'excitation thermique est courte, et elles sont faciles à mettre en oeuvre. Les mesures de la conductivité thermique par les méthodes non stationnaires consistent à exploiter des signaux de températures répartis dans un milieu en régime transitoire. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées. Ces méthodes constituent un progrès incontestables dans la caractérisation thermo-physique des milieux et donnent de bons résultats de mesures. En contreparties de ses bons résultats, ces méthodes présentent un défaut dû à un grand nombre de limitations liées aux difficultés d'analyse des données obtenues, problème de mise au point de matériaux à étudier, et au problème de l'évaluation de la précision de la méthode. De nombreuses méthodes non stationnaires ont vu le jour pour les mesures de la conductivité thermique, nous pouvons citer : méthode fil chaud, plan chaud [11], ruban chaud [12,13], pastille chaude [12], et Hot Disk [13, 14]. On propose dans le paragraphe suivant les méthodes sélectionnées pour assurer des mesures précises de la conductivité thermique d'un milieu granulaire. Ces méthodes sont les méthodes du fil chaud, et du hot Disk.

IV.2.1. Méthode du fil chaud

Sa rapidité, sa facilité de mise en oeuvre, et son coût peu élevé, ont fait la méthode de caractérisation la plus connue et la plus utilisée par le monde industriel. A l'origine, cette méthode fut développée pour l'étude de la conductivité thermique de liquide. Elle fut étendue par la suite à la caractérisation de milieux solides et aux milieux poreux. Le principe expérimental est particulièrement simple : on place un fil métallique entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gaz et les liquides. Le fil est relié à une alimentation électrique qui lui fournit un échelon de puissance.

La mesure consiste à relever au cours du temps soit l'élévation de température soit la variation de résistance électrique du fil (figure IV.4).

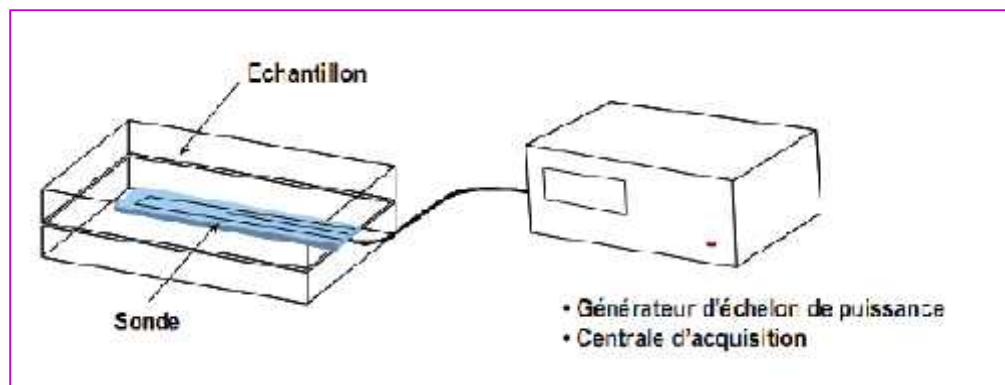


Figure IV.4: Dispositif expérimental du fil chaud.

IV.2.2. Méthode du Hot Disk

Cette technique s'intéresse à la mesure simultanée de la conductivité thermique, et de la diffusivité thermique et donne par déduction la capacité thermique des matériaux. Le dispositif expérimental est simple de mise en oeuvre. Une sonde (figure IV.5) composée d'une résistance thermique est placée en sandwich entre deux parties de l'échantillon à étudier. Cette méthode repose sur un modèle qui considère la sonde sous forme d'anneaux sources concentriques (avec un rayon noté r_s). La profondeur de pénétration du flux d_{pen} joue un rôle déterminant pour l'estimation de propriétés thermo-physiques du milieu, et définie par l'équation suivante :

$$d_{pen} = c_1 t_{exp} \lambda \quad (IV-6)$$

Où c_1 est une constante, et t_{exp} est la durée de l'excitation thermique. La méthode donne de bons résultats pour les estimations de la conductivité thermique. Par contre, cette méthode n'est pas très fiable pour l'estimation de la chaleur volumique, car le calcul de cette dernière dépend fortement des conditions opératoires citées précédemment.

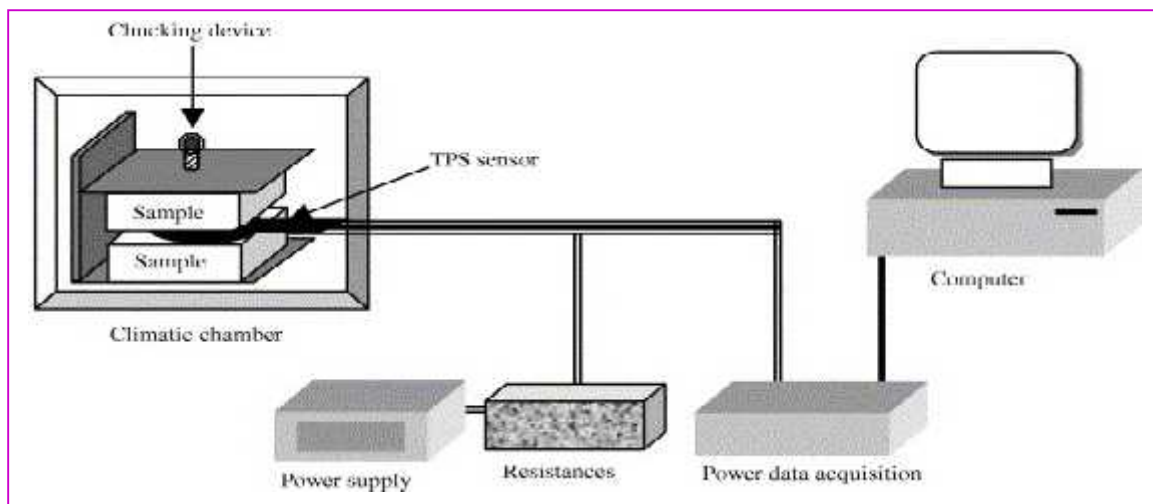


Figure IV.5 : Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk.

IV.3. Choix d'une méthode de mesure

Notre préoccupation est de trouver une méthode fiable pour la caractérisation thermique des milieux granulaires. La technique choisie se voudra rapide, et précise. Le choix de la méthode de mesure reste un choix ouvert, mais il faudra nécessairement adapter la méthode choisie en fonction de l'aspect physique du milieu et des moyens disponibles dans notre laboratoire. L'aspect granulaire du milieu étudié présente une première limite de l'utilisation des méthodes stationnaires. Pour utiliser les méthodes stationnaires, nous pouvons utiliser des milieux sous forme de compacts, mais cela entraîne une grande difficulté de réalisation de compacts de grandes dimensions. Notre intérêt se portera alors tout naturellement vers des méthodes non stationnaires (variables) pour un gain de temps appréciable et une facilité de

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

mise en œuvre de l'échantillon. Le travail présenté dans la suite de cette thèse, permettra de proposer la méthode choisie. Les études [15] présentent sur le tableau ci-dessous les avantages et les inconvénients de quelques méthodes de mesure de la conductivité thermique en régime permanent et variable.

Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients des méthodes de mesure de la conductivité thermiques en régime stationnaire et variable [15].

Régime	Méthode	Avantages	Inconvénients
Stationnaire	<ul style="list-style-type: none">- Plaque chaude gardée;- Film chauffant;- Cylindres coaxiaux;- Fluxmètres thermiques.	<ul style="list-style-type: none">- Simplicité du principe;- Assez bonne précision.	<ul style="list-style-type: none">- Temps d'expérience Long;- Influence de la résistance de contact;- Pertes thermiques Latérales.
Variable	<ul style="list-style-type: none">- Chauffage périodique;- Film Chauffant;- Méthodes à deux fluxmètres.	<ul style="list-style-type: none">- Temps d'expérience courts. Par conséquent : <ul style="list-style-type: none">*Pertes thermiques plus Restreintes;*Phénomènes de migration d'eau et éventuellement de convection limitée.	<ul style="list-style-type: none">- Détermination de propriétés thermo physiques moins immédiates, doit passer par l'élaboration de solutions analytiques;- Contrôle très rigoureux de la position des mesures de température et de flux.

V. Détails expérimentaux

V.1. Mode préparatoire

Les échantillons à tester dans cette partie sont des éprouvettes prismatiques de dimensions $90 \times 40 \times 150 \text{ cm}^3$; les éprouvettes confectionnées selon le mode opératoire présenté dans le chapitre III, sont :

- 6 éprouvettes en pâte pure de plâtre
- 6 éprouvettes en béton de plâtre.
- 6 éprouvettes en béton de plâtre renforcé de fibres, pour chaque pourcentage de fibres de 1 à 2% avec un pas de 0,5% et pour différentes longueurs 20, 30 et 40 mm à savoir 54 éprouvettes en total.

V.2. Méthode d'essai

Les propriétés thermo-physiques relatives aux composites étudiés à savoir la conductivité thermique utile et la chaleur spécifique, sont mesurées à l'aide d'un instrument de mesure appelé le «CT METRE» (figure IV.6), au sein du laboratoire du centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment (CNERIB).



Figure IV.6 : Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «CT METRE» avec ses accessoires.

Le «CT METRE» est un appareillage développé par le CSTB GRENOBLE (Hébert Sallée), commercialisé par la société TELPH (NF EN 993615) [16], aisément transportable, il a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements [17].

V.3. Principe de fonctionnement du CT METRE

Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous les deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de la température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée. La sonde anneau de type 15.R (diamètre 15 mm) figure IV.7 (a) est choisie pour la détermination des propriétés du matériau étudié, vu l'avantage de la détermination de la conductivité thermique et la chaleur spécifique, qui est destinée à s'insérer entre deux échantillons comme le montre la figure IV.7(b). Concernant la conductivité thermique des fibres du palmier, a été déterminée, en s'insérant la sonde anneau entre deux treillis de forme rectangulaire de mêmes dimensions.



(a)



(b)

Figure IV.7 : (a) Sonde anneau utilisée, (b) essai de mesure de la conductivité thermique et la chaleur spécifique volumique des composites étudiés par le «CT METRE».

VI. Présentation et commentaire des résultats

Les résultats obtenus de l'étude des paramètres thermiques à l'état sec, sont illustrés sur les courbes et les tableaux ci dessous.

VI.1. Conductivité thermique

La figure IV.8 montre la variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage des fibres pour différentes longueurs.

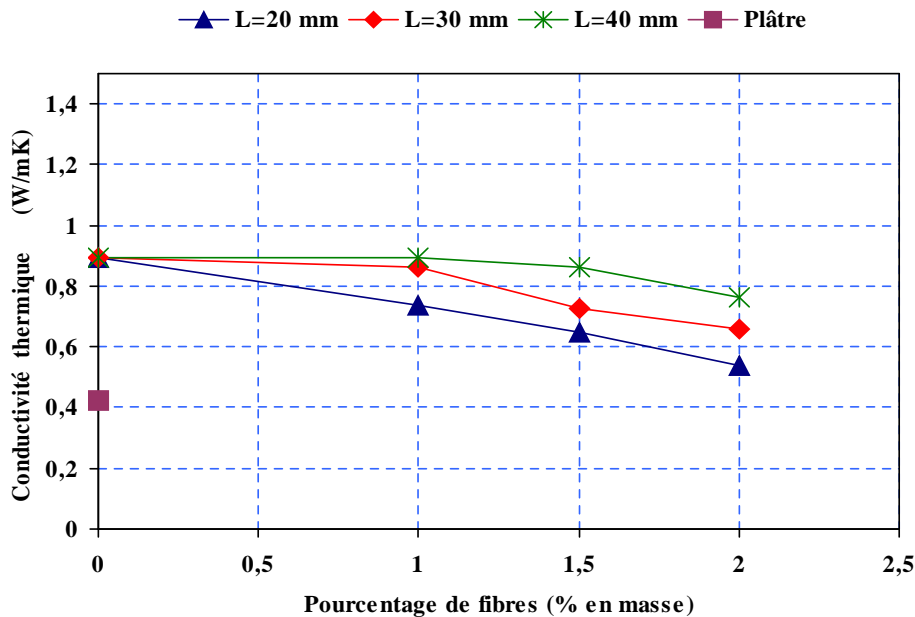


Figure IV.8 : Variation de la conductivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

La littérature [18] montre que le plâtre employé seul ou avec d'autres matériaux améliore nettement l'isolation des parois en raison de son faible conductivité thermique, dans notre cas est de l'ordre de 0,42 w /mK, on remarque sur la figure ci- dessus que la conductivité thermique utile après 28 jours diminue avec l'augmentation du dosage de fibres et cela par rapport au béton témoin, et elle croît avec la longueur de fibres utilisées. Cette constatation peut être attribuée à la conductivité thermique des milieux poreux qui est proportionnelle au volume de vides dans le spécimen, ces vides sont créés par l'incorporation des fibres, en général les fibres courtes s'aligne difficilement par rapport aux fibres longues, pour une même quantité de fibres, les fibres courtes créent beaucoup de vides que les fibres longues et par conséquent une faible conductivité thermique, ce qui est en accord avec plusieurs travaux [19,20] ,que la conductivité thermique décroît quand la quantité de fibres augmente [21] .

On note aussi une augmentation de la conductivité thermique de l'ordre de 53,07 % du béton de plâtre par rapport au plâtre seul et cela due à l'ajout des granulats (sable, gravier), qui ont comblé les vides existants dans le plâtre en diminuant sa porosité d'où une conductivité thermique supérieure. Nos résultats sont accord avec les résultats [15].

Le comportement thermique du composite « béton de plâtre avec fibres » peut s'expliquer par l'influence de plusieurs facteurs, tout d'abord les fibres du palmier eux même ont une conductivité thermique faible que celle du béton de plâtre et qui est de l'ordre 0,137 w /mK avec une capacité calorifique de 238,57 J /kg.K, la membrane formant les parois des alvéoles de fibres constitue une barrière thermique qui s'oppose au passage du flux thermique, Donc il faut prendre en compte l'interface fibre matrice qui s'est avérée efficace d'après les observations au MEB. Chap.III, la présence des alvéoles sur la surface de fibres facilite la pénétration du béton de plâtre ce qui augmente la tortuosité et ralentir le cheminement du signal thermique [22].

En étudiant la courbe reliant la conductivité thermique des composites étudiés à leurs densités sèches, la figure IV.9 montre que la conductivité thermique est proportionnelle à la densité sèche du matériau, cela est due au volume de vide créé par l'incorporation des fibres dans la matrice ce qui allège le poids du composite et par conséquent une moindre conductivité thermique. Nos constatations sont accord avec les travaux de [20], l'allure de courbes conductivité – densité est non linéaire et **Bouttin** [23] qui a montré par homogénéisation que la dépendance entre et n'est pas linéaire mais curviligne. Et en désaccord avec les travaux de **Bougerra** [24] pour un béton argileux à base des copeaux de bois, par **Goual** [25] pour les bétons cellulaires argileux, ainsi que par **Laidoudi** [26], et cela est due à la nature du matériau et aussi la méthode utilisée.

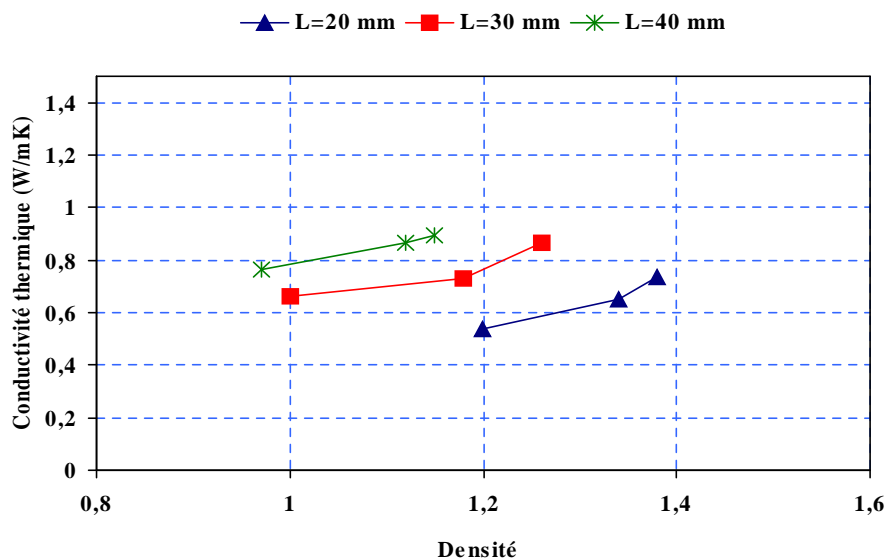


Figure IV.9 : Variation de la conductivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

VI.2. Chaleur spécifique

La mesure de la chaleur spécifique volumique après 28 jours a été faite sur les mêmes échantillons que celle de la conductivité thermique, les valeurs retenues, qui représentent la moyenne de six essais, sont mentionnées et illustrées sur les courbes ci-dessous. A noter que la chaleur spécifique massique du matériau est déterminée, par calcul, en tenant compte de la chaleur spécifique volumique et la masse volumique du matériau. La figure IV.10 représente

la variation de la chaleur spécifique massique en fonction du pourcentage de fibres avec différentes longueurs des composites étudiés.

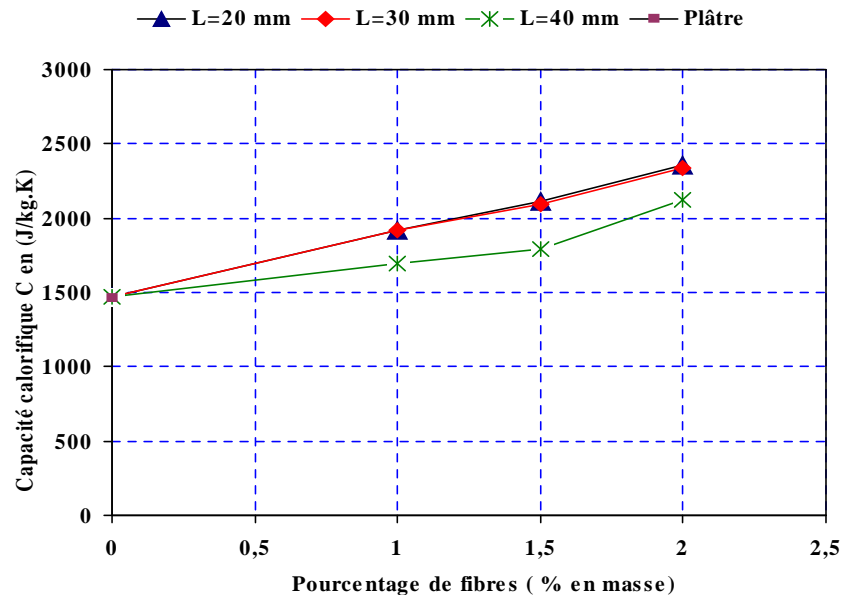


Figure IV.10: Variation de la chaleur massique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

La première remarque sur la figure IV.10, c'est que l'ajout des granulats (sable dunaire + graviers) au plâtre a fait diminuer légèrement sa chaleur spécifique massique, par contre l'ajout des fibres de palmiers au béton de plâtre a augmenté sa capacité calorifique. Nos résultats sont accord avec la référence [22], que l'ajout des copeaux de bois augmente la chaleur spécifique massique du béton de sable (si on la comparant avec un béton léger).

En effet, on constate que les capacités calorifiques sont d'autant plus grandes que le pourcentage en fibres est grand, ceci peut être attribué à la chaleur massique de fibres. Et on a pu obtenir avec l'incorporation de 2% de 30 mm de longueur, une augmentation de l'ordre de 59,25% et elle ne dépende pas de la longueur de fibres.

En étudiant la relation reliant la capacité calorifique des composites étudiés à leurs densités sèches, le tableau ci-dessous montre que la capacité diminue avec l'augmentation de la masse volumique du composite et cela est due à l'effet de l'emmagasinage de la chaleur dans des composites avec des densités élevées, ou la diminution du volume de vide créé par l'incorporation des fibres dans la matrice. Cette constatation est très intéressante pour le matériau utilisé à usage de confort thermique.

Tableau IV.3 : Variation de la chaleur spécifique massique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Propriétés	Chaleur spécifique massique (J /kg.K)	Masse volumique en (kg/m ³)
Plâtre	1456,31	1139,79
Béton de plâtre (0% de fibres)	1470,34	1890
L= 20mm	0,5 %	1917,34
	1%	2110,00
	2%	2356,16
L= 30mm	0,5 %	1915,55
	1%	2091,27
	2%	2341,65
L= 40mm	0,5 %	1691,19
	1%	1794,41
	2%	2125,67

VI.3. Diffusivité thermique

En comparant la diffusivité thermique du béton de plâtre par rapport au plâtre seul et d'après la figure IV.11, que cette valeur augmente en ajoutant des granulats au plâtre et cela est due à l'augmentation de la tortuosité, qui limite la diffusion de la chaleur dans la matrice [22], tandis que la diffusivité thermique diminue en incorporant des fibres dans le béton de plâtre et notons qu'à des fractions massiques élevées de fibres, l'augmentation du pourcentage de fibres ne fait diminuer que légèrement la diffusivité thermique, il faut signaler qu'à des pourcentages égaux de fibres, les composites avec des longueurs plus importantes tel que 40 mm, présentent des diffusivités légèrement plus élevées par rapport aux autres longueurs et le béton de plâtre lui-même.

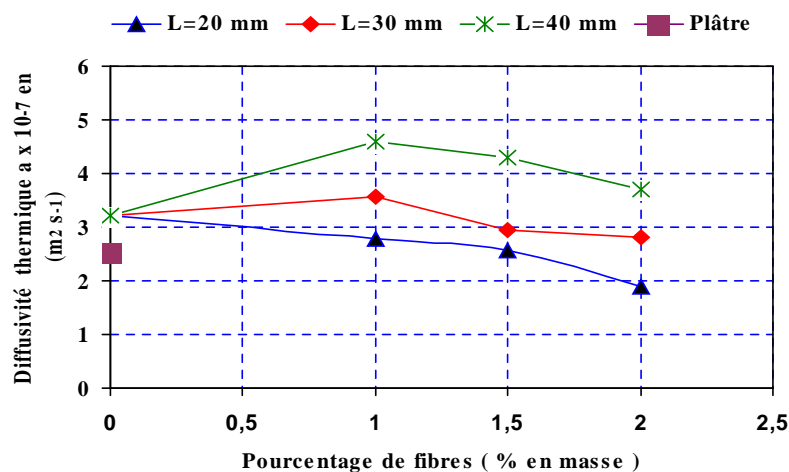


Figure IV.11: Variation de la diffusivité thermique des composites étudiés en fonction du pourcentage de fibres pour différentes longueurs.

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Concernant la relation entre la diffusivité et la masse volumique du matériau étudié, on remarque sur le tableau IV.4, que la diffusivité croît avec l'augmentation de la masse volumique et cela due à l'effet de l'introduction de fibres dans la matrice par la présence des alvéoles sur leur surfaces et qui s'opposent au passage du flux de chaleur, d'où une moindre diffusivité pour les dosages élevée de fibres qui créent des vides à l'intérieur de la matrice. Nos résultats sont accord avec les travaux [27], et qui ont montré que la diffusivité des composites décroît avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres d'ananas.

Tableau IV.4 : Variation de la diffusivité thermique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Propriétés	Diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Masse volumique en (kg/m^3)
Plâtre	2,55	1139,79
Béton de plâtre (0% de fibres)	3,22	1890,00
L= 20mm	1%	1380
	1,5%	1340
	2%	1200
L= 30mm	1%	1260
	1,5%	1180
	2%	1000
L= 40mm	1%	1150
	1,5%	1120
	2%	970

VI.4. Effusivité

La variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction des pourcentages de fibres pour différentes longueurs est représentée sur la figure IV.12.

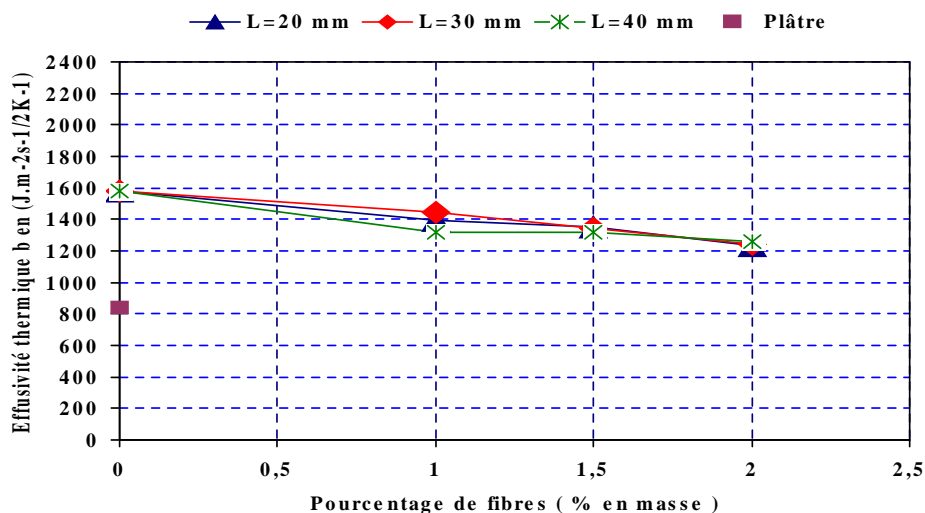


Figure IV. 12 : Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction pourcentages de fibres pour différentes longueurs.

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

On remarque une diminution de l'effusivité avec l'accroissement du dosage en fibres, les valeurs moyennes des effusivités thermiques évoluent d'une manière semblable pour toutes les longueurs de fibres.

D'après le tableau IV.5, on observe que l'effusivité thermique évolue avec la diminution de la masse volumique des composites étudiés, quelle que soit la longueur de fibres utilisée, et on a obtenu une très bonne corrélation entre l'effusivité et la masse volumique. Les coefficients de corrélation obtenus ont la valeur 1 pour toutes les longueurs.

Tableau IV.5: Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction de la masse volumique.

Propriétés	Effusivité thermique ($\text{Jm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Masse volumique en (kg/m^3)
Plâtre	838,92	1139,79
Béton de plâtre (0% de fibres)	1577,07	1890,00
L= 20mm	1%	1380
	1,5%	1340
	2%	1200
L= 30mm	1%	1260
	1,5%	1180
	2%	1000
L= 40mm	1%	1150
	1,5%	1120
	2%	970

VI.5. Modélisation des conductivités thermiques des composites étudiés

Le transfert de chaleur est particulièrement complexes, dépend de plusieurs paramètres tels que : la taille moyenne, la forme, la distribution spatiale des pores ou de particules, la qualité du contact entre les pores ou les particules voisines, la continuité (matériaux granulaires), etc ... **Gori [28]** ; **Princigalo et al [29]**. Plusieurs de matériaux ont fait l'objet d'une étude de modélisation **Hamdani et al [30]** ; **Gori et al [31]** etc. Aujourd'hui, de nombreux modèles de transfert de chaleur par conduction dans les matériaux poreux sont présentés dans la littérature **Carsona et al [32]** , **Weber et al [33]**. Toute fois, il convient de noter que très peu d'entre eux peuvent fournir des prévisions précises pour tous les matériaux considérés. Une partie de la difficulté peut être due à une simplification de la structure pour beaucoup de modèles.

Dans cette étude, on va valider deux modèles théoriques basés sur la combinaison des conductivités thermiques des différentes phases, solide et fluide (gaz et / ou eau). Des corrections théoriques pourront être apportées à ces modèles afin de les adapter à nos bétons de plâtre renforcés par les fibres du palmier dattier.

VI.5.1. Echelle de modélisation

Le béton est un matériau hétérogène constitué de particules dont la taille varie des plus gros grains jusqu'au ultrafines et de vides de différentes tailles et de répartition géométrique complexe. Pour permettre, donc, l'application des lois de la physique des milieux continus aux milieux poreux (milieux discontinus), il est nécessaire de définir un niveau de description qui permet d'établir une équivalence entre le milieu réel dispersé et un milieu continu fictif **Le Neidre [34]**. En effet, cette hypothèse permet d'assimiler un milieu poreux hétérogène et discontinu à un milieu continu unique, caractérisé en chaque point par des grandeurs macroscopiques moyennes. Ceci est envisageable grâce au passage de l'échelle du pore à celle d'un milieu poreux homogène à l'aide du volume élémentaire représentatif.

En général, l'établissement des équations, auxquelles obéissent les phénomènes à l'échelle macroscopique, est formellement obtenu à partir des équations microscopiques de la thermodynamique des milieux continus auxquelles sont appliquées des procédures spécifiques de changement d'échelle, telles que l'homogénéisation et les moyennes volumiques **Degiovani [35]**.

Dans notre cas, deux échelles ont été envisagées :

- 📌 La première (Echelle 1), le composite est considéré comme un matériau composé de deux phases : une phase solide et une fluide (air ou liquide)
- 📌 La deuxième (Echelle 2), on considère le composite constitué de trois phases une phase solide représentant le béton de plâtre et une phase (fluide : air ou liquide) dans lesquelles, on introduit des inclusions (fibres du palmier dattier).

VI.5.1.1. Estimation des paramètres nécessaires pour la modélisation

La détermination théorique de la conductivité thermique effective k_{eff} nécessite la connaissance de la porosité totale du composite ainsi que les fractions volumiques et la conductivité thermique de chaque phase.

VI.5.1.2. Estimation de la porosité

Les bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier ont une structure complexe dépendant à la fois, de la matrice et des fibres du palmier dattier incorporées. Ces dernières présentent des morphologies différentes. Elles se caractérisent par une porosité très élevée et ouverte à l'eau. La matrice, elle-même, se caractérise par une porosité moins élevée, présente une double porosité : sa propre porosité et celle induite par l'ajout des fibres du palmier dattier.

La porosité est mesurée par pycnomètre et les résultats sont illustrés sur les courbes et le tableau ci-dessous.

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Tableau IV.6 : Variation de la porosité des composites étudiés en fonction du pourcentage et la longueur de fibres du palmier dattier.

Propriétés		Porosité (%)
Plâtre		48,42
Béton de plâtre (0% de fibres)		24,81
L= 20mm	1%	28
	1,5%	31
	2%	33
L= 30mm	1%	29
	1,5%	32
	2%	35
L= 40mm	1%	28
	1,5%	30
	2%	34

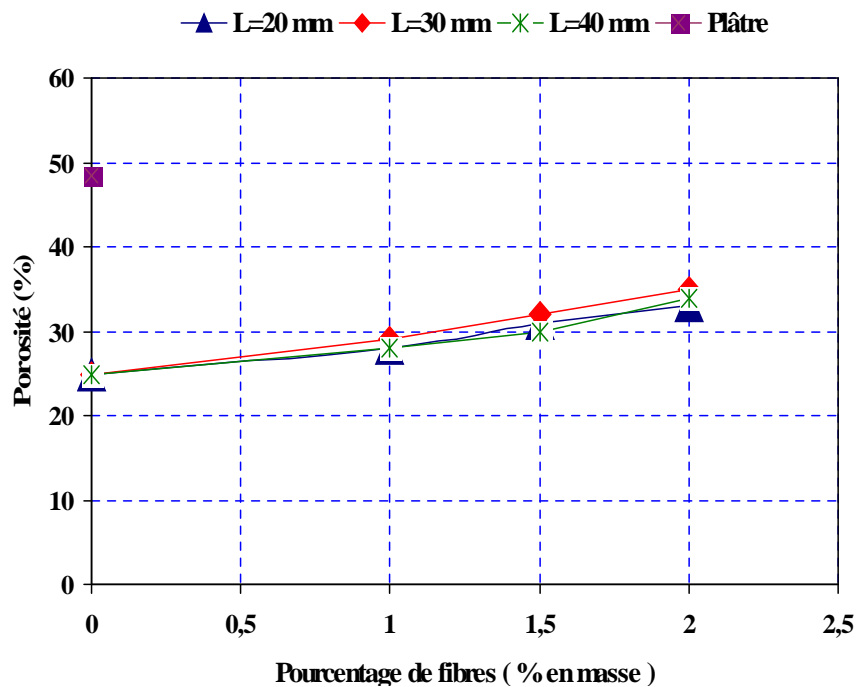


Figure IV.13 : Variation de la porosité des composites étudiés en fonction du pourcentage et la longueur de fibres du palmier dattier.

Le plâtre est un matériau datant d'une porosité importante, pour notre cas, elle est de l'ordre de 48,18%, d'après la figure IV. 12, lorsqu'on introduit du sable de dune et du gravier, la porosité diminue est cela due au remplissage des pores par les granulats d'où l'amélioration de ces propriétés mécaniques chose déjà affirmée par nos études précédentes [36]. Par contre lorsqu'on ajoute les fibres du palmier dattier, la porosité du béton de plâtre témoin augmente et cela due que les fibres créent des vides à l'intérieur du composite d'où une porosité plus grande. Cette porosité croît avec le pourcentage de fibres et ne dépend pas beaucoup de longueur, car l'allure générale de la courbe de la porosité est semblable pour toutes les longueurs.

VI.5.2. Cas des milieux bi phasiques

Parfois dans les études de modélisation simplifiées, le matériau poreux est supposé constitué de deux phases seulement : une phase solide de conductivité thermique k_s et une phase fluide de conductivité thermique k_f . Un grand nombre de modèles mathématiques plus ou moins complexe, ont été développés pour estimer la conductivité thermique équivalente de différents matériaux. Pour notre composite, on choisit le modèle de **Assaad**

VI.5.2.1. Modèle de Assaad

C'est un modèle similaire au modèle de la moyenne géométrique, semblable à celui proposé par **Woodside** et **Messmer** [41]. La relation donnant la conductivité thermique effective est de la forme :

$$k_{eff} = k_s^{(1-m)} k_f^m \quad (IV-7)$$

Où $m = c \cdot p$ et p est la porosité totale; c est coefficient de correction proche de 1, et peut être obtenu par régression linéaire sur les valeurs expérimentales.

k_{eff} : Conductivité thermique effective;

k_s : Conductivité thermique de la phase solide;

k_f : Conductivité thermique de la phase fluide égale à 0,569 W/ m.K[22].

Ce modèle a été appliqué pour estimer les conductivités des composites étudiés, à l'état sec et pour différents pourcentages et longueurs de fibres du palmier. Les valeurs obtenues ont été comparées à celle obtenues expérimentalement.

Les valeurs de c , pour notre composite, donnent une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et celles du modèle, et qui sont de l'ordre de 0,99 pour les composites de 20 mm de longueur de fibres et de 0,95 et 0,98 pour ceux de 30 et 40 mm de longueurs respectivement.

Les figures IV. 14 (a), IV. 14 (b) et IV. 14 (c) présentent la confrontation des résultats expérimentaux aux résultats obtenus avec le modèle de **Assaad** et permettent de confirmer les résultats obtenus pour tous les composites étudiés, pour le béton de plâtre témoin (0% de fibres), l'écart est de l'ordre de 8,3%, pour le composite avec 20 mm de fibres n'excède pas 3,2%. Pour ceux de 30 et 40 mm, l'écart ne dépasse pas 8,2 et 9,6 % respectivement.

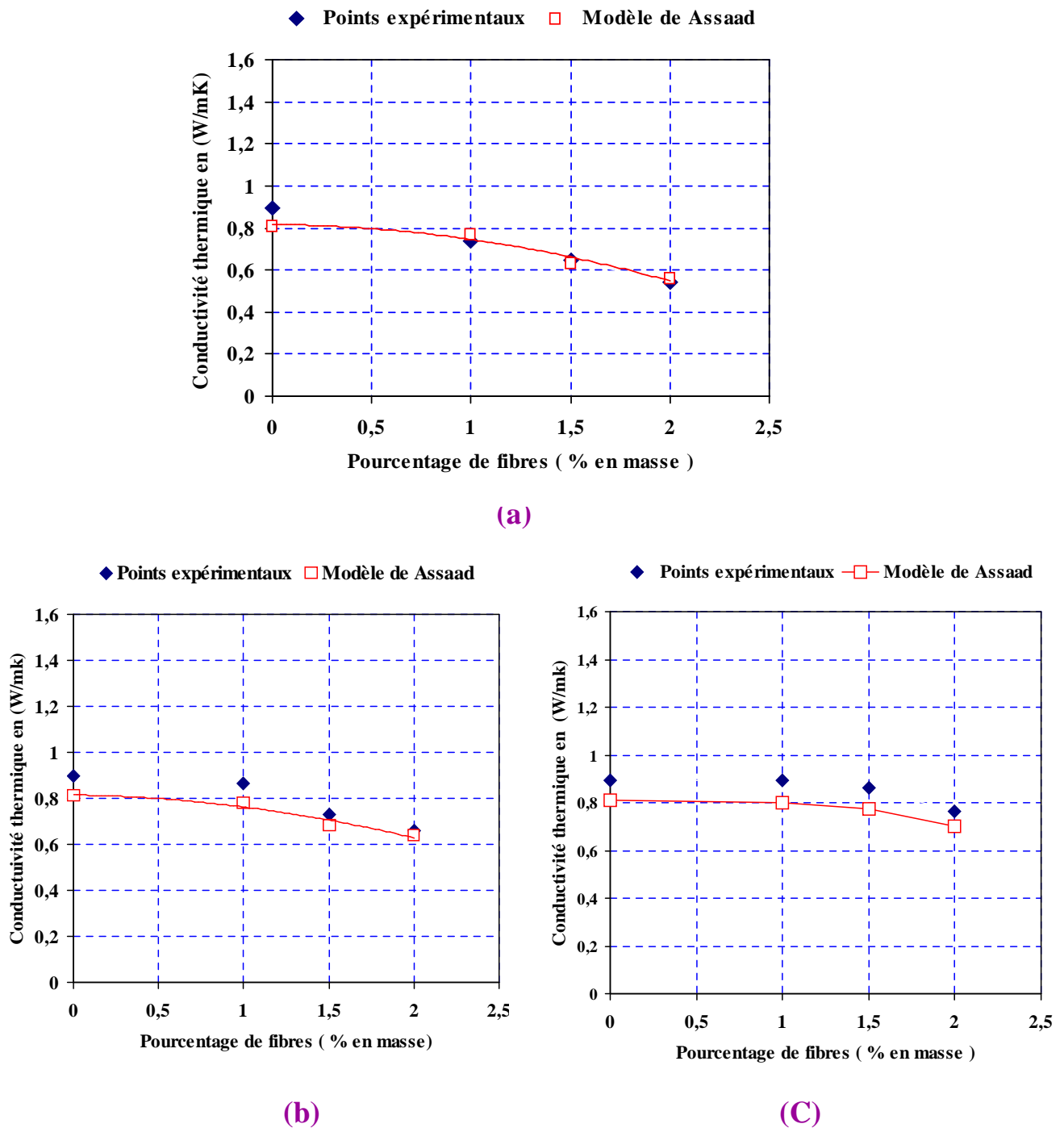


Figure IV. 14 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle de Assaad ;

(a) $L = 20 \text{ mm}$, (b) $L = 30 \text{ mm}$, (c) $L = 40 \text{ mm}$.

Donc d'après les résultats obtenus, on peut dire que le Modèle de **Assaad** a permis de donner une bonne approximation des conductivités thermiques effectives pour tous les composites étudiés.

VI.5.3. Cas des milieux tri phasiques

Puisque la totalité des modèles existants sont structurés de telle façon que leurs équations descriptives ne tiennent compte que des deux états extrêmes, sec ou saturé, du matériau, et puisque, dans la réalité, les matériaux de construction contiennent toujours de l'humidité et les deux états extrêmes ne sont que peu rencontrés, Les modèles tri phasiques viennent, alors, pour résoudre le problème et envisager les trois phases existants dans le composite. Parmi les modèles estimant la conductivité thermique d'un milieu tri phasique, on a choisis, l'homogénéisation auto-cohérente.

VI.5.3.1. Modèle par homogénéisation auto-cohérente

La modélisation par homogénéisation auto-cohérente permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de la connaissance de la conductivité de chaque constituant et de leurs proportions. Cette méthode, initialement développée pour la caractérisation mécanique (élasticité et élasto-plasticité de milieux hétérogènes, a été utilisée par **Arnaud L [37]**, sur des chanvres en vrac, les bétons de chanvre et des laines de chanvres, elle a été également utilisée par **Dupr [38]**, sur des bétons ligno-cellulosiques, et aussi par **A. Benazzouk [39]**, sur des composites en ciment avec des déchets de caoutchouc. elle est basée sur une condition énergétique : l'énergie contenue dans le matériau hétérogène est égale à celle du milieu homogène équivalent soumis aux mêmes conditions aux limites. Le milieu homogène est assimilé à un assemblage d'inclusions composites sphériques de tailles variables. On considère une hétérogénéité au sein du milieu homogène recherché.

Le milieu composite pourra être constitué soit de deux composants soit de trois composants. Dans le cas d'un matériau hétérogène constitué de deux composants, On étudie le matériau homogène équivalent dont la conductivité thermique effective **eff**. Le matériau est supposé constitué : d'une sphère de rayon R_1 représentant le constituant 1 (air) de conductivité λ_1 , elle-même entourée d'une coquille concentrique de rayon externe R_2 représentant le constituant 2 de conductivité thermique λ_2 . Pour le cas de trois composants on ajoute une coquille supplémentaire représentant la matrice solide de propriétés de rayon externe R_3 et une conductivité thermique λ_3 .

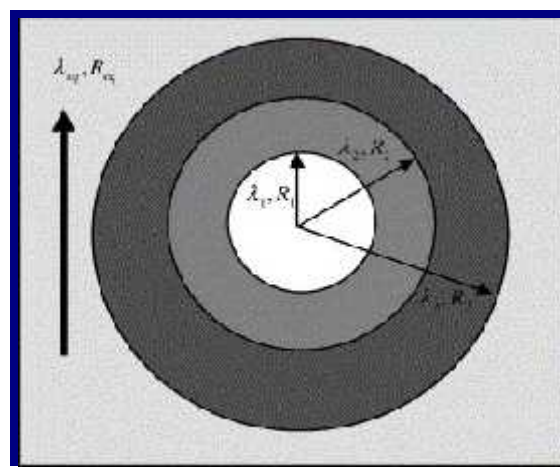


Figure IV .15: Schéma représentatif du modèle d'homogénéisation auto-cohérente dans le cas d'un matériau constitué de 3 composants.

La conductivité thermique équivalente est donnée par la relation :

$$\lambda_{eff} = \lambda_3 \left[1 + \frac{u \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right)}{\frac{1-u}{3} + \frac{1+u \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{3}} \right] \quad (IV-8)$$

et respectivement les fractions volumiques des fibres du palmier et la matrice solide.

On applique, donc le modèle à inclusion composite à trois composants, constitué d'une cavité sphérique d'air (vide inclus dans le composite indice1, $\lambda_1 = 0,026$ w/mK, entourée par une coquille concentrique de fibres organiques du palmier dattier, indice2, $\lambda_2 = 0,137$ w/mK, elle-même entourée par une coquille supplémentaire du béton de plâtre, indice3, $\lambda_3 = 0,895$ w/mK.

Les résultats obtenus par la modélisation auto-cohérente, pour les composites étudiés, sont donnés et confrontés aux résultats expérimentaux sur les figures IV.16, IV. 17 et IV.18.

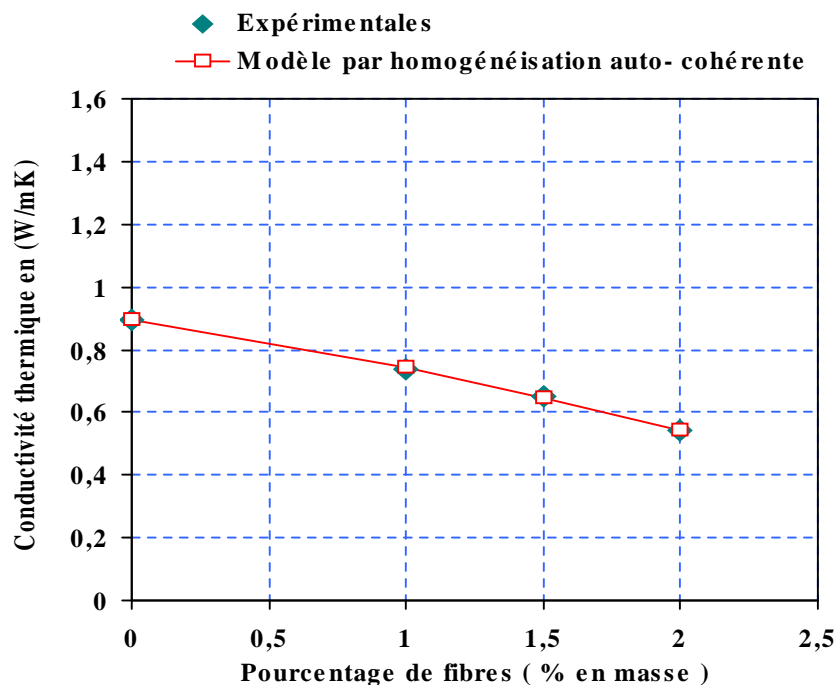


Figure IV. 16 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 20 mm de longueur de fibres.

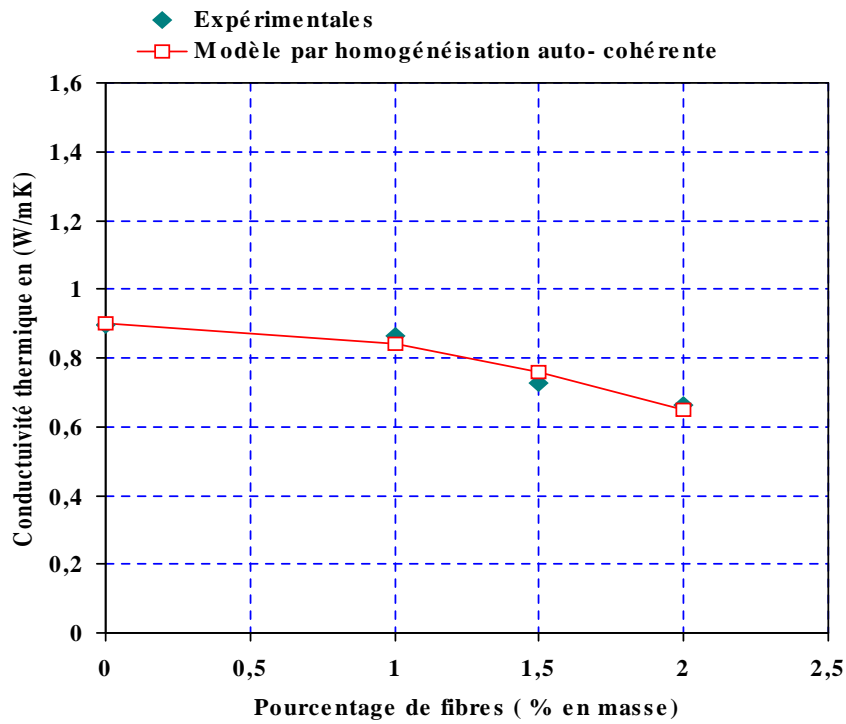


Figure IV.17 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 30 mm de longueur de fibres.

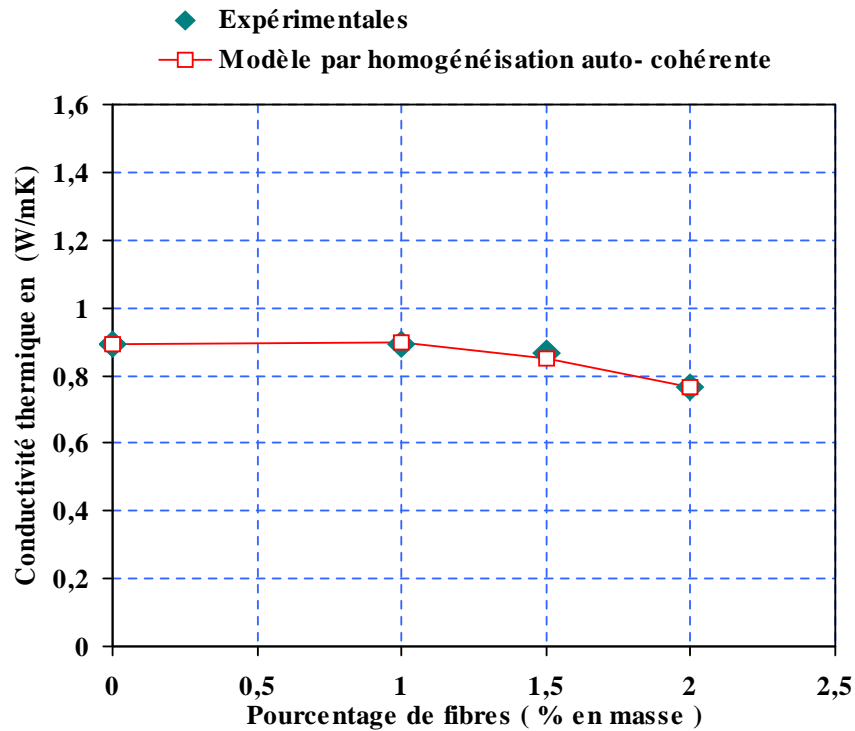


Figure IV.18 : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour 40 mm de longueur de fibres.

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Il est à noter que les valeurs des conductivités thermiques obtenues expérimentalement concordent et coïncident avec les valeurs obtenues par le modèle d'homogénéisation auto cohérente à trois phases et que pour toutes les compositions étudiées, l'écart n'excède pas 3,2%.

VII. Comparaison avec d'autres matériaux

VII.1. Plâtre

La réglementation thermique des bâtiments d'habitation en Algérie **DTR C 3.2 [40]** donne sur le tableau IV.7, quelques propriétés thermo-physiques adoptées pour les plâtres et selon leurs utilisations dans la construction.

Tableau IV.7 : Propriétés thermo physiques de différents types de plâtre [40].

Type de plâtre	Masse volumique sèche (Kg / m ³)	Conductivité thermique (W /m K)	Capacité thermique C (J/kg .K)
Plâtre gâché serré, ou très serré (plâtre de très haute dureté et plâtre projeté)	1100-1300	0,50	936
Plâtre courant d'enduit intérieur	750-1000	0,35	936
Carreaux de plâtre pleins	900-1000	0,35	936

Le plâtre utilisé dans cette étude possède une masse volumique de l'ordre de 1139,79 et qui est selon le tableau IV.7, incluse dans l'intervalle des masses volumiques de plâtre gâché serré ou très serré (plâtre de très haute dureté et plâtre projeté), avec une conductivité thermique inférieure et qui est de l'ordre de 0,424 W /m K et une capacité plus grande que ces derniers et qui est de l'ordre de 1854,44 J/kg .K.

VII.2. Béton de plâtre témoin

Le **DTR C3.2 [40]** donne sur le tableau IV.8, quelques propriétés thermo-physiques adoptées pour des bétons en granulats courants utilisés dans la construction.

Tableau IV.8 : Propriétés thermo physiques de différents types des bétons avec granulats courants [40].

Matériau	Masse volumique sèche (Kg / m ³)	Conductivité thermique (W /mK)	Capacité thermique C (J/kg .K)
Béton plein	2200 à 2500	1,75	1080
Béton caverneux	1700 à 2100	1,4	1080

Chapitre IV: Etude du comportement thermique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

Notre béton de plâtre témoin élaboré avec des granulats courants possède une masse volumique de l'ordre de $1890 \text{ Kg} / \text{m}^3$ et qui est incluse dans l'intervalle des masses volumiques des bétons caverneux, avec une conductivité thermique inférieure et une capacité thermique supérieure à ces derniers.

VII.3. Béton de plâtre renforcé de fibres végétales du palmier dattier

D'après les résultats obtenus, on peut constater que le composite qui donne les meilleures propriétés d'isolation, c'est le béton de plâtre renforcé avec 2% de fibre de 20 mm de longueur, sa masse volumique est de l'ordre de $1200 \text{ kg} / \text{m}^3$, Une porosité de 38,42 %, une conductivité thermique de $0,54 \text{ W} / \text{m} \text{ K}$, une capacité calorifique de $2356,16 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$ et une diffusivité thermique de $1,9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pour pouvoir comparer les propriétés citées ci-dessus avec d'autres matériaux, le tableau IV.9 résume quelques caractéristiques thermo- physiques de quelques matériaux.

Tableau IV.9 : Propriétés thermo physiques de différents types de béton.

Matériau	(kg / m^3)	Porosité	C ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$)	(W / mK)	a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Béton argile expansé	1600	36 %	900	0,46	$3,2 \text{ E}-07$
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82 %	880	0,16 à 0,33	$5,2 \text{ à } 5,8 \text{ E}-07$
Béton de bois	600 à 900	52 %	1200	0,09 à 0,30	$1,2 \text{ à } 2,8 \text{ E}-07$

D'après le tableau IV.9, on peut constater que :

- Le béton d'argile expansé possède une porosité qui est proche à celle du composite élaboré, mais il a une conductivité thermique et une capacité calorifique inférieure à ce dernier par contre le béton argile expansé diffuse rapidement la chaleur.
- Le béton cellulaire, même s'il a une grande porosité, avec des pores non connectés contrairement aux bétons de plâtre avec fibres et qui ont des pores interconnectés due à la présence des fibres, on peut dire qu'ils ont une grande diffusivité thermique par rapport au composite retenu ;
- La diffusivité thermique de notre composite est incluse dans l'intervalle des diffusivités thermiques du béton de bois avec une conductivité thermique et une capacité calorifiques supérieures à ces derniers.

Les recherches [22] donnent aussi pour les bétons de sable de dune avec un dosage de $160 \text{ kg} / \text{m}^3$ de copeaux de bois pour la même masse volumique que notre composite retenu c.a.d. $1200 \text{ kg} / \text{m}^3$, une conductivité thermique et une capacité calorifique inférieures aux celles de

notre composite et qui sont respectivement 0,27 W/mK et 1200 J/ kg.K. En revanche il diffuse la chaleur rapidement avec une diffusivité thermique de l'ordre de $8.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$;

Autres recherches sur des bétons de plâtre légers à base de granulats de liège montrent qu'ils possèdent une conductivité thermique de l'ordre de 0,18 W/mK et qui est très inférieure à celle du béton de plâtre avec fibres du palmier dattier et cela due au pouvoir isolant des granulats de liège [41].

Souici [42], sur des bétons de sable de dune à base des granulats de polystyrène expansé montrent que ces derniers pour des masse volumiques de l'ordre de 1240 kg/ m³ et qui est proche de la masse volumique de notre composite, avec une conductivité thermique un peu supérieure à celle de ce dernier et qui est de l'ordre de 0,598 W/mK.

VIII. Conclusions

A travers de ce chapitre et de point de vue bibliographique, il apparaît nettement que les milieux poreux du fait de leur structure, sont le siège de transfert thermique complexe du fait de couplage conduction – rayonnement et du transfert d'humidité en phase liquide et vapeur. Néanmoins, suivant l'état du milieu étudié certains mécanismes de transfert de chaleur peuvent être négligés.

Dans le bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. Les parts du rayonnement du transfert de masse en phase liquide et vapeur pour un matériau poreux non saturé ne seront pas également prises en compte au voisinage n'est pas trop faible. Par conséquent le transfert thermique peut être considéré purement conductible et la connaissance de la conductivité thermique, revêt une grande importance.

L'étude thermique des bétons de plâtre renforcés par des dosages variés de fibres du palmier et pour différentes longueurs montre que :

Les caractéristiques thermo- physiques des bétons de plâtre sont influencés par l'introduction des fibres, une amélioration du pouvoir isolant est enregistrée avec l'augmentation des proportions en poids des fibres utilisées et cela est due à la forte porosité des matériaux étudiés, porosité des fibres et le pourcentage de vides crée par ces dernières dans la matrice et la surfaces alvéolaire des fibres qui réduisent le transfert thermique.

D'une manière générale, on peut dire que l'ajout des fibres du palmier dattier au béton de plâtre améliore le comportement thermique de ce matériau, tout en permettant d'atteindre des résistances mécaniques qui sont incluses dans la marge standard des éléments porteurs de maçonnerie, c'est-à-dire dans l'intervalle (10-40Mpa) selon le document technique réglementaire **D.T.R.C2-45 [43]** et les résultats de nos études précédentes [36]. A titre d'exemple, avec un pourcentage de 2 % pour une longueur de 20 mm, on a obtenu une conductivité thermique de l'ordre de 0,540 W/mK qui est inclus dans l'intervalle des conductivités thermiques des bétons à granulats légers, **Neville [44]**, est qui est entre [0.3-0.6 W/mK] et cela pour une masse volumique de 1200 kg/m³ et une capacité calorifique de 2356,16 J/kg.K.

Selon le guide Rilem LC2 de la classification fonctionnelle des bétons légers, notre composite obtenu avec une conductivité thermique inférieure à 0,75 et une résistance à la compression supérieure à 3,5 Mpa, peut être classé en classe II (bétons légers de construction et d'isolation).

L'application des modèles choisis tels que le modèle de Assaad et d'homogénéisation auto cohérente type triphasique, affirme que la méthode de la sonde anneau (CT mètre) est fiable et elle a montré une bonne concordance entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux.

Donc les résultats obtenus nous permettent d'utiliser ce matériau comme matériau porteur dans des zones, où les charges ne sont pas trop élevées et comme isolants porteurs dans les climats sévères tels que les régions sahariennes ou la faible pluviométrie.

IX. Bibliographies

- [1] **Mounanga P.**, Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retrait, propriétés physiques. Thèse de doctorat, Ecole doctorale de mécanique, thermique et génie civil de Nantes, 2003, P.199.
- [2] **Cerezo V.**, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat; INSA du Lyon, 2004, P.235.
- [3] **Hladik J.**, Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux. Edition Masson, 1990.
- [4] **Balageas D.L.**, Thermal diffusivity measurement by pulsed method, High temperatures-High pressures, vol. 21, 1989, pp. 85-96.
- [5] **Coment E.**, Contribution a la mise au point de techniques de mesures de propriétés Thermo physiques par sondes à chocs. Thèse de doctorat, Ecole supérieur d'arts et métiers, 2001, P.205.
- [6] **Deponte F., Phillip P.**, Desing criteria for the hot plate appartus, Heat transmission measurement in thermal insulations, ASTM STP 544, American society for testing and materials, 1997, pp. 97-117.
- [7] **Laubitz M.J.**, Axial heat flow method of measing thermal conductivity, compendium of thermophysical proprety measurement methods, vol. 1, 1984 pp. 11-60, Edited by K.D.Magelic, A.Cezailigan and V.E.Peletsky, plenum press, New York, pp. 11-60.
- [8] **Ezbakhe H., Bousad S., El Bakkour A., Ajzoul T.et El Bouardi A.**, Etude Thermique de la terre stabilisée au ciment utilisée en construction au nord du Maroc. Revue. Energie Renouvelable: Journées de Thermique, 2001, pp. 69-72.
- [9] **Tama J.**, Mise au point d'un appareillage de mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction, Mémoire d'Ingénieur, ENSPY, 1990.
- [10] **Martin B.,Durastanti J.F., Peureux B.**, Méthode d'identification de la conductivité thermique des matériaux isolants, Entropie, vol. 147, 1994, pp 47-52.
- [11] **Zhang X.**, Métrologie par méthode quasi stationnaire: modélisation, identification, et application à la caractérisation des solides. Thèse de doctorat de l'INPL, 1993.
- [12] **Ladevie B.**, Mise au point de dispositifs de caractérisation thermo physique de matériaux isolants solides ou pâteux, extension aux fluides cisailles. Thèse de doctorat de l'ENSAM Bordeaux, 1998.
- [13] **Nganya T.**, Intérêt d'utilisation d'isolants locaux dans l'habitation au Cameroun. Thèse doctorat, ENSP de Yaoundé, 2000, P.175.
- [14] **Gustavson M., Karawacki E., Gustafsson S.E.**, Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensor. Review of Scientific Instruments, Vol. 65, 1994, pp. 3856-3859.

- [15] **Abdelmoumen Chaker A.**, Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999.
- [16] **CT METRE.**, Document Internet, site : www.clubmat32-CEP-ENSMP.
- [17] **CT METRE.**, Document Internet, site : www.telph.com-contact@telph.com
- [18] **Festa J.**, Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes. Edition Eyrolles, 1996.
- [19] **Ashour T., Wieland H., Georg H., Bockisch F.J., Wue W.**, The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. Journal of Materials and Design, vol.31, 2010, pp. 4676–4685.
- [20] **Onésippe C., Coutrin N.P., Toro F., Delvasto S, Bilba K., Arsène M.A.**, Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. Journal of composite, part A 41, 2010, pp. 549–556.
- [21] **Khedari J., Suttisonk B., Pratinthong N., Hirunlabh J.**, New light weight composite construction materials with low thermal conductivity, Journal of Cement. Concrete. Composite vol. 23, 2001, pp. 65-70.
- [22] **Bederina M.**, Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007, P.166.
- [23] **Boutin C.**, Conductivité thermique des bétons cellulaire autoclavé : modélisation par méthode autocohérente. Matériaux et construction, vol. 29,1996, pp.609-615.
- [24] **Bouguerra A.**, Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux, Comportement hygrothermique des matériaux élaborés. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1997, P. 212.
- [25] **Goual M.S.**, Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : Caractérisation et comportement thermohydrique. Thèse de Doctorat, ENP d'Alger, 2001,P. 150.
- [26] **Laidoudi B.**, Contribution à la valorisation de déchets de caoutchouc dans une matrice cimentaire : caractérisation physico-thermique et évaluation des performances à différents degrés d'humidité. - étude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, l'IUT d'Amiens, France, 2005, P.213.
- [27] **Mangal R., Saxena N.S., Sreekala M.S., Thomas S., Singh K.**, Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites. Materials Science and Engineering A339, 2003, pp. 281- 285.
- [28] **Gori F.**, A theoretical model for predicting the effective thermal conductivity of unsaturated frozen soils. The Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, USA, 2003, pp. 363–368.

- [29] **Principigallo A., Van Breugel K., Levita G.**, Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, Issue 11, 2003, pp. 1755-1763.
- [31] **Hamdami N., Monteau J.Y., Le bail A.**, Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures, *International Journal of Refrigeration*, vol. 26, Issue7, 2003, pp. 809-816.
- [35] **Gori F., Corasaniti S.**, Theoretical prediction of the thermal conductivity and temperature variation inside mars soil analogues, *Planetary and space Science* 52, 2004, pp.91–99.
- [32] **Carsona J.K., Lovatta S.J., Tanner B D.J., Cleland A.C.**, An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations. *International Journal of Refrigeration*, Vol.26, 2003, pp. 873–880.
- [33] **Weber, L., Dorn., J., Mortensen, A.**, On the electrical conductivity of metal matrix composites containing high volume fractions of non-conducting inclusions. *Acta Materialia*, vol. 51, 1999, pp. 3199 –3211.
- [34] **Le Neindre B.**, Mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz, *Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle*, R 2 920, p.21
- [35] **Degiovanni A.**, Transmission de l'énergie thermique : Conduction, *Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle*, BE 8 200,10 janvier 1994, p. 25
- [36] **Djoudi A, M.M Khenfer M.M, A. Bali A, Kadri. E.H, Debicki G.**, Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. *International journal of physical science*, vol. 7(21), 2012: pp. 2845-2853.
- [37] **Arnaud L., Monnet H., Cordier C., Sallet F.**, Modélisation par homogénéisation auto cohérente de la conductivité thermique de béton et laine de chanvre. *Congrès français de thermique SFT 2000*, Lyon 15- 7 mai 2000.
- [38] **Dupre B., Marmoret L., Quéneudec M.**, Application de la modélisation par homogénéisation autocohérente à la détermination de la conductivité thermique de bétons ligno-cellulosiques, *Congrès Français de Thermique, SFT 2004*, Presqu'île de Giens, 25-28 mai 2004, pp.607-612.
- [39] **Benazouk A., Mezreb K., Doyen G., Gouilleux A., Quéneudec M.**, Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites- Influence of the alveolar texture of rubber aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 25, 2003, pp. 711-720.
- [40] **DTR C3.2** Réglementation thermique des bâtiments d'habitation. Règles de calcul des déperditions calorifiques, Fascicule 1, C.N.E.R.I.B, Ministère de l'habitat, 2005.
- [41] **Zitani. I.**, Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre à base des granulats de liège. *Mémoire d'ingénieur*, Université de Laghouat, 2011, P.83.

[42] **Souici .I.**, Etude des propriétés physico – mécaniques et thermiques d'un composite à base de sable de dune, fines de brique, ciment et bille de polystyrène expansé. Mémoire d'ingénieur, Université de Laghouat.2012. P.84.

[43] **D.T.R.C2-45**, Règles de conception et de calcul des maçonneries. 2^{ème} Edition, C.N.E.R.I.B. Algérie, Ministère de l'habitat, 2005.

[44] **Neville AM.**, Properties of concrete. 4th ed. Malaysia Longman, 1996, pp. 706-707.

CHAPITRE V

*Etude du comportement phonique
des bétons de plâtre renforcés par des fibres
du palmier dattier*

Chapitre V: Etude du comportement phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres du palmier dattier

I. Introduction

Le bruit est aujourd'hui un véritable enjeu économique, il est, au même titre que l'air, l'un des indicateurs essentiels de ce que l'on dénomme la qualité de vie. Les nuisances sonores peuvent être à l'origine de grandes pertes économiques. En ville par exemple, la proximité d'une source importante de bruit telle qu'une gare ou un aéroport, peut entraîner la dépréciation de bien immobilier. Dans les espaces de travail, les nuisances sonores peuvent altérer la qualité du travail en faisant baisser la concentration du personnel exposé. Par exemple en France. On évalue à 15% par année le nombre de journées perdues. Le bruit engendre également dans ce pays de nombreuses autres conséquences négatives. On recense par exemple chaque année 70000 accidents du travail dus au bruit, 1400 cas de surdité dont 800 cas de surdité lié à l'activité professionnelle, ce qui place cette maladie au deuxième rang des maladies professionnelles. En Algérie, le bruit est un réel problème de santé au travail. Plus de 40 % des maladies professionnelles se traduiraient par une surdité. Ce chiffre inquiétant ressort d'une nouvelle étude menée par le service de médecine au travail du CHU d'Oran. Les répercussions du bruit sur la santé publique et son coût social en font un enjeu majeur.

Une stratégie de contrôle du bruit utilise des matériaux poreux pour dissiper l'énergie acoustique. Ces matériaux sont des systèmes passifs, par opposition aux systèmes actifs, car ils ne nécessitent pas de source d'énergie pour réduire le bruit. Peu coûteux, les matériaux poreux largement utilisés dans l'industrie du transport et le bâtiment pour réduire les nuisances sonores et améliorer le confort des individus, à tel point qu'ils sont presque partout. Dans les bâtiments on les retrouve aussi bien au niveau des parois que des plafonds et des planchers. Ce sont alors des couches de laines minérales, des plaques de mousse, des floccages ou de panneaux de fibres, des plâtres.

Les différents éléments dont nous disposons à ce stade de l'étude montrent que le b ton de plâtre est un matériau doté d'une porosité importante. Partant de ce constat et compte tenu des similitudes avec le b ton de bois, l'étude des propriétés acoustiques a été orientée vers le comportement en absorption. Ce chapitre présente les résultats de notre démarche exploratoire dans ce domaine. Celle-ci est basée sur un travail essentiellement expérimental et n'a pas donné lieu à une modélisation théorique contrairement aux propriétés thermiques.

II. Généralités sur les bruits dans les habitations

Dans les constructions, on fait la différence entre les **bruits aériens**, c'est-à-dire les bruits émis par une source n'ayant pas de contact avec la structure construite, et les **bruits solidiens**, qui ont pour origine une mise en vibration directe de la structure.

II.1. Bruits aériens

Dans un logement, les bruits aériens se propagent par l'air avant de faire vibrer les parois du local. Chaque paroi qui vibre fait à son tour vibrer l'air dans les locaux voisins : le son a traversé la paroi. On distingue deux types de bruits aériens :

- les bruits aériens intérieurs (bruits créés par les conversations, la télévision, les chaînes hi-fi, ...);
- les bruits aériens extérieurs (bruits créés par le trafic routier, ferroviaire ou aérien).

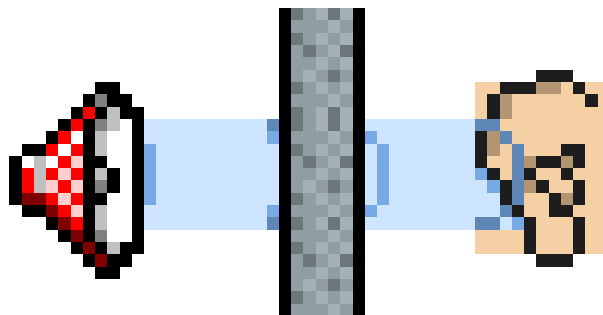


Figure V.1 : Bruits aériens intérieurs.

II.2. Bruits solidiens

Une paroi soumise à un choc entre en vibration et fait vibrer l'air des locaux voisins. Les bruits solidiens comprennent :

- Les bruits d'impact (bruits de pas, déplacement de meubles, chutes d'objets, ...);
- Les bruits d'équipement, collectifs (ascenseur, chaufferie, ...) ou individuels (chasse d'eau, robinetterie, ...).

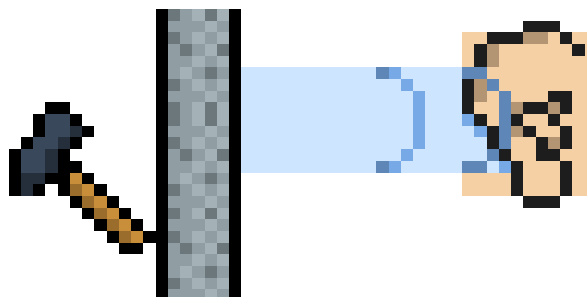


Figure V.2 : Bruits solidiens intérieurs.

II.3. Différents types de bruits

La figure ci-dessous illustre les différents types de bruits.



- 1: **Bruit aérien extérieur.**
- 2: **Bruit aérien intérieur.**
- 3: **Bruit d'impact.**
- 4: **Bruit d'équipement.**

Figure V.3 : Différents types de bruits.

II.4. Le décibel "A"

L'unité qui exprime les niveaux de bruit est le décibel (dB). Les décibels ont de particulier qu'avec seulement 3 dB de moins, on divise le niveau sonore par 2. Le **decibel (A)**, ou dB(A), est quant à lui plus représentatif de la sensation perçue par l'oreille humaine. C'est l'unité qui est classiquement utilisée pour évaluer les performances acoustiques des constructions. On admet généralement que le niveau sonore à l'intérieur d'un logement ne doit pas dépasser 35 dB(A) pour garantir un confort minimum.

II. 5. Comportement du bruit à la rencontre d'une paroi

II. 5.1. Isolation et absorption

Quand un son (1) rencontre une paroi, son énergie sonore est en partie :

- réfléchi (2)
- absorbée (3)
- transmise (4)

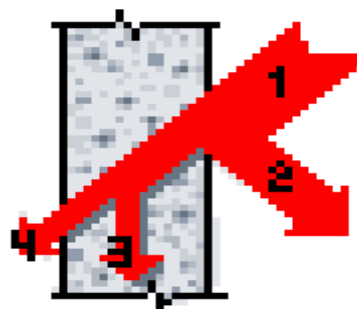


Figure V.4 : Comportement d'un bruit à la rencontre d'une paroi.

- L'énergie réfléchie revient du côté de la source;
- L'énergie absorbée se transforme en chaleur dans la paroi;
- L'énergie transmise traverse la paroi et fait vibrer l'air de l'autre côté.

L'isolation acoustique consiste à traiter la transmission des bruits, soit qu'ils viennent de l'extérieur, soit qu'ils soient émis depuis le local à isoler (afin qu'ils ne s'entendent par hors de celui-ci). Les matériaux fortement isolants réduisent surtout la partie transmise de l'énergie sonore, et réfléchissent cette énergie vers la source émettrice. L'absorption acoustique, ou correction acoustique, traite l'énergie réfléchie et absorbée, mais ne modifie quasiment pas les propriétés de transmission de la paroi. Ainsi, un matériau absorbant n'améliore pas l'isolation, puisqu'il ne supprime pas les bruits extérieurs, ni n'empêche les sons intérieurs de sortir.

L'absorption de l'énergie acoustique est obtenue à partir de matériaux, habituellement poreux, qui dissipent l'énergie en la transformant en chaleur.

II.5.2. Transmission directe et transmission latérale

L'énergie acoustique se transmet du local d'émission au local de réception :

- Soit par transmission directe, avec comme milieu de propagation la paroi séparative (mur, cloison) entre les deux pièces;
- Soit par transmission latérale, qui utilise des voies de propagation autres que la paroi séparative entre les deux pièces.

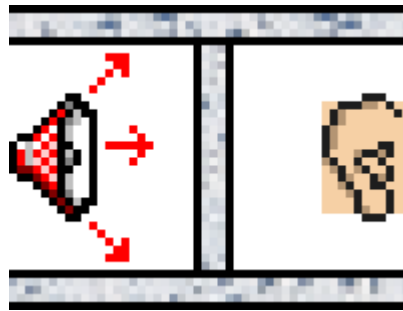


Figure V.5 : Transmission directe et transmission latérale.

II. 5.3. Isolement et indice d'affaiblissement

L'isolement acoustique entre deux locaux correspond à la différence entre le niveau sonore du local d'émission et celui du local de réception. Il est mesuré sur place, en émettant un bruit de niveau élevé dans le local d'émission et en mesurant les niveaux de bruit dans ce local et dans le local de réception.

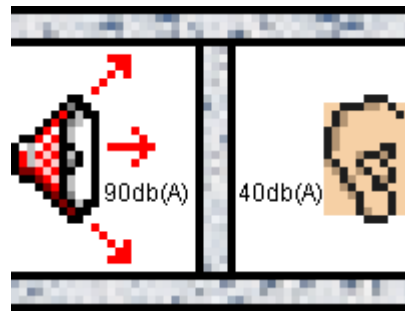


Figure V.6 : Mesure de l'isolement acoustique entre deux locaux.

L'indice d'affaiblissement acoustique d'un élément de construction (paroi, porte, fenêtre, ...) caractérise sa performance acoustique. Ce paramètre intrinsèque à l'élément est mesuré en laboratoire pour s'affranchir des transmissions latérales.

En conséquence, il ne faut pas confondre l'isolement et l'indice d'affaiblissement : le premier est un indice d'évaluation du bâtiment, qui dépend de nombreux paramètres autres que les caractéristiques des produits (nature des autres éléments du bâtiment, qualité de la mise en œuvre, présence éventuelle de mobilier dans les locaux, ...); le second renseigne uniquement sur les propriétés acoustiques intrinsèques d'un élément de construction.



Figure V.7 : Les différents types de transmissions du bruit.

III. Rappels sur les ondes acoustiques

III.1. Définitions

L'état de référence en équilibre thermodynamique du milieu atmosphérique se caractérise par une température T_0 de 20° C, une pression $P_0 = 10\text{Pa}$ et une masse volumique $\rho = 1,28 \text{ kg.m}^{-3}$. Toute vibration d'un corps dans ce milieu entraîne des variations locales de pression qui se propagent dans l'air. Ces perturbations captées par l'oreille donnent la sensation de bruit. Un son pur correspond à une variation sinusoïdale de la pression acoustique autour d'une position d'équilibre. Le champ de pression présente une dépendance spatiale et temporelle.

$$P(t, x) = P_{\max} \sin (\omega_f - kx) \quad (\text{V-1})$$

Avec P_{\max} : Amplitude maximale de l'onde;

ω_f : Pulsation de l'onde;

k : Nombre d'onde.

La distance entre deux extrema consécutifs correspond à la longueur d'onde λ_f (en m). La fréquence du signal f et sa longueur d'onde λ_f sont reliées entre elles par la constante \mathbf{c}_0 ($\approx 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) qui représente la célérité de l'onde dans l'air :

$$\lambda_f = \mathbf{c}_0 / f = 2\pi \mathbf{c}_0 / \omega_f \quad (\text{V-2})$$

L'oreille humaine est sensible aux ondes dont la fréquence est comprise entre 20 et 16000 Hz. On définit alors trois domaines de fréquences :

- 20 à 400 Hz : Graves $\implies \lambda$ compris entre 0,85 et 17 m;
- 400 à 2000 Hz : moyennes $\implies \lambda$ compris entre 0,17 et 0,85 m;
- Au- delà de 2000 Hz : Aigus $\implies \lambda$ inférieur à 0,17.

Le son correspond à une superposition de signaux de fréquences différentes. Il faut étudier ses caractéristiques selon f . Cependant, les acousticiens préfèrent travailler sur des intervalles de fréquences appelés octaves et tiers d'octaves. Ces intervalles sont de largeur relative constante avec :

$$\frac{f_{i+1} - f_i}{f_i} = \text{constante} \quad (\text{V-3})$$

Avec f_{i+1} et f_i : limites de la bande de fréquences.

On a $f_{i+1} = 2 f_i$ dans le cas des octaves et $f_{i+1} = 2^{1/2} f_i$ pour les tiers d'octave, ce qui permet alors de définir de manière normalisée ces intervalles. Le travail par bandes de fréquences permet de faciliter la représentation des performances acoustiques du son et la comparaison des performances acoustiques des matériaux. Dans le domaine de bâtiment, on utilise la plage de fréquences de 100 à 4000 Hz. Le tableau suivant donne la correspondance entre octaves et tiers d'octave dans cette gamme.

Tableau V.1 : Définition normalisée des octaves et tiers d'octaves.

	Fréquences (Hz)																	
1/3 d'octave	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
octave	125		250			500			1000			2000			4000			

Tab.IV. 1: Définition normalisée des octaves et tiers d'octaves

III.2.1

La propagation du son est perturbée lorsque des obstacles se dressent sur son passage. L'onde incidente génère une onde réfléchie sur la surface du matériau et une onde transmise au travers de celui-ci.

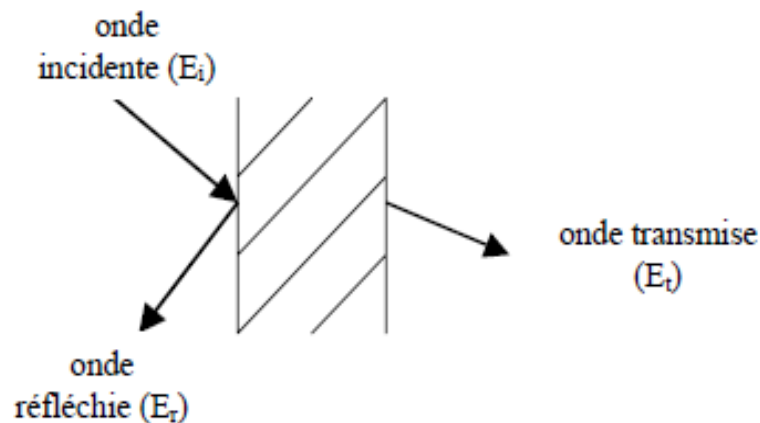


Figure V. 8 : Comportement d'une onde en incidence oblique à la surface d'un matériau.

Le bilan énergétique correspondant à cette situation est :

$$E_i = E_r + E_t \quad (\text{V-4})$$

Or, certains matériaux possèdent la faculté de dissiper une partie de l'énergie de l'onde incidente. On parle alors de l'absorption acoustique. Le bilan énergétique est alors modifié de la manière suivante :

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (\text{V-5})$$

On parle d'isolation acoustique lorsque l'énergie transmise (E_t) devient négligeable devant les autres composantes. Ceci se produit lorsqu'on désire limiter la propagation du son de part et d'autre d'un obstacle (cas du mur entre deux pièces). Pour ce faire, on utilise des matériaux de forte inertie, que l'onde incidente ne peut pas mettre en mouvement. Il n'y a pas d'effets vibratoires. C'est l'effet de masse.

On parle de correction acoustique lorsqu'on cherche à réduire les nuisances du bruit émis dans le local que l'on cherche à traiter. Le but est de limiter la création d'ondes réfléchies sur les parois de la pièce car elles interfèrent avec les ondes incidentes et gênent l'intelligibilité du discours (problème de l'écho). Des matériaux poreux sont alors employés (laines...) car ils ont la faculté de dissiper une partie de l'énergie de l'onde incidente (phénomène d'absorption). Toutefois, il faut noter que ce type de matériaux permet d'augmenter E_a et de diminuer E_r mais qu'ils n'ont quasiment pas d'incidence sur E_t qui reste généralement élevée. En effet, les matériaux légers vibrent facilement.

Dans le cas particulier où l'énergie de l'onde transmise E_t est négligeable, V-5 se réécrit de la manière suivante :

$$E_i = E_r + E_a \quad (\text{V-6})$$

Par définition, α est un coefficient adimensionnel, variant entre 0 et 1. La valeur 0 correspond à un matériau totalement réfléchissant et la valeur 1 correspond à un matériau totalement absorbant. L'absorption dépend de la fréquence principalement. Ceci signifie qu'un même échantillon peut être par exemple faiblement absorbant aux basses fréquences et fortement aux hautes fréquences. Ceci explique pourquoi la valeur de α doit toujours s'accompagner de la fréquence à laquelle la mesure est réalisée. L'absorption acoustique α se mesure de manière continue sur toute la gamme de fréquences comprises entre 100 et 2000 Hz à l'aide d'un appareil nommé tube à impédance ou tube de Kundt. Ce dispositif possède la particularité de limiter la transmission des ondes ($E_t \approx 0$) et de se placer en incidence normale (ondes incidente et réfléchie ont même direction de propagation). On calcule alors la valeur de α par octave afin de comparer les matériaux entre eux.

III.3. Lien entre porosité, perméabilité et comportement acoustique

Un matériau peut être qualifié de milieu poreux, s'il est constitué à la fois d'une phase solide et de vides appelés pores. Ces pores sont saturés par de l'air. Il existe deux familles de pores dans un matériau, influant de manière différenciée sur le comportement acoustique :

- Pores connectés ;
- Pores occlus.

Tout d'abord, un matériau possédant une forte porosité est léger. Il aura donc tendance à vibrer sous l'effet des ondes incidentes. Ce type de matériau ne peut donc pas être employé tel quel pour de l'isolation acoustique.

Ensuite, l'absorption acoustique est due aux frottements visqueux existant entre le fluide et le squelette solide, car ils ont des vitesses de déplacement différentes. Cet amortissement n'existe donc que si l'onde acoustique peut pénétrer dans le réseau poreux et il est d'autant plus fort que la surface de contact entre le fluide et le solide est grande. L'absorption acoustique est donc favorisée lorsque le matériau possède une porosité ouverte ϕ ouverte élevée et une perméabilité Π suffisante. Ainsi, l'onde pénètre facilement dans le matériau et dispose d'un large espace pour s'amortir. C'est pourquoi les matériaux absorbants sont employés pour régler les problèmes d'écoute à l'intérieur d'un local en limitant la réverbération des sons (réflexion négligeable). Ils dissipent une partie de l'énergie acoustique incidente et transmettent l'autre partie de par leur perméabilité.

Le dernier élément à considérer concerne la taille caractéristique des pores. Si le matériau possède une seule taille caractéristique de pores, le milieu est dit à simple porosité. En revanche, l'existence de deux tailles caractéristiques de pores modifie le comportement acoustique global du matériau. Ceci influe en particulier sur l'absorption acoustique. Dans le cas d'un simple poreux, α augmente avec la fréquence d'une manière régulière. Dans le cas d'un double poreux, des pics d'absorption sont observables.

III.4. Choix des matériaux absorbants

Dans les locaux inconfortables à cause du bruit généré à l'intérieur, on peut souhaiter augmenter l'absorption acoustique des parois pour limiter le temps de réverbération. Le principe d'un matériau absorbant est d'atténuer la réverbération en empêchant la réflexion du son sur une paroi. C'est un phénomène de surface qui s'obtient avec des matériaux à structure ouverte. Les matériaux fibreux et les matériaux à porosité ouverte (moquette, rideaux, vêtements, lièges...) possèdent de très bonnes caractéristiques au niveau de l'absorption du son. Chaque matériau absorbe, suivant sa nature, des fréquences de sons différentes. La solution pour couvrir l'ensemble du spectre sonore consiste à employer dans une même pièce un assemblage de matériaux d'absorption et de dimensions différentes.

- Hautes fréquences : matériaux poreux, fibreux, textiles;
- Moyennes fréquences : épaisseur des matériaux;
- Basses fréquences : résonateurs (matériau perforé espacé de la paroi).

IV. Détails expérimentaux

La caractérisation des propriétés acoustiques du béton de plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier est basée sur une approche expérimentale. Des paramètres représentatifs tels que le coefficient d'absorption et les fréquences sont mesurés. Le dispositif employé au cours de cette étude est donc décrit dans cette partie, ainsi que les principes de mesure.

IV.1. Tube de Kundt

Ce dispositif est un des moyens de référence de mesure en incidence normale des propriétés acoustiques d'un matériau. Il permet d'évaluer le coefficient d'absorption α d'un

matériau sur toute la gamme de fréquences testées. La méthode de mesure repose sur le fait qu'en deçà d'une fréquence particulière appelée fréquence de coupure propre à chaque type de tube en fonction de sa géométrie et indépendamment du matériau testé, l'onde propagée est une onde plane. Le fait de travailler en incidence normale avec des parois rigides permet de se situer dans un cadre connu, pour lequel on sait traduire le phénomène de propagation de manière théorique. La direction de propagation des ondes incidente et réfléchiée est la même.

De plus, l'échantillon est placé sur un support rigide imperméable, ce qui supprime les ondes transmises.

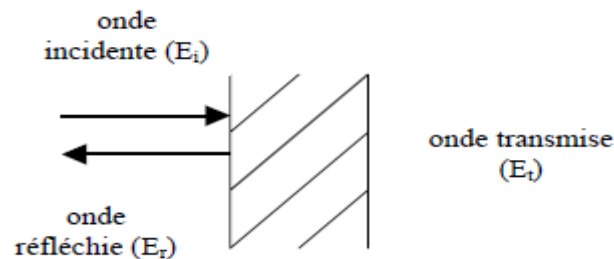


Figure V.9 : Comportement d'une onde en incidence normale à la surface d'un matériau.

Le coefficient d'absorption acoustique a été déterminé en utilisant le tube de Kundt (Fig. V.10), En s'inspirant de la norme (ASTM C384-98, American Society for Testing and Materials, 1999) [1]. On a utilisé pour chaque type de composites deux tailles d'éprouvettes : la première est de diamètre 100 mm et d'épaisseur de 40 mm pour les hautes fréquences et la deuxième de diamètre 29 mm et d'épaisseur 40 mm pour les basses fréquences. Les courbes trouvées sont la moyenne des valeurs obtenues pour six éprouvettes.



(a)



(b)

Figure V.10 : (a) Déroulement de l'essai d'acoustique à l'aide de tube de Kundt, (b) échantillons utilisés lors de l'essai.

V. Présentation et discussion des résultats

V.1 Courbes continues d'absorption du son

Les milieux poreux comme le plâtre sont des matériaux absorbants parce qu'ils possèdent des bonnes propriétés d'isolation acoustique à cause de leurs porosités ouvertes [2].

Dans cette étude et d'après la figure V.11, on remarque que le coefficient d'absorption α du plâtre est faible aux basses fréquences et fort aux fréquences élevées, ce qui est en accord avec les travaux de [2] et les prédictions théoriques [3].

Lorsqu'on ajoute des granulats au plâtre (sable de dune + graviers), c.à.d. le cas du béton de plâtre, les pores sont remplis et l'absorption diminue, d'où des résultats inférieurs aux ceux obtenus pour le plâtre seul.

Si on compare les résultats obtenus avec la littérature [4] et d'après la même figure, on peut constater que les coefficients d'absorption mesurés pour le plâtre sont supérieurs que ceux donnés par la littérature et cela dépend de la nature du plâtre utilisé et aussi le type d'essai abordé. Concernant le béton de plâtre est d'autant meilleur de point de vue absorption acoustique que le béton de ciment courant et cela est due à la nature de la matrice plâtre qui est absorbante du son par rapport au ciment.

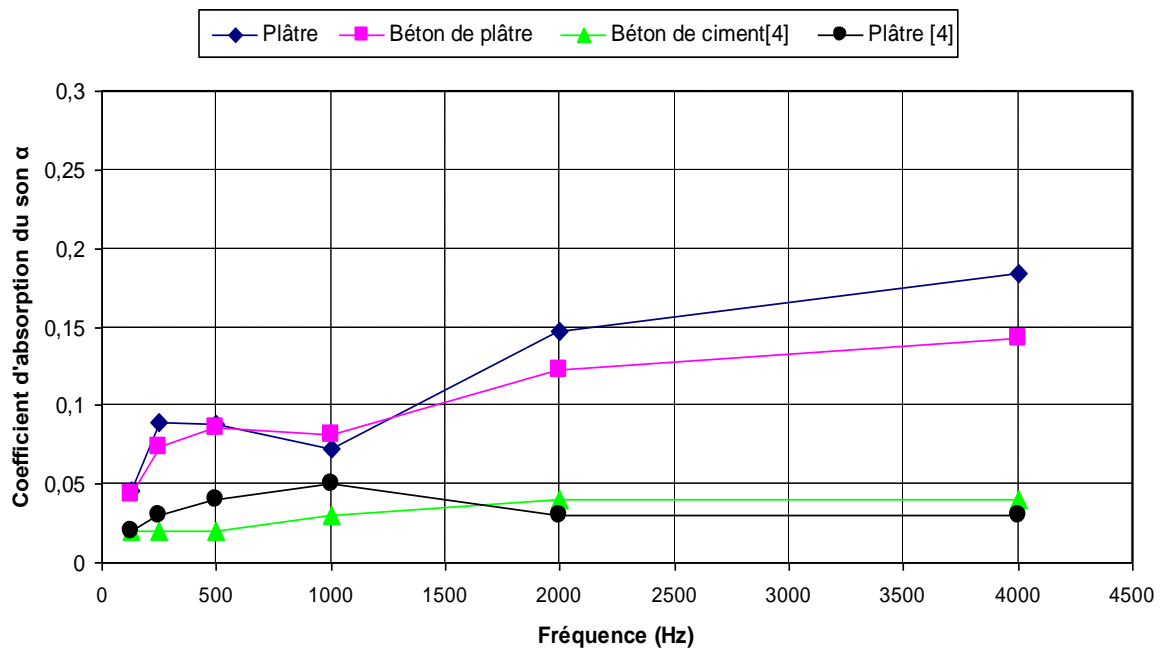


Figure V. 11 : Comparaison des coefficients d'absorption du son α du plâtre et béton de plâtre avec ceux du béton de ciment et du plâtre donnés par la littérature.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats de la variation du coefficient d'absorption α des composites en fonction de la fréquence et cela pour différents pourcentages et longueurs de fibres du palmier.

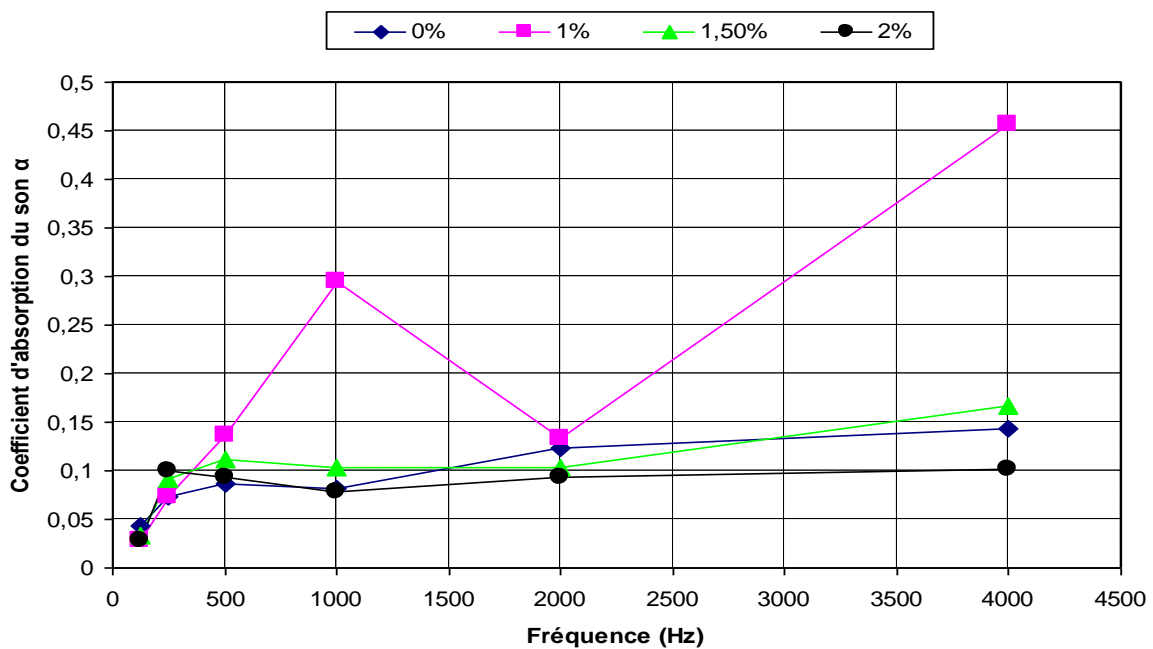


Figure V. 12 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 20 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

Le comportement acoustique du composite béton de plâtre – fibres du palmier peut s'expliquer par l'influence de plusieurs facteurs. Tout d'abord la littérature montre que si l'onde sonore peut pénétrer à l'intérieur du matériau fibreux, elle y engendre des frottements, des déplacements de fibres légères, d'où transformation d'énergie [3]. La porosité doit donc être de type ouverte. En plus les matériaux à base de cellulose comme les fibres du palmier sont choisis comme des milieux isolants acoustiques d'après la littérature. Yilmazer et Ozdeniz [5] constatent que l'incorporation des fibres augmente l'interconnexions entre les pores.

La figure V.12 montre la variation du coefficient d'absorption du son en fonction de la fréquence pour la longueur de 20 mm et pour différents pourcentages de fibres, on remarque que le coefficient d'absorption varie sensiblement sur toute la gamme de fréquence et cela pour le béton de plâtre sans fibres, lorsqu'on introduit juste 1% de fibres, le coefficient d'absorption augmente avec la fréquence jusqu'au 1000 HZ et cela est due au type des alvéoles de fibres fermées ou ouvertes car la littérature montre que les mousses à alvéoles ouvertes absorbent bien le son et lorsqu'elles sont flexibles, elles présentent des propriétés amortissantes. Par conséquent, elles conviennent parfaitement comme matériaux d'isolation phonique et d'amortissement des chocs [6]. Ce point a été confirmé par les observations microscopiques qui affirment la pénétration du gypse dans les alvéoles ouvertes de la fibre du palmier utilisée dans cette étude (fig. V.13), puis on a enregistré une diminution à 2000 HZ et cela est due à une diminution de la porosité ouverte du composite et la caractéristique de réflexion du son de fibres utilisées à cette fréquence, Après α augmente jusqu'au 4000 HZ, le résultat obtenu est de l'ordre de 0,45.

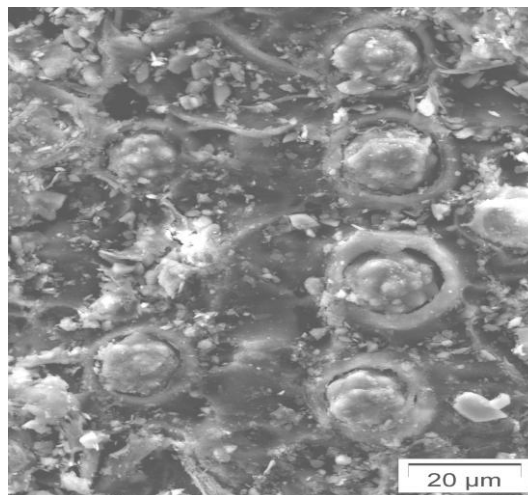


Figure V.13 : Pénétration du gypse dans les alvéoles ouvertes de la fibre du palmier.

Concernant les fibres de 30 mm de longueur, la figure V.14 montre que pour les pourcentages 1 et 1,5 %, on distingue un pic entre 125 et 2000 HZ. Lorsqu'on augmente le pourcentage à 2 %, le pic devient plus faible entre 500 et 2000HZ. Le meilleur résultat est obtenu pour le pourcentage de 1 % de fibres, le coefficient d'absorption est de l'ordre de 0,512 à 1000 HZ, le point d'inflexion à 2000 HZ est dû toujours à la caractéristique de réflexion de fibres du palmier à cette fréquence, après on a enregistré une augmentation à 4000 HZ pour tous les pourcentages.

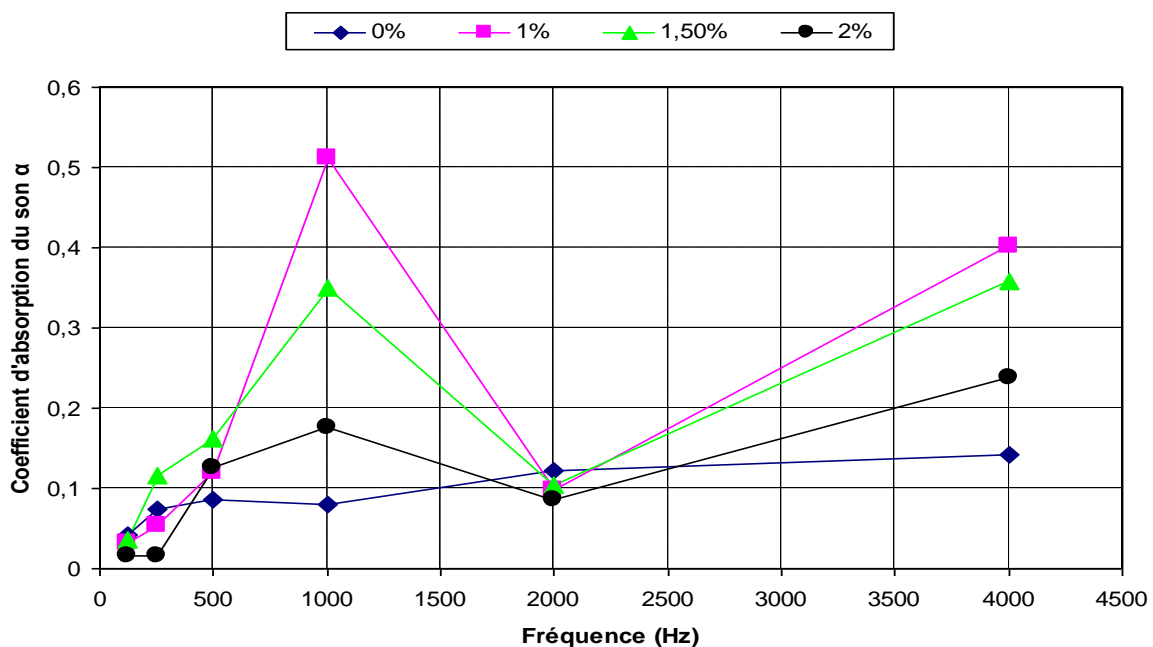


Figure V.14 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 30 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

En fin pour les fibres de 40 mm de longueurs, pour les deux pourcentages de 1% et 1,5%, on distingue deux pics entre 125 et 2000HZ, Pour le pourcentage 2%, on trouve un pic entre 125 et 1000 HZ, à partir de 2000HZ, on a enregistré une augmentation considérable du coefficient d'absorption pour les deux pourcentage 1 et 1,5%. Le meilleur résultat est obtenu à 4000 HZ et il est de l'ordre de 0,343 et cela pour un pourcentage de 1% .Fig. V. 15.

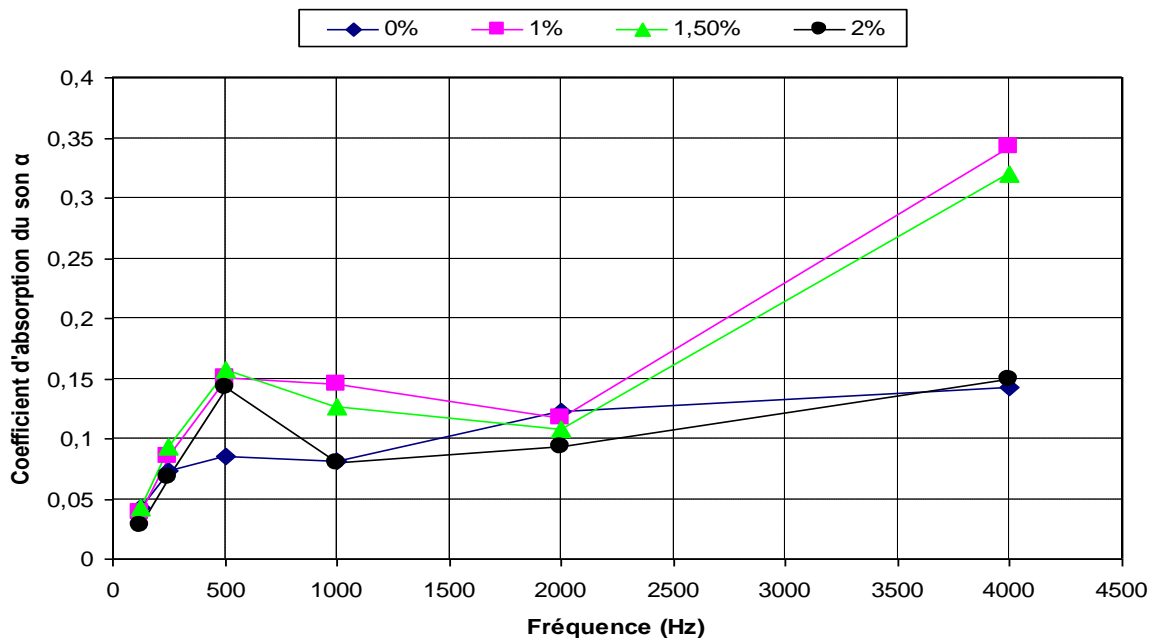


Figure V.15 : Variation du coefficient d'absorption du son avec la fréquence pour 40 mm de longueur de fibres avec différents pourcentages.

V.2. Comparaison avec d'autres matériaux

La représentation du coefficient d'absorption par octave permet de masquer les variations locales d'absorption et de travailler sur les niveaux moyens de performances.

Les valeurs d'absorption sont supérieures à 0,50 pour des bétons de plâtre renforcés avec une fraction massique de 1% de fibres pour 30 mm de longueur, ces valeurs sont élevées en comparaison avec d'autres matériaux de construction et s'expliquant par la forte porosité ouverte du matériau.

Les propriétés absorbantes de produits comme les briques. Le contre plaqué sont quasi-inexistantes ($\alpha < 0,1$), car ils sont peu perméables et ne laissent donc pas pénétrer l'onde acoustique. Le béton cellulaire bien que très poreux (de l'ordre de 80% de vides) présente une absorption limitée à 0,40. Ce résultat s'explique par le mode de fabrication de ce matériau qui conduit à des pores non connectés entre eux. Concernant notre composite possède un coefficient d'absorption de l'ordre de 0,512 et qui est inclus dans l'intervalle des coefficients d'absorption des bétons de chanvre, 0,30 à 0,55 pour des masses volumiques entre 600 à 650 kg / m^3 [7].

En revanche le béton de bois présente des coefficients d'absorption très élevés sur toute la gamme de fréquence justifiant aussi son emploi en tant que panneau acoustique.

D'après la littérature le coefficient d'absorption des bétons de bois pour des masses volumiques entre 600 et 900 kg / m³ est supérieur à 0,55.

VI. Conclusions

Le présent chapitre s'est structuré en deux parties, tout d'abord, des généralités sur le bruit dans les habitations, différents rappels théoriques sur l'acoustique et les principaux paramètres sont définis, il a été montré qu'il y'a un lien entre la porosité, la perméabilité et le comportement acoustique, et ce dernier dépend beaucoup de type de pores, occlus ou connectés et aussi la taille des pores, et que si le matériau possède une seule taille, le matériau est dit à simple porosité et si il possède deux tailles différentes le matériau est dit à double porosité, ceci influe en particulier sur l'absorption acoustique. Dans le cas d'un simple poreux, le coefficient α augmente avec la fréquence d'une manière régulière. Dans le cas du double poreux, des pics d'absorption sont observables.

Dans un second temps les propriétés acoustiques des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier ont été abordées. Le but était de déterminer, si ce matériau présentait un intérêt quelconque en tant qu'un isolant acoustique compte tenue de l'importante porosité des bétons de plâtre renforcés par les fibres du palmier dattier, les niveaux d'absorption du son ont été déterminés pour différentes formulations du matériau étudié.

On a ainsi pu tirer quelques leçons concernant ce matériau. Tout d'abord, l'essentiel pour ne pas dire la totalité de la porosité du matériau est ouverte. On a pu constater que le coefficient d'absorption du son diminue quand la fraction massique de fibres augmente, et le meilleur résultat a été obtenu pour les fibres de 30 mm pour un dosage de 1% et il est de l'ordre de 0,512, ce qui lui permet de classer notre composite dans la classe D selon la norme internationale EN ISO11654.

De plus, des pics d'absorption en basse fréquence (500 Hz) et en moyenne fréquence (1000 Hz) sont observables et ça dépend de la longueur et du dosage de fibres utilisées. Ces valeurs sont élevées par rapport à d'autres matériaux du génie civil testés dans des conditions équivalentes. Il faut cependant rester prudent avec ces niveaux de α car ils sont mesurés avec le tube de Kundt, pour un échantillon placé sur un support rigide et imperméable. Les ondes transmises à travers le matériau sont minimisées, contrairement à ce qui se passerait dans le cas d'un mur séparant deux pièces. Ensuite, une difficulté expérimentale est apparue compte tenu de la sensibilité du coefficient d'absorption à l'état de surface des échantillons. Ce qui modifie le coefficient d'absorption.

Enfin, le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier dattier présente un comportement acoustique plus proche d'un double poreux que d'un simple poreux. Ce résultat ne pourra être confirmé qu'en réalisant une caractérisation complète des grandeurs acoustiques. Ce travail expérimental devrait faire l'objet d'un futur travail de recherche.

VII. Bibliographies

- [1] **American Society for Testing and Materials.**, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, 1999.
- [2] **Yang H.S, K D.J, Kyu Lee Y., Kim H.J, Jeon J.Y., Kang C.W.**, Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. Journal of Bioresource Technology, vol. 95, 2004, pp. 61–65.
- [3] **Document Internet [File://F](#)**: l'acoustique des locaux d'écoute, matériaux absorbants, Version 29/07/2008.
- [4] **CNERIB.** Isolation acoustique des parois aux bruits aériens, règles de calcul. DTR C3.1.1. Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, 2004.
- [5] **Yilmazer S. , Ozdeniz M.B.**, The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates, Journal of Building and Environment, vol. 40, 2005, pp. 311–318.
- [6] **Astanojlovic –Davidovica A.**, Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l'emballage alimentaire. Thèse de doctorat. Université du Sud Toulon-Var, 2006, P.183.
- [7] **Cerezo V.**, Propriétés mécaniques thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales; Approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat, INSA du Lyon, 2005, P.235.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le but de nos travaux est la contribution au développement d'un matériau de construction innovant en prenant en compte les exigences du contexte environnemental actuel. Nous avons proposé d'étudier les propriétés d'usage d'un éco matériau afin de vérifier la faisabilité technique de son développement.

Donc l'objectif principal c'était plus précisément d'atteindre un composite avec des propriétés mécaniques durables et thermo-phoniquement compatibles avec les applications visées : panneaux ou blocs autoporteurs à isolation répartie.

Dans cette étude nous avons essayé de promouvoir les matériaux localement produits, notamment, le plâtre en tant que produit de substitution au ciment ou ce dernier n'est pas supprimé totalement mais utilisé rationnellement dans les parties où on doit rigidifier la structure. La chaux aérienne a été utilisée comme retardateur de prise à la place d'un adjuvant industriel. Comme renforts, on a introduit les fibres végétales du palmier dattier qui peuvent être substituées à des fibres synthétiques polymériques ou de verre. Le sable de dune et le gravier ont été aussi utilisés.

Nous avons estimé qu'il était nécessaire de faire connaître le plâtre, ses propriétés et ses qualités et de dévoiler les matériaux modernes dont la mise en oeuvre donne au plâtre une nouvelle dimension.

Après, il a été question de donner le plus complet possible, en abordant, d'une manière exhaustive et didactique, les anciennes et les nouvelles méthodes utilisées pour la caractérisation mécanique et rhéologique des bétons de fibres.

Tout ces points ont été présentés sous forme d'une synthèse bibliographique qui révèle que :

Le béton de plâtre est peu utilisé dans son ensemble dans le monde. Une absence remarquable des méthodes et des normes, bien définies, pour accéder à la caractérisation de ce matériau. En concluant que les premières orientations, pour la construction en plâtre en Algérie, peuvent être suivies et la composition de base du béton de plâtre peut être adaptée avec avantage.

Une réflexion, sur le rôle des fibres dans l'arrêt de mécanisme de fissuration, a montré la nécessité de choisir la forme et la géométrie des fibres utilisées en fonction de la

maniabilité souhaitée et en fonction du comportement mécanique étudié. Les fibres végétales résistent mal aux alcalis.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation générale des différents matériaux utilisés ainsi que la formulation des composites;

La caractérisation des matériaux utilisés montre que :

- le plâtre étudié est un plâtre de qualité et cela d'après sa teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ élevée.
- Le sable utilisé est de granulométrie continue, siliceux et propre.
- Le gravier est à base de calcaire et de granulométrie continue.
- La chaux utilisée possède deux types de calcites et joue un rôle important comme retardateur de prise et aussi dans la stabilisation du milieu basique du plâtre après la réaction de l'hydratation. Cela est très bénéfique pour éviter la corrosion des armatures dans le cas du béton de plâtre armé.
- d'après les observations au MEB, les fibres végétales du palmier dattier, utilisées comme renforts, ont une texture amorphe. En plus, elles ont une section pleine et possèdent les mêmes constituants que le bois; la présence des enchevêtrements sur leur surface assure une bonne adhésion fibre – matrice. Les fibres utilisées sont poreuses, peuvent absorber et rejeter l'eau. Cette caractéristique est très importante dans le cas des procédés de fabrication par voie humide. La masse volumique des fibres utilisées est proche de celle de la cellulose et possède un allongement à la rupture suffisant. En étudiant la compatibilité chimique de la fibre du palmier avec le milieu gypse à long terme, on a constaté qu'elle s'adapte bien à ce milieu et elle reste saine contrairement au milieu alcalin.

L'étude de la formulation des bétons de plâtre renforcés de fibres du palmier dattier est basée sur la méthode de Baron - Lesage adaptée par P.Rossi pour la formulation des bétons de fibres métalliques, sauf pour la troisième hypothèse, on a préféré l'épaississement de la pâte de plâtre par vibration et non pas par ajout de l'eau et du liant.

Une fois la problématique définie, le bilan des connaissances réalisé, les matières premières caractérisées et les composites formulées, notre travail expérimental s'est articulé autour de trois axes principaux.

Le premier axe a traité la durabilité des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres végétales du palmier dattier, l'analyse des résultats obtenus montre que :

La chaux joue un rôle important dans l'évolution des propriétés mécaniques à long terme; ce qui a été affirmé par les observations microscopiques. En plus des liaisons de van der Waals entre les cristaux, la calcite ajoute des liaisons chimiques qui renforcent la structure du matériau. On a pu obtenir une microstructure très dense, ce qui empêche l'introduction du CO_2 et stabilise la résistance mécanique à long terme.

On a pu aussi constater, d'après l'examen des faciès de rupture que les gros granulats ont un effet très important à long terme et cela par le blocage de la fissuration, ce qui est en accord avec la littérature.

La perte de la résistance mécanique dans le temps, pour les éprouvettes soumises aux cycles répétés de séchage – humidification, est due au phénomène de dissolution–recristallisation du gypse qui a changé la taille des cristaux et il a affecté les points de contact entre eux. Cette perte reste dans les marges autorisées pour les matériaux de construction.

La légère diminution de la résistance mécanique dans le temps, pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité, est due au gonflement à long terme de la structure cristalline et à l'effet néfaste de l'humidité sur les composés organiques de la fibre.

Le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier possède une meilleure résistance au gel-dégel que le béton de plâtre sans fibres.

Une excellente résistance à l'abrasion et une meilleure tenue à l'érosion a été enregistrée par le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier et cela par rapport au béton de plâtre sans fibres.

La résistance aux sulfates est médiocre pour le béton de plâtre et pour celui renforcé par les fibres du palmier; une exposition seulement d'une semaine a modifié la microstructure interne de la matrice béton de plâtre. Par contre l'acide sulfurique n'a pas modifié les propriétés mécaniques du béton de plâtre renforcé de fibres et cela après 6 mois d'exposition.

Le béton de plâtre renforcé de fibres du palmier dattier offre une meilleure résistance aux efflorescences. Le chlore de sodium ne s'est pas cristallisé sur la matrice gypse et on a pu le détecter par MEB sur la fibre. Donc reste à vérifier l'effet de la solution de NaCl sur les propriétés de fibres à long terme.

Le deuxième axe de cette étude s'est penché sur la mesure des propriétés thermo-physiques des composites étudiés, une amélioration du pouvoir isolant a été enregistrée avec l'augmentation des proportions en poids des fibres utilisées et cela est due à la forte porosité des matériaux étudiés. L'application des modèles mathématiques, tels que l'homogénéisation auto cohérente et le modèle de Assaad, a permis de confirmer que les conductivités thermiques obtenues à partir de la technique du sonde anneau sont relativement représentatives et les écarts observés dans certains cas pourront être liés à l'idéalité des modèles choisis.

Concernant le troisième axe, il a été orienté vers l'absorption acoustique des matériaux et l'étude du comportement en absorption des bétons de plâtre renforcés avec des fibres du palmier a été privilégiée ainsi. Les valeurs et les niveaux d'absorption ont été déterminés pour différentes longueurs et dosages de fibres. L'analyse des résultats montre que le coefficient d'absorption du son est influencé par le dosage et par la structure alvéolaire des fibres utilisées. En plus, le composite étudié possède de meilleures performances acoustiques par rapport à certains matériaux tels que les bétons cellulaires, les bétons hydrauliques et sont comparables au béton de bois qui a un pouvoir absorbant deux à trois fois plus élevé que celui des autres matériaux rencontrés usuellement dans la construction.

Il faut noter aussi que l'augmentation du coefficient d'absorption des bétons de fibres par rapport au béton de plâtre seul est due à l'augmentation de l'interconnexions entre les

pores par l'incorporation des fibres, chose déjà affirmée par la littérature et qui peut faire l'objet d'une future étude.

On signale que notre matériau a été déjà utilisé pour la réhabilitation de Zaouïa Tijania de Guemar, qui a été construite entièrement en gypse et ses dérivés.

Enfin, nous espérons que cette étude contribuera à la promotion et à une large diffusion des éléments à base de plâtre, bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres végétales du palmier dattier.

Recommandations et perspectives

Recommandations et perspectives

A la lumière des résultats obtenus, la présente étude peut être une étape préliminaire pour la caractérisation des bétons de plâtre et ceux renforcés par les fibres du palmier dattier localement produits. Il est recommandé de compléter ce travail par l'examen d'autres comportements et phénomènes tels que :

- Le comportement à la traction directe et la résistance au choc, la résistance à la fatigue ainsi que le phénomène de retrait et de fluage.
- Il est primordial de passer de l'analyse expérimentale et micromécanique du comportement des fibres dans la matrice à une modélisation numérique de la fissuration du béton de fibres et qui peut être un outil pour les concepteurs d'ouvrages dans un objectif de prédimensionnement.
- L'étude du comportement thermo-physique des bétons étudiés en fonction de leur destination, notamment le cas des murs extérieurs d'une habitation en milieu aride (cas de Laghouat) afin de minimiser l'effet des facteurs climatiques extérieurs. Une application théorique par simulation par un logiciel **Energy plus** ou le logiciel **Trnsys** est nécessaire pour déterminer les températures de surfaces intérieures et extérieures du mur et de la technique constructive. Ces deux températures, de limites du mur, nous permettent de déterminer le temps de retard et le facteur d'amortissement afin d'apprécier le comportement thermo-physique du mur et par conséquent sa contribution à l'amélioration du niveau de confort thermique.
- Modélisation des propriétés acoustiques et l'utilisation d'autres méthodes pour la détermination du coefficient d'absorption acoustique.

Annexes

ANNEXE (I)

L'analyse physico-chimique de l'eau de gâchage est faite au laboratoire de l'EPDEMIAS de Laghouat dont les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 1: Résultats de l'analyse de l'eau utilisée.

Origine	Eau robinet	/	/	Bactériologie	
Date de prélèvement	07.08.2006	T°C	/	N° des germes totaux	
Date d'envoi	07.08.2006	N° Echt	812	Coliformes	
Ca en mg/litre (Calcium)	156	Balance cations mé/l	7,8	Escherichia coli	
Mg en mg/litre (Magnésium)	51		4,1	Streptocoques fécaux	
Na en mg/litre (sodium)	86		3,74	Sulfito-réducteurs	
K en mg/litre (Potassium)	6		0,4	Bactériophage fécaux	
Cl en mg/litre (Chlorures)	151,7	Balance anions mé/l	4,28	Autres germes	
SO4 en mg/litre (Sulfates)	480		10		
CO3 en mg/litre (Carbonate)					
HCO3 en mg/litre (Bicarbonat)	100,7		1,65		
NO3 en mg/litre (Nitrates)	17,5		0,28	Turbidité en NTU	1,2
Conductivité En 1/10 ms/cm à 25°C	16,79	Minéralisation 1140 mg/l		TDS en mg/litre	838
				Salinité ‰	0,8
Résidu sec à 180°C	1175 mg/l	Somme des ions 1049 mg/l		TEST CHLORE en mg/l	< 0,02
				Couleur 436 nm	2,3 m-1
T.H T.A.C	T.A	S.A.F	I.S	T=30,8°C PH=7,5	
60°F 8,25°F	/	39,7°F	71,4°F	RSA=1,52	
Nitrite NO2		Eléments Toxiques ou Indésirables Mg/litre	Chrome		
Ammonium NH4			Cu comb		
Indice de KMnO4			Cu total		
CO2 total			Zinc		
Pourcentage de saturation en O2 %			Mn		
Oxygène dissous O2	9,4 mg/l		Aluminium		
Phosphate PO4			Ozone		
MES en mg/litre			Iode	0,35	
Fer dissous	Mg/l		Brome	> 0,25	
PH (Laboratoire)	7,5		SiO2dissoute	3,7	
			H2S		
GRAPHIQUE 2 mé/litre %					
Cations	Ca=24,3%	Mg=13,06%	Na=11,63%	K=0,46%	Facès de l'eau
Anions	Cl=13,35%	SO4=31,1%	HCO4=5,13%	NO3=0,87%	Sulfatée-Calcique
INTERPRETATION DE L'ANALYSE		POTABILITE CHIMIQUE : PASSABLE			

ANNEXE (I)

D'après la norme Algérienne, les résultats obtenus de l'analyse de l'eau confirme sa potabilité, et cela comme le montre les graphes ci-dessous.

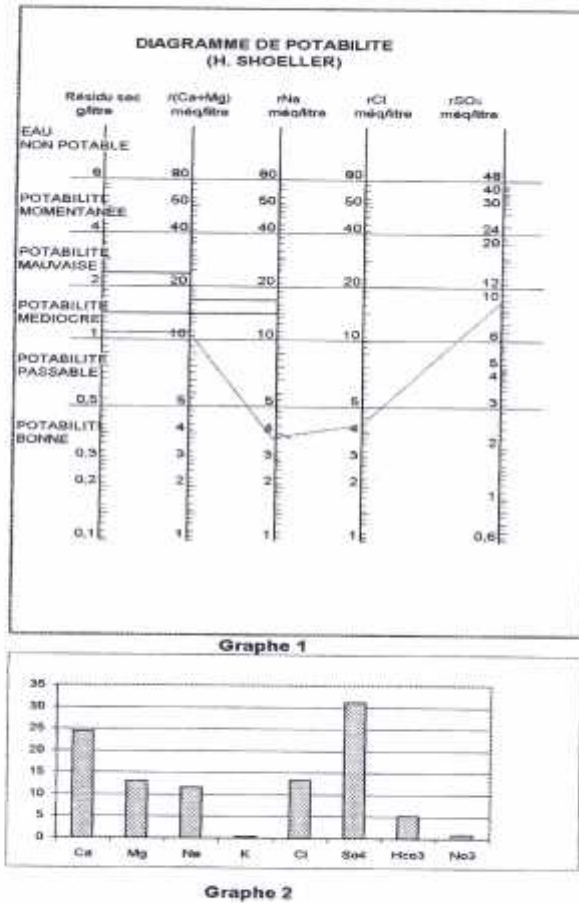


Figure 1: Diagramme de potabilité de l'eau

ANNEXE (II)**Tableau 1** : Valeurs des températures en °C.

Type d'échantillon	Pic1	Pic2	Pic3	Pic4
Béton de plâtre à 28 j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	153	201	917	907
Béton de plâtre à 28 j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	157	203	795	917
Béton de plâtre avec fibres à 28j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	197	203	803	917
Béton de plâtre avec fibres à 28j air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	183	202	819	885
Béton de plâtre à 208j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	153	203	785	907
Béton de plâtre à 208 j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	147	207	795	897
Béton de plâtre avec fibres à 208 j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	156	202	778	882
Béton de plâtre avec fibres à 208j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	162	206	798	920
Béton de plâtre (90 cycles de séchage-humidification, Cœur de l'échantillon).	208	-	785	893
Béton de plâtre (90 cycles de séchage-humidification, Surface de l'échantillon).	197	-	799	887
Béton de plâtre avec fibres (90 cycles de séchage- humidification, Cœur de l'échantillon).	149	189	805	889
Béton de plâtre avec fibres (90 cycles de séchage- humidification, Surface de l'échantillon).	155	179	801	913

ANNEXE (II)**Tableau 2 : Pertes de poids et les températures de démarrage des différents échantillons étudiés.**

Type de l'échantillon	Température de démarrage en C°	Masse initiale (g).10 ⁻³	Perte en masse en(g)
Béton de plâtre à 28 j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	15	600	0.160
Béton de plâtre à 28 j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	15	600	0.024
Béton de plâtre avec fibres à 28j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	15	600	0.263
Béton de plâtre avec fibres à 28j air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	15	600	0.024
Béton de plâtre à 208j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	15	600	0.293
Béton de plâtre à 208 j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	15	600	0.279
Béton de plâtre avec fibres à 208 j (air ambiant du labo. Cœur de l'échantillon).	14	600	0.247
Béton de plâtre avec fibres à 208j (air ambiant du labo. Surface de l'échantillon).	14	600	0.304
Béton de plâtre (90 cycles de séchage-humidification, Cœur de l'échantillon).	15	600	0.060
Béton de plâtre (90 cycles de séchage humidification, surface de l'échantillon).	15	600	0.052
Béton de plâtre avec fibres (90 cycles de séchage- humidification, cœur de l'échantillon).	17	600	0.175
Béton de plâtre avec fibres après 90 cycles de séchage- humidification (surface de l'échantillon).	17	600	0.290

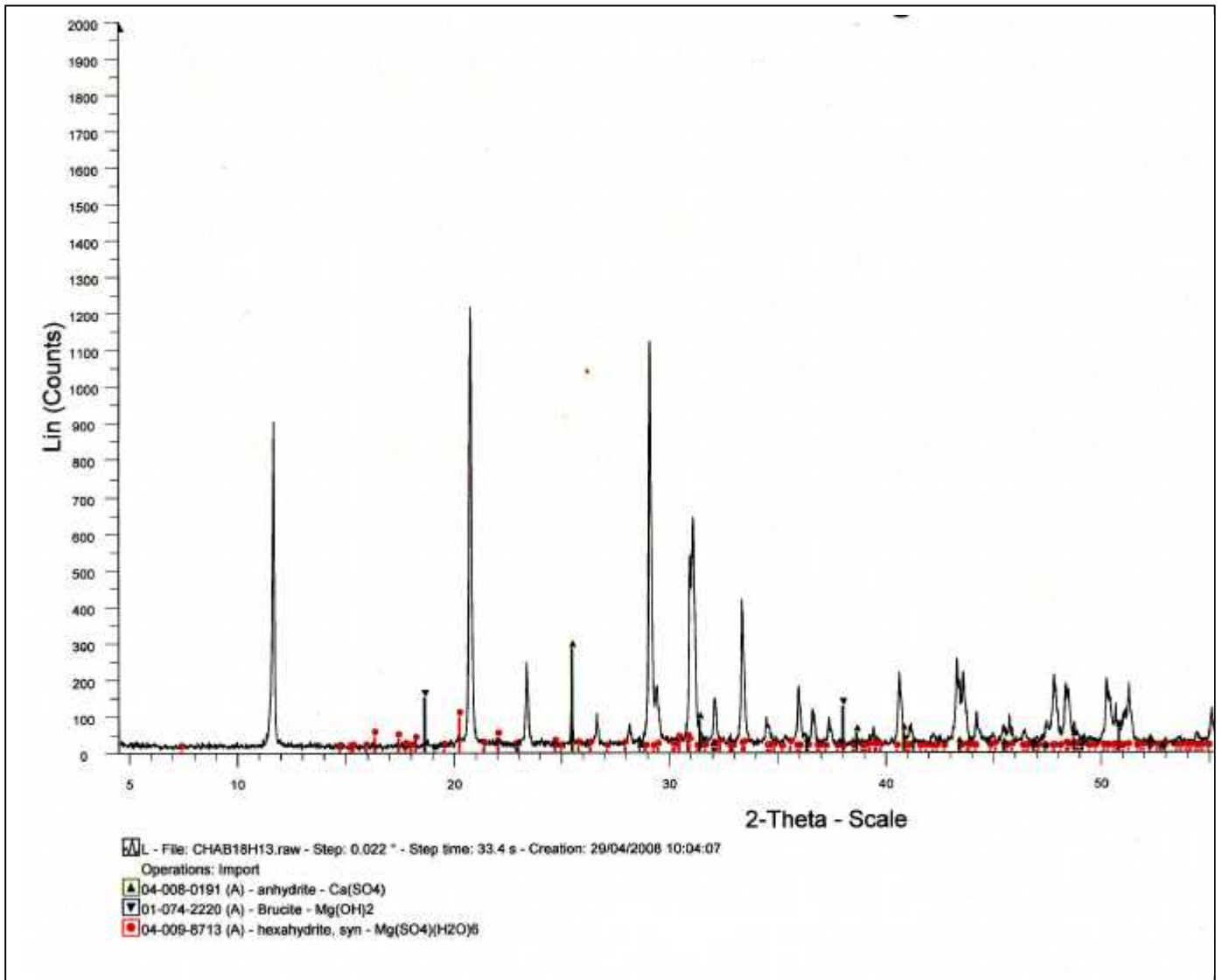
ANNEXE (II)

Figure 1: Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre avec fibres du palmier conservée dans la solution MgSO₄.

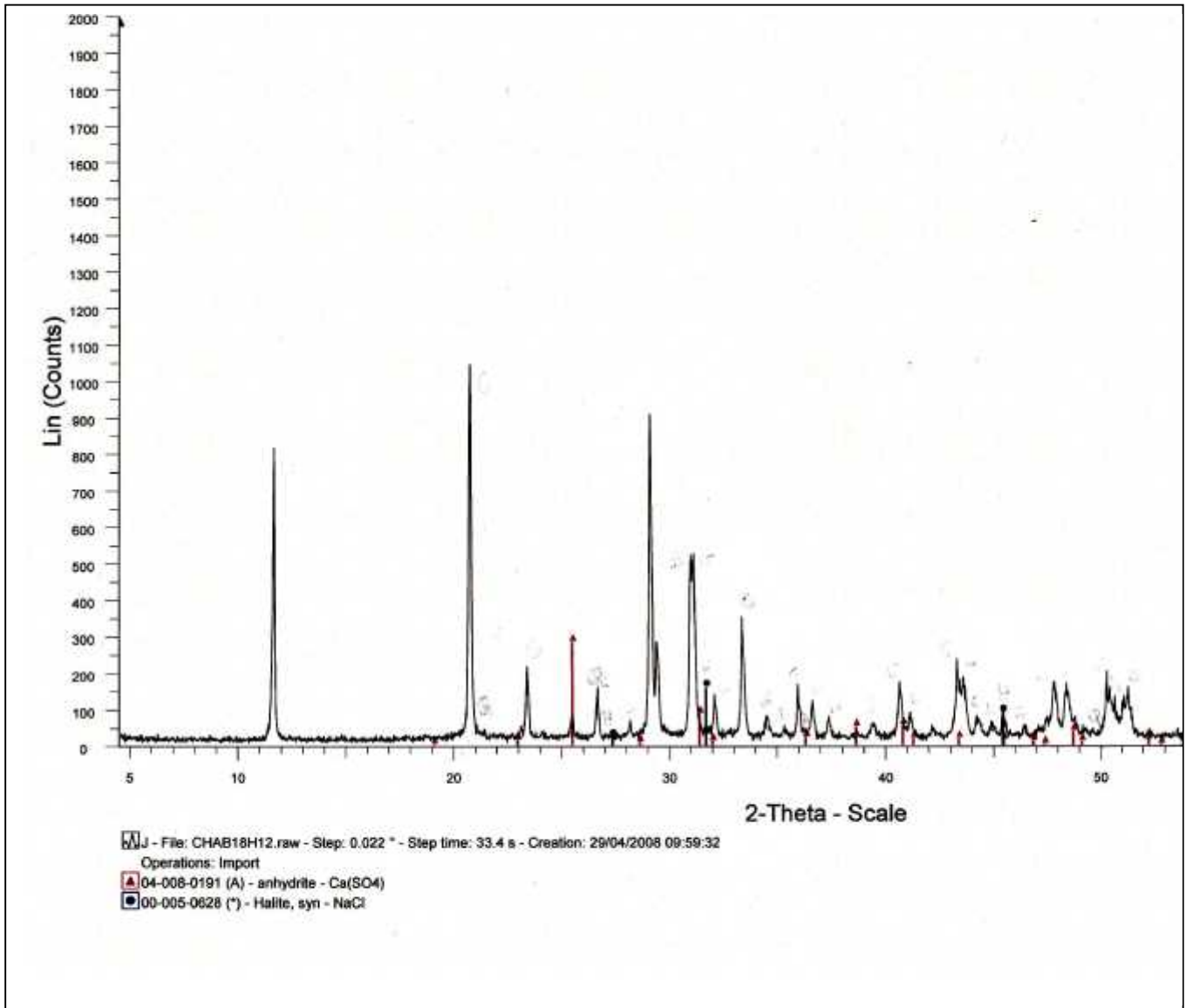
ANNEXE (II)

Figure 2: Diffractogramme de la poudre du béton de plâtre soumis à l'essai d'efflorescence.

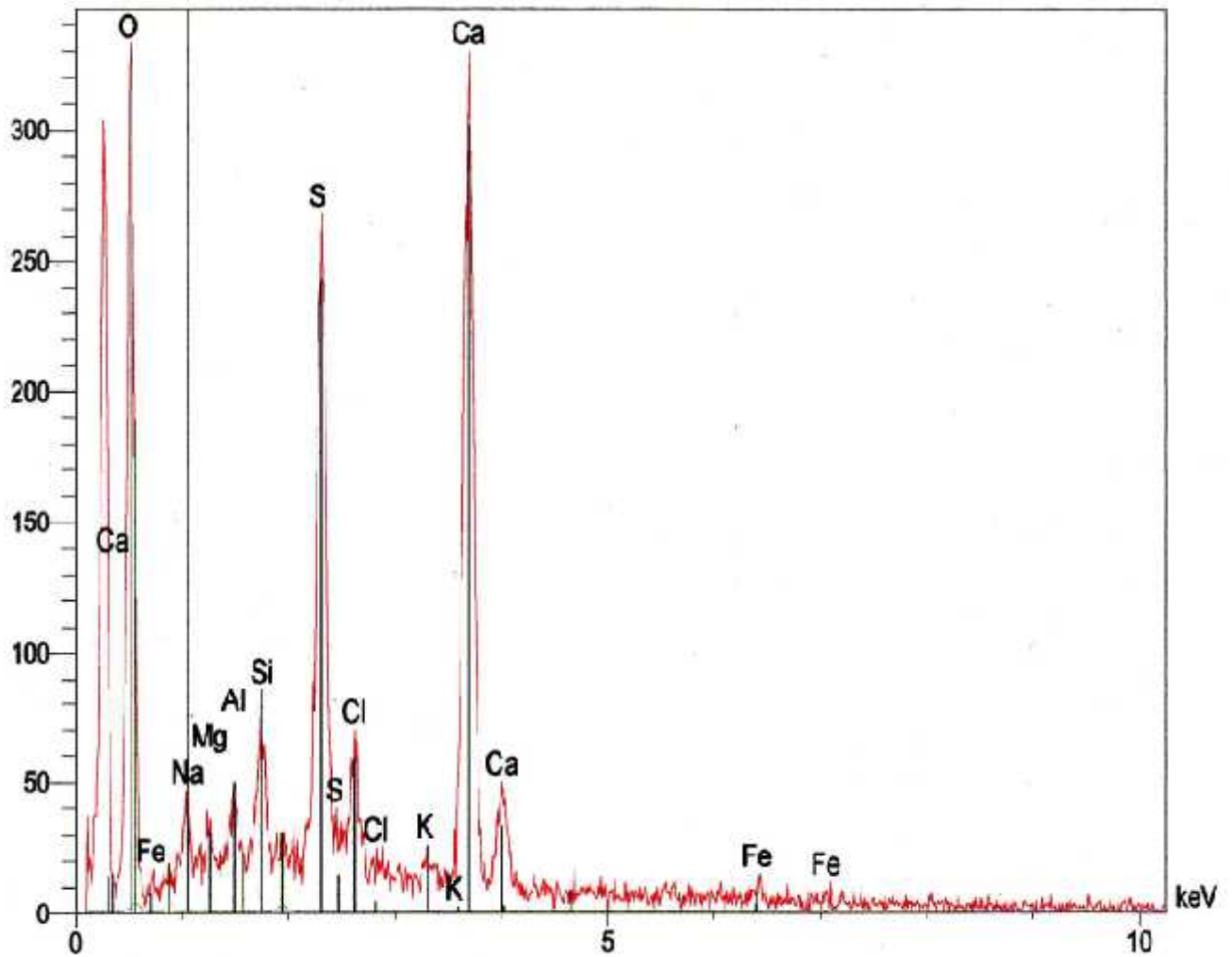
ANNEXE (II)

Figure 3: Microanalyse de l'échantillon du béton de plâtre soumis à l'essai d'efflorescence.