



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



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTÉ: GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE**

**DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL**

### **MÉMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : MHISSAT Sabrine & MAHÇAR Nour Nouha**

**DOMAINE : Science et Technologies**

**FILIERE : GENIE CIVIL**

**OPTION : Matériaux en Génie Civil**

### **Thème**

*Etude physico-mécanique d'un mortier de réparation à base des matériaux locaux renforcé par des fibres de sisal*

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
Mr. LAKHDARI Mohammed Fatah	M.A.A	Président
Melle. DJOUDI Amina	M.C.B	Examinatrice
Mr. KROBBA Benharzallah	M.A.A	Rapporteur
Mme. KOUIDRI Zohra	M.A.A	Co-rapporteur

**Promotion : Juin- 2019**

## *Remerciement*

Tout d'abord nous tenons à remercier **Dieu le tout puissant et miséricordieux**, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr KROBBA Benharzallah**, pour sa patience, sa disponibilité, son encouragement et surtout son aide et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à notre Co-encadreur de mémoire, **Mme KOUIDRI Zohra** de nous avoir orienté, aidé et conseillé.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à **Mr LAKHDARI Mohammed Fatah** et **Mlle DJOUDI Amina**, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse.

Nos grands remerciements vont également à l'ensemble du **personnel du laboratoire de Génie civil** de Laghouat, l'ensemble du **personnel du laboratoire de Génie Mécanique** de Laghouat. Ainsi qu'à l'ensemble du personnel du **Bibliothèque** de l'Université de Laghouat, pour leurs aides et leur disponibilité.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de notre respect le plus profond et notre affection la plus sincère.

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire a*

*Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur amour infini, leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.*

*Ma chère sœur et mes chers frères, Sara, Nidhal et Younes, pour leur soutien et encouragement.*

*A l'âme de mes oncles Kouïder, Djamel et ma grand-mère Fraïha.*

*Mes très chères cousines, Sabrine et Fraïha.*

*Mes meilleures amies, Aïcha, Lina et Affaf, merci d'être toujours là pour moi.*

*Ryma et Yasmine, pour avoir toujours m'aider et m'encourager.*

*A ma binôme Sabrine, ainsi que sa famille.*

*A toute la famille Mahçar et Elhouiti.*

*A tous ceux que j'aime.*

*Nouha*



# Dédicace

*Je dédie cet ouvrage*

*A mes parents qui m'ont soutenue et encouragée durant ces années d'études. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes sœurs et frères, mes grands parents et à tous qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement, supportée et encouragée tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A ma binôme NOUHA et Sa famille*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès*

*A tous ceux qui j'aime.*

*Sabrina*

## **Table de matières**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Résumé**

**INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1**

### **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

I.1 Introduction.....	4
I.2. Principes fondamentaux.....	5
I.2.1. Compatibilité.....	5
I.2.2. Concept de compatibilité.....	6
I.2.2.1. Compatibilité déformationelle .....	6
I.3. Facteurs influençant la compatibilité dimensionnelle d'une réparation en béton.....	7
I.3.1. Module d'élasticité .....	7
I.3.2. Retrait.....	8
I.3.2.1 Retrait plastique.....	9
I.3.2.2 Le retrait de séchage.....	9
I.3.2.3 Retrait endogène.....	9
I.3.2.4 Le retrait thermique .....	10
I.3.3. Fluage.....	10
I.3.4. Dilatation thermique.....	11
I.4. Les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationelle.....	11

I5. Exigences de performance pour les réparations structurales et non structurales .....	12
I6 Différents types du mortier de réparation .....	13
I7 Les constituants d'un mortier de fibre.....	14
I.7.1 Le sable.....	14
I.7.1.1 Sable alluvionnaire .....	15
I.7.1.2 Sable calcaire .....	15
I.7.1.3 Sable de dune .....	16
I.7.2 Ciment.....	16
I.7.3 Eau de gâchage .....	16
I.7.4 Fibres.....	17
i. Types de fibres.....	17
A.1. Classification des fibres végétales.....	18
A.2. Extraction des fibres végétales.....	19
A.3 Disponibilité des fibres végétales .....	20
A.4 Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	20
A.5 Fibre de sisal .....	21
I8. L'effet des constituants d'un mortier sur ces performances .....	23
I8.1 Effet de type de sable .....	23
I8.2 Effet de fibres végétales .....	24
I.8.2.1 Effet d'ajout des fibres sur les résistances mécaniques .....	24
I.8.2.2. Effet d'ajout des fibres sur le retrait .....	26
I8.2.3 Effet d'ajout de fibres sur le module d'élasticité dynamique .....	27
I8.2.4 Effet d'ajout de fibre sur l'absorption d'eau.....	27
I.8.3 Effet d'ajout des fibres de sisal.....	28
I.9 Conclusion.....	29

**Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales**

II.1 INTRODUCTION .....	30
II.2 Matériaux utilisés.....	30
II.21 Ciment.....	30
a) Caractéristiques physiques du ciment.....	31
b) Caractéristiques mécaniques du ciment .....	32
II.22 Sables .....	32
a) Caractéristiques physiques .....	33
b) Caractéristiques chimiques .....	39
II.23 Eau de gâchage .....	40
II.24 Adjuvant.....	41
II.25 Fibres .....	41
II.3 Méthodes expérimentales.....	44
II.31 Procédure de malaxage .....	44
II.32 Essais effectués sur les mortiers à l'état frais.....	45
a) Etalement au mini cône .....	46
II.33 Essai effectués sur les mortiers à l'état durci .....	46
a) Confection et cure des éprouvettes .....	46
b) Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés .....	47
i. Variations dimensionnelles (retrait).....	47
ii. Résistances mécaniques .....	48
iii. Absorption d'eau par capillarité .....	53
iv. Auscultation sonique .....	53
v. Porosité totale.....	54
II.4 Conclusion.....	55

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1 Introduction.....	56
III.2. Formulation d'un mortier auto plaçant (MAP) témoin.....	56
III.2.1 Optimisation de squelette granulaire de sable (sable de dune – sable calcaire).....	57
III.2.2 Détermination de la composition.....	58
III.3 Optimisation de dosage des fibres.....	59
III.3.1 Effet de dosage et de longueur des fibres sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers .....	61
III.3.1.1 Porosité totale .....	61
III.3.1.2 Le module d'élasticité dynamique( $E_d$ ) .....	63
III.3.1.3 La résistance à la traction par flexion .....	64
III.3.1.4 La résistance à la compression .....	65
III.3.1.5 Le retrait .....	66
III.4 Effet de mélange.....	69
III.4.1 Modèles des réponses .....	71
a. Résistance à la compression.....	71
b. Résistance à la flexion.....	72
c. Module d'élasticité .....	74
d. Coefficient d'absorption.....	75
e. Retrait à 2 jours.....	77
f. Retrait à 28 jours.....	78
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>81</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>85</b>

## *Table des matières*

---

## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tableau I. 1.Exigences de performance pour les réparations structurales et non structurales.	12
Tableau I. 2.Exigences générales de compatibilité entre les matériaux de réparation et le vieux béton (substrat) .....	13
Tableau I. 3.Propriétés des matériaux de réparation de béton typique .....	14
Tableau I. 4.Différents types de fibres.....	17
Tableau I. 5.Comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres végétales .....	20
Tableau I. 6.Propriétés des fibres de sisal.....	22

### **Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentales**

Tableau II. 1.Composition chimique et propriétés physiques de ciment et MP[43].....	30
Tableau II. 2.caractéristiques physiques du ciment .....	32
Tableau II. 3. Résistances à la compression et à la flexion du ciment.....	32
Tableau II. 4.Analyse granulométrique des sables .....	34
Tableau II. 5.Module de finesse des deux sables .....	35
Tableau II. 6.Classement des sables .....	35
Tableau II. 7.Masses volumiques apparentes .....	36
Tableau II. 8.Masses volumiques absolues.....	37
Tableau II. 9.Compacité des sables .....	37
Tableau II. 10.Absorption d'eau des sables .....	37
Tableau II. 11.Valeurs d'équivalent de sable.....	38
Tableau II. 12.Classe de propreté d'équivalent de sable.....	39
Tableau II. 13.Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques des fibres utilisées.....	43

### **Chapitre III Résultats et discussions**

Tableau III. 1. Ajustement de dosage du Sp pour un litre de volume .....	59
Tableau III. 2. Constituants de différents types de mortiers/m <sup>3</sup> .....	60
Tableau III. 3. Désignation des différentes compositions utilisées .....	61
Tableau III. 4. Mortier fibré choisi .....	69
Tableau III. 5. Constituants de différents types de mortiers .....	70
Tableau III. 6. Résistance a la compression a 28 jours .....	71
Tableau III. 7. Résistance a la traction par flexion a 28 jours.....	73
Tableau III. 8. Module d'élasticité a 28 jours .....	74
Tableau III. 9. Coefficient d'absorption d'eau par capillarite a 28 jours.....	76
Tableau III. 10. Retrait a 2 jours.....	77
Tableau III. 11. Retrait a 28jours .....	79

## Liste des figures

### Chapitre I : synthèse bibliographique

Figure I. 1. Facteurs influençant la compatibilité d'une réparation en béton [2].....	6
Figure I. 2. Effets d'une inadéquation des modules élastiques. (a) Charge parallèle à l'interface (b) Charge perpendiculaire à l'interface [3].....	8
Figure I. 3. Phénomène de retrait. [8].....	8
Figure I. 4. Classification des fibres végétales. [26].....	19
Figure I. 5. Processus principales de production des fibres de sisal. [23] .....	22
Figure I. 6. Revue de l'application du béton armé en sisal. [31].....	23
Figure I. 7. Résistance à la compression(a) et à la flexion(b) des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant.[33] .....	24
Figure I. 8.Résistance a la compression et à la flexion du plâtre.[35] .....	25
Figure I. 9.Variation de retrait.[38] .....	26
Figure I. 10 .....	27
Figure I. 11. Performance du béton avec et sans fibres de cellulose sur le retrait plastique.....	27
Figure I. 12 Effet d'ajout des fibres sur l'absorption d'eau.[40] .....	28
Figure I. 13.Variation du retrait plastique du mortier renforcé par les fibres de sisal et de polypropylène[41] .....	29

### Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentales

Figure II. 1. Les différents sables utilisés.....	33
Figure II. 2. Courbes granulométriques des deux types de sable.....	34
Figure II. 3. Essai d'équivalent de sable .....	38
Figure II. 4. Diffractogrammes aux rayons X de sable de dune .....	40
Figure II. 5. Diffractogrammes aux rayons X de sable calcaire .....	40
Figure II. 6. Découpage des fibres de sisal suivant des longueurs différentes .....	41
Figure II. 7. Les fibres de sisal découpées .....	42
Figure II. 8. Presse de traction.....	42

Figure II. 9. Loi de comportement à la traction des fibres de sisal .....	43
Figure II. 10. Malaxeur de capacité de 5 litres .....	44
Figure II. 11. Moule tronconique.....	44
Figure II. 12. Séquence de malaxage.....	45
Figure II. 13. Essai d'étalement au mini cône .....	46
Figure II. 14. Mode de conservation des éprouvettes .....	47
Figure II. 15. Dispositif de retrait .....	48
Figure II. 16. Dispositif pour l'essai de flexion par trois points .....	49
Figure II. 17. Essai de traction par flexion .....	50
Figure II. 18. Dispositif de rupture en compression .....	50
Figure II. 19. Essai de compression.....	51
Figure II. 20. Schéma d'essai d'absorption d'eau par capillarité .....	52
Figure II. 21. Etanchéifier les éprouvettes par un film plastique adhésif .....	52
Figure II. 22. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.....	53
Figure II. 23. Appareil d'auscultation dynamique (ultra sonique).....	55
Figure II. 24. Des éprouvettes cubiques pour l'essai de la porosité .....	55

### **Chapitre III Résultats et discussions**

Figure III.1. Evolution de la compacité de mélange en fonction du taux de substitution de sable calcaire.....	57
Figure III. 2. Etude comparative de la porosité totale des différents types de mortier.....	62
Figure III. 3. Effet de dosage et de longueur de fibres sur le module d'élasticité dynamique( $E_d$ ) à 28 jours .....	63
Figure III. 4. Effet de dosage et de longueur de fibres sur la résistance à traction par flexion à 28 jours.....	64
Figure III.5. Vue microscopique des échantillons.....	65
Figure III. 6. Effet de dosage et de longueur de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours.....	65
Figure III. 7. Evolution de retrait total en fonction de temps .....	66
Figure III. 8. Etude comparative de retrait entre les différents types de mortiers : (a) à 2 jours ; (b) à 4 jours ; (c) à 7jours ; (d) à 14jours (e) à 28jours (f) à 90 jours .....	68

## *Liste des figures*

---

---

Figure III. 9. Courbes isoréponses de la résistance a la compression a 28 jours par graphique ternaire .....	72
Figure III. 10. Courbes isoréponses de la résistance a la traction par flexion a 28 jours par graphique ternaire .....	73
Figure III. 11. Courbes isoréponses du module d'élasticité a 28 jours par graphique ternaire. .....	75
Figure III.12. Courbes isoréponses de coefficient d'absorption d'eau par capillarite a 28 jours par graphique ternaire.....	76
Figure III. 13. Courbes isoréponses du retrait a 02 jours par graphique ternaire.....	78
Figure III. 14. Courbes isoréponses du retrait a 28 jours par graphique ternaire.....	79

## *Liste des figures*

---

## ملخص

في السنوات الأخيرة، ظهر اهتمام واضح لاستعمال المواد المحلية والموارد الطبيعية المتجددة في مجال البناء والإشغال العمومية وهذا لتلبية الحاجة الهائلة لمواد البناء والمساهمة في التنمية المستدامة.

ان تقوية المونة بواسطة الالياف أصبحت أكثر استخداما وذلك لتحسين أدائها الميكانيكي لا سيما مقاومة الشد والتشققات وهذا بهدف استعمالها في مجال الإصلاح.

في هذا الإطار تهدف هذه الدراسة الى المشاركة في تطوير خلطة لمونة اصلاح ذات قاعدة رمل كثبان ورمال كلسية لهذا دراسة تجريبية تمت لإيجاد التركيبة للمونة ثم تمت دراسة تأثير إضافة الالياف سيزال على الخصائص الفيزيوميكانيكية للمونة المتحصل عليها.

من اهم النتائج المتحصل عليها أظهرت التأثير الإيجابي للألياف المضافة على الانكماش والمقاومات الميكانيكية للمونة.

**الكلمات المفتاحية:** المونة، رمل الكثبان، الرمال الكلسية، الياف السيزال، الانكماش، المقاومة الميكانيكية.

## Abstract

In recent years, great interest has been oriented towards the use of local materials and renewable natural resources in building and public works. This is to satisfy the enormous need for these materials and contribute to sustainable development. Hence, the technique of reinforcing building materials, in this case of repair mortars with fibres has developed and become more and more used in order to improve their mechanical performances, in particular their tensile strengths and cracking whose purpose is to use it in repair field. In this context, the objective of this work is to contribute to the formulation of a repair mortar based on sand dunes and limestone sand. At first part of the work, an experimental investigation was carried out to determine the optimal of the constituents of the mortar.

In the second part, the effect of adding sisal fibre on the physical-mechanical behaviour of optimised mortar was assessed. One of the remarkable results obtained is that the favourable effect of sisal fibre on the shrinkage and strength of the mortar.

**Keywords:** Repair mortar, dune sand, limestone sand, sisal fibre, shrinkage, mechanical strength.

## Résumé

Depuis quelques années, un grand intérêt s'est orienté vers l'utilisation des matériaux locaux et les ressources naturelles renouvelables dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Ceci pour satisfaire le besoin énorme de ces matériaux et contribuer au développement durable. D'où, la technique du renforcement des matériaux de constructions, en l'occurrence les mortiers, par des fibres s'est développée et devenue de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration dont le but de l'utiliser dans le domaine de réparation. Dans ce cadre, l'objectif de notre travail est de contribuer à la formulation d'un mortier de réparation à base de sable des dunes et sable calcaire. A cet effet, une première investigation expérimentale portant sur l'optimisation des constituants du mortier a été effectuée, ensuite l'effet d'adjonction des fibres de sisal sur le comportement physico-mécanique de ce mortier optimisé a été appréhendé. L'un des résultats les plus remarquables que nous avons obtenu est celui de l'effet favorable des fibres de sisal sur le retrait et les résistances mécaniques du mortier.

**Mots clés :** Mortier de réparation, sable de dune, sable calcaire, fibre de sisal, retrait, résistances mécaniques.

# **Introduction générale**

---

Au milieu du développement des matériaux composites, le mortier ne fait pas exception, les chercheurs et les producteurs de fibres ont pensé à l'incorporation de ces dernières comme matériaux de renforcement dans les matrices cimentaires. Depuis lors, l'utilisation des fibres dans le mortier est devenue de plus en plus une pratique courante. Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces mortiers fibrés, à limiter et à contrôler la fissuration et à améliorer la résistance d'où vient l'idée ingénieuse d'utiliser ces mortiers pour les travaux de réparation des constructions et par cela augmenter leurs durées de vie.

Au cours de ces dernières années, certain nombre de constructions en béton armé nécessitent des réparations ou des reconstructions, alors la réparation a fait l'objet de nombreuses recherches, donc dans la réparation des constructions en béton plusieurs applications ont été recensées à travers le monde concernant divers éléments structuraux.

Sur les structures à réparer, on pourra alors relever un endommagement allant du défaut local (fissures, épaufrures...), à des délaminages importants et des attaques chimiques. L'un des aspects les plus importants du problème est celui des matériaux de réparation fiables répondant aux critères de durabilité, de compatibilité et d'économie.

Notre travail s'inscrit dans cette optique en se fixant pour objectif une contribution à la formulation d'un mortier de réparation à base des matériaux locaux disponibles et à faible coût (sable de dune, sable calcaire et fibres naturelles). Le sable de dune est disponible en grande quantité dans le Sahara en couvrant plus de 60% de la superficie de l'Algérie. Récemment, il y a eu un intérêt croissant pour les dunes de sable comme matériau de construction.

Les sables de concassage présentent sans aucun doute la meilleure alternative par rapport au sable alluvionnaire. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes et à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « déchets », car ils sont riches en fines. Ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.

Sur cela, dans le cadre du développement durable des efforts considérables sont réalisés par les chercheurs afin de développer des matériaux de construction économiques et qui respectent l'environnement "eco-friendly". Parmi ces matériaux écologiques, les fibres végétales. L'utilisation des fibres végétales continue d'augmenter en raison de leurs avantages : faible coût, propriétés mécaniques élevées, de plus, la disponibilité des plantes à fibres dans les pays sous-

développés lui permet de produire les fibres végétales avec peu de technologie et une faible quantité d'énergie grise.

Le premier objectif de ce travail expérimental porte essentiellement sur l'utilisation de sable de dune et sable calcaire dans le but d'améliorer les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques du mortier. De plus l'intégration de ces matériaux dans le domaine de la construction contribue à valoriser des ressources naturelles locales.

Le deuxième objectif de cette étude est basé sur une idée d'exploitation très intéressante des fibres naturelles de sisal (*Agave sisalana*) et de les utiliser avec de différents pourcentages et longueurs dans la formulation des mortiers afin d'améliorer les caractéristiques physico-mécaniques (retrait, compression, traction, flexion...). Bien que la fibre de sisal n'est pas une production de notre pays, elle présente un intérêt économique vue sa disponibilité et son faible cout, elle peut même concurrencer d'autres fibres végétales locales qui nécessite une extraction et un traitement couteux.

Par la suite, proposer des solutions pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers de réparation par le mélange de différentes longueurs et pourcentages de fibres dans la formulation de ces derniers.

Le présent travail s'articule sur les points suivants :

- 1) Après une revue bibliographique sur le thème, objet du premier chapitre ou la synthèse a traité plus de 60 références bibliographiques et c'est intéressé particulièrement à :
  - L'étude de la compatibilité entre mortier de réparation et construction réparée.
  - L'effet des différents constituants (sables, fibres) sur les mortiers, cette partie porte sur les principaux travaux et recherches traitant ce point.
- 2) Nous avons consacré le deuxième chapitre à la caractérisation physico-chimique des constituants élémentaires utilisées dans cette étude, à savoir : le ciment, les deux sables, les fibres de sisal et l'eau. Ainsi que quelques modes opératoires utilisées dans la caractérisation.
- 3) La recherche d'optimisation du mélange fait l'objet du troisième chapitre. En premier lieu, lieu l'ajustement du dosage de superplastifiant, pour fixer la composition du mortier témoin.
- 4) La composition du mortier témoin étant obtenue nous avons procédé à l'effet de l'adjonction des microfibres de sisal aux mélanges. Le travail comporte un premier volet consacré à la recherche du pourcentage optimal de fibres et un deuxième volet sur l'utilisation du

pourcentage optimal ainsi obtenu pour étudier l'effet des mélanges à différentes longueurs de fibres.

5) Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats obtenus sur les différents mortiers, à savoir :

- Résistance à la traction par flexion et à la compression.
- Retrait.
- Absorption d'eau par capillarité.
- Module d'élasticité dynamique.
- Porosité.

Le mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise le travail expérimental effectué.

# **CHAPITRE I**

## **Synthèse bibliographique**

---

### **I.1 Introduction**

Ce chapitre s'intéresse tout d'abord à la recherche bibliographique sur les principales notions traitées dans notre étude, Nous allons donner une présentation générale sur la réparation des constructions de génie civil ;et également sur les problèmes des réparation (la compatibilité), Nous allons faire aussi une synthèse sur les différents matériaux de réparation ,plus particulièrement qui concerne le mortier de réparation avec de différents types de sables et fibres végétales utilisés dans le domaine de construction en génie civil.

La réparation de la construction en génie civil est une opération qui devient maintenant habituelle. Le béton reste un matériau performant et durable, mais l'explosion de la construction à la fin de la seconde guerre mondiale a été telle que le nombre d'infrastructures et de bâtiments dégradés nécessitant aujourd'hui une intervention qui augmente de façon exponentielle.

A l'interface entre la science et l'ingénierie des matériaux, les systèmes et techniques de réparation doivent être choisis dans une optique à court terme, il faut rendre à un ouvrage ses capacités originelles, mais aussi à plus long terme car il s'agit de lui assurer une nouvelle vie.

À savoir, et pour distinguer les différentes opérations qu'on peut réaliser sur une construction, on donne les définitions suivantes :

**Réparation** : opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé.

**Restauration** : opération de rétablissement de l'ouvrage à son état originel, avant sa mise en service.

**Renforcement** : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique[1].

### **I.2. Principes fondamentaux**

La technique de mise en œuvre doit permettre la mise en place du matériau de réparation sélectionné sur le support de béton préparé avec des résultats prévisibles, en conformité avec les exigences du cahier des charges. Les propriétés des matériaux de réparation généralement spécifiées sont la résistance en compression, la résistance en traction, l'adhérence en traction et les caractéristiques relatives aux changements de volume, soit le module d'élasticité, le retrait de séchage et le coefficient de dilatation thermique. D'autres propriétés telles que la perméabilité, la résistance aux cycles de gel et dégel ou la résistance aux sulfates peuvent également être spécifiées suivant les conditions d'exposition[2].

#### **I.2.1. Compatibilité**

La compatibilité des produits de réparation vis-à-vis du béton ancien constitue une condition indispensable pour la qualité et la durabilité des réparations, les quelles se mesurent notamment par l'adhérence à long terme du nouveau matériau sur l'ancien béton[2].

La compatibilité entre le matériau de réparation et le substrat béton est un sujet complexe avec de nombreux domaines d'application. Elle peut être définie comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques et de dimensions entre un matériau de réparation et le substrat[3].

Le succès avec lequel il sera possible de rencontrer les différentes exigences de compatibilité dépend de plusieurs facteurs : le choix du matériau, les opérations de préparation du support, la technique de mise en place et les opérations de contrôle de la qualité[2].

Pour être « compatibles », les matériaux de réparation doivent être formulés afin de répondre à diverses exigences. Les matériaux doivent d'abord permettre de rétablir la continuité du béton.

Dans ce but, les caractéristiques suivantes sont demandées :

- Adhérer à la surface du béton, de manière à pouvoir participer à la transmission des efforts à l'ensemble de la structure de l'ouvrage;
- Présenter des résistances mécaniques (compression, traction, flexion) suffisantes, comparables ou supérieures à celles du béton;
- présenter un module d'élasticité similaire à celui du béton; ceci est impératif si le mortier de réparation doit contribuer activement à la stabilité mécanique de l'ensemble (cas de réparations effectuées sur des éléments dont la section a été fortement réduite); au cas où

le ragréage est moins sollicité mécaniquement, on peut s'accommoder de valeurs de module d'Young (E) inférieures, ce qui accroît leur déformabilité et contribue à un meilleur comportement sous d'éventuels mouvements du support[2].

La mise en place d'un béton ou un mortier jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimiques que mécaniques, liés à la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact. La compatibilité n'étant jamais parfaitement assurée, notamment en ce qui concerne les variations volumiques, la capacité d'adaptation du matériau sera un paramètre important pour la durabilité de la réparation.

### I.2.2. Concept de compatibilité

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support de vieux béton, il se pose alors le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité peut prendre différents aspects, tant chimique que déformationnelle ou encore être une compatibilité exprimée en termes de perméabilité (figure. I.1). Chaque type de compatibilité est sensible à des facteurs différents[4].

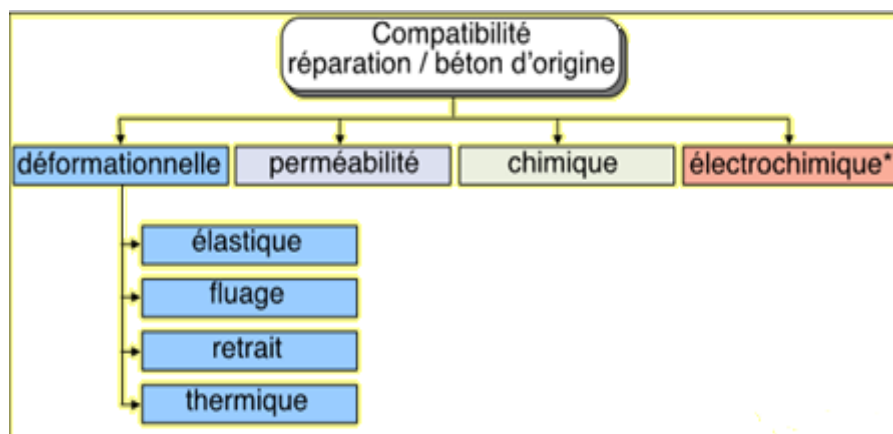


Figure I.1. Facteurs influençant la compatibilité d'une réparation en béton[2].

#### I.2.2.1. Compatibilité déformationnelle

La compatibilité déformationnelle est la composante la plus importante ou critique de toute réparation de béton, parce qu'elle se pose presque inévitablement. Or, la présence d'un béton d'origine très stable liée à un béton de réparation entraîne forcément des contractions qui peuvent ultimement mener à la fissuration et/ou au décollement de la réhabilitation. Donc, le matériau de réparation doit être compatible d'un point de vue déformationnelle avec le support et offrir une bonne qualité de l'interface afin de minimiser le risque d'échec du système réparé[4].

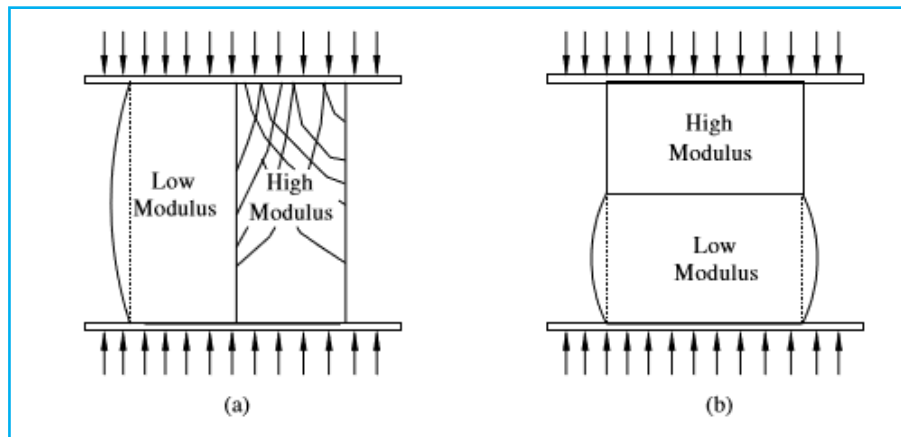
Dès sa mise en place, le matériau de réparation est le siège de variations volumiques causées aussi bien par la réaction d'hydratation du ciment (retrait endogène, retrait thermique) que par le séchage (retrait de dessiccation). Dans la mesure où le béton du support est stable hydriquement et que l'hydratation est inactive, les variations volumiques du matériau de réparation seront restreintes par la présence du support. Le matériau qui constitue le support de la réparation est de plus un matériau dont l'hydratation est terminée et donc dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées comparativement au matériau de réparation[4].

### **I.3.Facteurs influençant la compatibilité dimensionnelle d'une réparation en béton**

#### **I.3.1. Module d'élasticité**

Le module d'élasticité est une mesure de la rigidité d'un matériau. Un matériau avec un module d'élasticité plus élevé est plus rigide qu'un matériau de module inférieur, qui est plus flexible. Le module d'élasticité est la constante de proportionnalité entre la contrainte appliquée et la déformation dans la gamme contrainte déformation linéaire du matériau. Il correspond à la pente de la partie droite d'un graphique de la contrainte par rapport à la déformation. Le terme élasticité fait référence au caractère réversible du changement dimensionnel (comme un ressort se ressaisirait s'il était comprimé ou étiré)[5].

Les matériaux à faible module d'élasticité se déforment plus que ceux à un module élevé sous une charge donnée. Lorsque la charge (compression ou traction) est appliquée parallèlement à l'interface (béton-matériau de réparation) figure. I.2.a, les matériaux ayant des modules élastiques différents transfèrent les contraintes du matériau à faible module (efficacité portante inférieure) au matériau à module élevé. Lorsque la charge est appliquée perpendiculairement à la l'interface (béton-matériau de réparation) Figure I.2.b, la différence de rigidité entre les deux matériaux est moins critique si la charge appliquée est une charge de compression[3, 6].

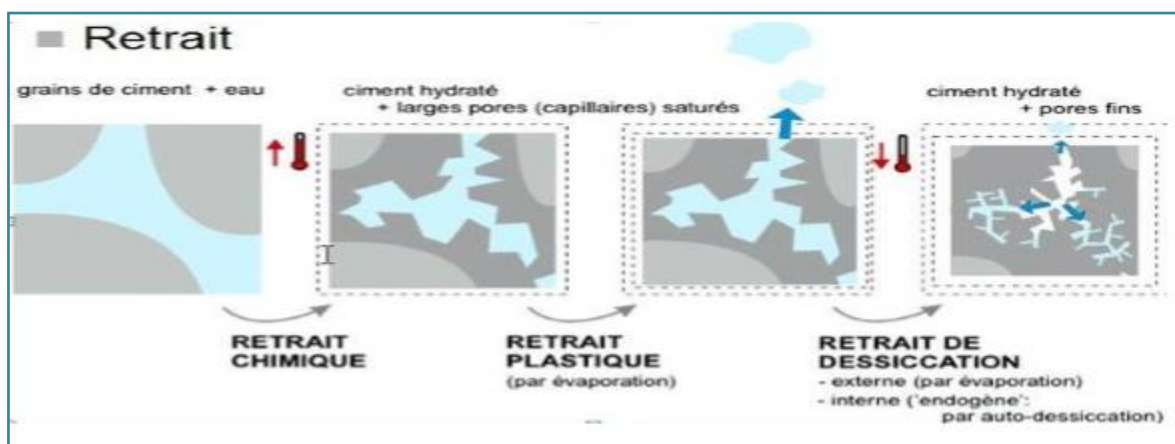


**Figure I.2.** Effets d'une inadéquation des modules élastiques. (a) Charge parallèle à l'interface  
(b) Charge perpendiculaire à l'interface[3].

### I.3.2. Retrait

Le retrait est l'une des causes à l'origine des déformations imposées et qui peut conduire au dépassement de la résistance en traction des matériaux cimentaires. C'est une variation dimensionnelle négative pour la durabilité.

Pour le matériau à base cimentaire, la teneur en eau diminue au cours du temps, surtout quelques heures après la mise en place. Ceci s'accompagne d'une contraction du matériau. Ainsi le matériau subit un phénomène de variation volumique, généralement désigné par le terme « retrait ». Ce phénomène a lieu à l'état frais comme à l'état durci (figure I.3). Le retrait des matrices cimentaires est un processus relativement complexe. Il peut se décomposer en cinq types différents : plastique, de séchage, thermique, de carbonatation et endogène. Ces cinq composantes du retrait total d'une matrice cimentaire sont cumulatives avec des cinétiques très différentes[7].



**Figure I.3.**Phénomène de retrait[8].

### **I.3.2.1 Retrait plastique**

Le retrait plastique est la variation dimensionnelle qui se produit dans tous les matériaux à base de ciment à l'état frais dans les premières heures suivant leur mise en place. Le retrait plastique résulte d'un séchage rapide du béton en phase plastique. Il n'est ni plus ni moins que le retrait de séchage qui se déroule lorsque le béton n'a pas encore durci. L'ampleur du retrait plastique est influencée par la quantité d'eau qui s'évapore en surface, qui est elle-même fonction de la température, de l'humidité relative ambiante et de la vitesse du vent. Si la quantité d'eau évaporée est beaucoup plus importante que l'apport provenant du ressuage du béton, il peut en résulter des fissures dues à des contraintes de traction un peu supérieures à la résistance du béton. Cette fissuration dépend non seulement de la vitesse d'évaporation en surface, mais aussi de la rigidité et de la résistance précise du béton à ce moment. Finalement, le retrait plastique sera d'autant plus important que la quantité de ciment du mélange est importante et que le rapport E/C est faible[9, 10].

### **I.3.2.2 Le retrait de séchage**

Le retrait de séchage est la réduction de volume causée principalement par la perte d'eau pendant le processus de durcissement. Le retrait de séchage est généralement l'aspect le plus critique à l'égard de la compatibilité déformationnelle d'une réparation. Le retrait de séchage est cette contraction que subit le béton lorsque son contenu en eau s'évapore vers l'extérieur ( $H.R \text{ béton} > H.R \text{ air}$ ). Lors du séchage, le déséquilibre thermodynamique engendrée, provoquent un échange de vapeur d'eau de la matrice cimentaire vers le milieu extérieur. La dessiccation du milieu va créer une variation de tensions capillaires, de tensions superficielles et des pressions de disjonction. L'addition de ces mécanismes conduit à un retrait apparent de l'ordre de 200 à 1000  $\mu\text{m/m}$ [7, 11].

### **I.3.2.3 Retrait endogène**

Le retrait endogène du béton (aussi appelé retrait d'auto-dessiccation ou retrait chimique) est une déformation qui résulte du fait que le volume des produits de l'hydratation est plus petit que le volume des réactifs en présence. Cette déformation est présente même sans échange hydrique avec l'environnement. Il s'agit donc d'une dessiccation interne du béton. Par contre au retrait de séchage, celle-ci sera d'autant plus grande que le béton présentera un rapport E/C faible, souvent synonyme d'une quantité de ciment élevée et par conséquent d'une grande résistance mécanique. Les valeurs du retrait endogène sont d'environ 25 à 200  $\mu\text{m/m}$  en fonction du type de béton. En

pratique, on ne tiendra compte de cette déformation que pour des bétons de classe de résistance supérieure à C35/45 ou pour les éléments particulièrement massifs[10].

Le retrait endogène ayant pour origine la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau, est le phénomène qui survient en premier au cours de la vie d'une réparation. Au jeune âge du matériau, le retrait endogène est donc le phénomène principal qui influe sur le comportement mécanique d'une réparation.

### **I.3.2.4 Le retrait thermique**

Le retrait thermique est lié au retour à la température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition du phénomène de fissuration. Ce type de retrait s'étend de quelques dizaines heures, jusqu'à quelques semaines après la mise en œuvre. Sa durée est dépendante de la nature des éléments en béton considérés. Toutefois, dans le cas des rechargements minces où leur épaisseur est limitée à quelques centimètres, la chaleur peut se dégager vite à l'extérieur pendant que le matériau est encore déformable. L'effet du retrait thermique peut être négligeable dans ce cas [7].

### **I.3.3. Fluage**

Le fluage est la déformation différée que le matériau doit subir sous charge constante au-delà de la déformation instantanée, la déformation de fluage est décomposée en une déformation de fluage propre et de dessiccation. Chacune de ces composantes correspond à un environnement de conservation différent vis-à-vis de l'humidité relative. Dans des conditions de température et d'hygrométrie en équilibre avec les caractéristiques internes du matériau (système thermodynamique fermé), le béton (ou mortier) sous chargement présente des déformations de fluage propre. S'il y a un échange hygrométrique durant le chargement, on considère que le retrait de séchage et le fluage s'ajoutent. Le supplément de fluage observé lors du séchage est appelé fluage de séchage.

Le fluage est défini comme la déformation dans le temps causé par une charge constante. Selon divers auteurs, le matériau de réparation doit généralement posséder un très faible potentiel de fluage, sauf si le matériau de réparation est sollicité à la traction, le fluage dans ce cas peut être bénéfique, car il peut compenser ou réduire l'effet négatif du retrait dans le matériau de réparation[6, 12].

### **I.3.4. Dilatation thermique :**

La compatibilité thermique est une autre caractéristique déterminante d'une réparation, en particulier dans un climat caractérisé par d'importantes amplitudes de température.

Un écart significatif entre les coefficients de dilatation thermique du matériau de réparation et du béton d'origine engendre, sous sollicitation thermique, des contraintes internes dans la réparation, notamment à l'interface. L'intensité des contraintes dépend de la variation de température et de l'importance de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux. La nature cyclique des sollicitations thermiques et le taux de variation de température sont deux facteurs pouvant accélérer le processus de dégradation[2].

### **I.4. Les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle**

L'obtention d'une bonne compatibilité déformationnelle peut se faire de différentes façons. L'un des moyens consiste à utiliser un matériau dont le retrait est faible. Cela peut être obtenu par l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait, des microfibrilles ou encore par l'utilisation d'un ciment expansif.

Dans le premier cas l'adjuvant va réduire la tension de surface de l'eau présente dans les pores capillaires et dont le départ est à l'origine de la dépression capillaire qui engendre la déformation macroscopique de retrait.

Dans le second cas, l'expansion causée par la cristallisation contrôlée d'étringite va compenser la déformation de retrait. Bien sûr, minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dont la porosité est très fine. Mais cela n'est possible qu'avec des bétons de faible rapport eau/ciment et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition. Or ce sont des matériaux susceptibles de développer une auto-dessiccation très importante et conséquemment un retrait endogène important. Le retrait total (endogène plus séchage) ne serait donc probablement pas beaucoup plus faible et des problèmes de fissuration au jeune âge pourraient être créés[4].

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation. Cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction. Malheureusement, ce sont souvent des matériaux riches en ciment et de rapport eau/ciment faible et donc dont le retrait endogène va être élevé. Une autre possibilité

consiste à utiliser des fibres qui donneront au matériau une meilleure capacité à contrôler la fissuration en la rendant plus diffuse et en minimisant les ouvertures de fissures[4].

**I.5. Exigences de performance pour les réparations structurales et non structurales**

Selon leur résistance en compression, les matériaux sont divisés en quatre classes, de R1 à R4 pour des résistances en compression de plus en plus élevées. Les valeurs exigées pour les caractéristiques obligatoires dépendent de la classe du produit et sont reportées dans le Tableau I.1.

**Tableau I.1.** Exigences de performance pour les réparations structurales et non structurales[13].

Caractéristique de performance	Exigence			
	Structurale		Non structurale	
	Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
<b>Résistance à la compression</b>	≥45Mpa	≥25Mpa	≥15Mpa	≥10Mpa
<b>Retrait/expansion empêchés</b>	Contrainte d'adhérence après essai			Aucune exigence
	≥2.0 Mpa	≥1.5Mpa	≥0.8Mpa	
<b>Module d'élasticité</b>	≥20 Gpa	≥15Gpa	Aucune exigence	
<b>Absorption capillaire</b>	≤ 0.5 kg.m <sup>-2</sup> .h-0.5		≤ 0.5kg.m <sup>-2</sup> .h <sup>-0.5</sup>	Aucune exigence

Le **tableau I.2** indique les exigences générales relatives au matériau de réparation afin d'éviter une inadéquation des propriétés lors de la réparation du béton structural. En conclusion, accorder une priorité élevée à la compatibilité entre le matériau de réparation et le substrat conduira à de bonnes décisions en matière de sélection du matériau[6, 14].

**Tableau I.2.** Exigences générales de compatibilité entre les matériaux de réparation et le vieux béton (substrat).

Propriété	Relation entre le matériau de réparation (R) et le support en béton (S)
Retrait	$R < S$
Résistances mécaniques	$R > S$
Résistance à flexion	$R > S$
Module d'élasticité	$R \sim S$
Porosité et résistivité	$R \sim S$
Fluage (compression)	-
Fluage (traction)	-
Réactivité chimique	-
Coefficient de délation thermique	-
Adhérence	-

### I.6 Différents types du mortier de réparation :

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon. Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment, chaux, polymère) et d'eau dans des proportions données différents, selon les réalisations et d'adjuvant[15].

Actuellement, plusieurs types de produits sont proposés sur le marché. Les produits utilisées pour la réparation des ouvrages en béton peuvent être classés en trois catégories, selon le liant, qui assure la cohésion de l'ensemble, est de nature hydraulique (ciment), organique réactif (résine synthétique) ou mixte, c'est-à-dire à la fois hydraulique et organique réactif.

Les produits à base de liants hydrauliques peuvent se subdiviser eux-mêmes selon que le liant en question est modifié ou non par un polymère organique.

Les produits à base de résines synthétiques sont assez différents les uns des autres selon les transformations physiques et chimiques qui se produisent au cours de leur mise en œuvre et selon la structure du polymère obtenu finalement (linéaire ou réticulée).

Les produits mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de ciment et de résine synthétique réactive font intervenir à la fois la prise et le durcissement du liant hydraulique et la réticulation du polymère organique.

En ce qui concerne la protection des ouvrages, on peut utiliser la même classification, mais en incluant dans la deuxième catégorie, les peintures et revêtements à base de liants organiques non réactifs[16].

Le tableau I.3 indique les valeurs typiques de certaines propriétés importantes pour les trois groupes de matériaux de réparation. Pour une propriété mécanique donnée, une grande différence entre les valeurs des trois groupes de matériaux de réparation peut être observée. Les principaux critères à prendre en compte lors de la sélection des matériaux de réparation dans un environnement donné sont les conditions d'exposition, la mise en œuvre et les caractéristiques des matériaux[6].

**Tableau I.3** Propriétés des matériaux de réparation de béton typique[6].

Type de matériau de réparation	Mortier à base de polymères	Mortier cimentaire modifié par des polymères	Mortier cimentaire simple
Résistance à la compression (MPa)	50-100	30-60	20-50
Résistance à la traction (MPa)	10-15	5-10	2-5
Module d'élasticité (GPa)	10-20	15-25	20-30
Coefficient de dilatation thermique (déformation par °C)	$25-30 \times 10^{-6}$	$10-20 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
Température maximale de service (°C)	40-80	100-300	> 300

### I.7 Les constituants d'un mortier de fibre

Le mortier fibré se compose de ciment, de sable, de fibres ainsi que d'adjuvants.

#### 1.7.1 Le sable

Le sable C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables reviennent

de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière[17].

### **I.7.1.1 Sable alluvionnaire**

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux.

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée

Par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin :

- $1.8 \leq MF \leq 2.2$  ; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2.2 \leq MF \leq 2.8$  ; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2.8 \leq MF \leq 3.2$  ; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations[18].

### **I.7.1.2 Sable calcaire**

Le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires. Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de son taux élevé en fines qui varié de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers et bétons. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sables roulé, ce qui offre plus de résistances au béton.

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux [19].

### **I.7.1.3 Sable de dune**

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine et très serrée.[19].

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir[18].

### **1.7.2 Ciment**

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier[15].

### **1.7.3 Eau de gâchage**

Joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour

la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale[15].

### 1.7.4 Fibres

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu[20].

#### 1.7.4.1 Types de fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles[21]. Le **tableau I.4** représente les différents types de fibres

**Tableau I.4.** Différents types de fibres[21].

Fibres naturelles		Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Organiques
Lin	Poil	Laitiers	Polypropylènes
Chanvre	Laine	Carbone	Polyamides
Celluloses	Soie	Métaux (acier, fonte)	Polyesters
Sisal		Verre spéciaux	
Coir		Amiante	

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix[20].

### A. Fibres végétales

L'application de fibres végétales comme renforcement des matériaux composites à base de ciment est une pratique ancienne qui a vu son intérêt renouvelé dans le monde entier. Après que des études aient indiqués des solutions pour minimiser la détérioration précoce de ces fibres dans l'environnement alcalin des matrices de ciment.

De plus, l'énergie et le coût de production de ces fibres sont faibles comparés à ceux du verre et des fibres polymères. Ce type de composite est particulièrement intéressant pour les pays où il existe une grande disponibilité de fibres végétales.[22]

Les fibres végétales ont été utilisées dans les années 1980 pour la production de fibres-ciment comme alternative aux tuiles métalliques, principalement dans les pays en développement d'Afrique et d'Asie qui avaient besoin d'un matériau de couverture moins cher, qui utiliserait moins de ressources importées et pourrait être produit localement. Des dalles à grande portée et des dalles de coffrage ont également été produites, démontrant ainsi la possibilité de produire des éléments de construction semi-structurels renforcés avec des fibres de sisal. Ces éléments constructifs avaient encore l'avantage d'utiliser des fibres biodégradables, issues de sources renouvelables et de faible consommation d'énergie pour la production, ce qui en fait un matériau de construction[23].

Les fibres végétales peuvent être considérées comme composites naturels constituées essentiellement de fibrilles de cellulose, maintenues ensemble par une matrice composée principalement de lignine et d'hémicellulose. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle micro fibrillaire[24].

#### A.1 Classification des fibres végétales

Nous pouvons subdiviser les fibres végétales en 5 groupes selon leur origine (Figure I.4).

- Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok).
- Les fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie).
- Les fibres extraites de feuilles (sisal, abaca).
- D'enveloppes de fruits (noix de coco).
- Les fibres dures extraites des tiges de plantes.

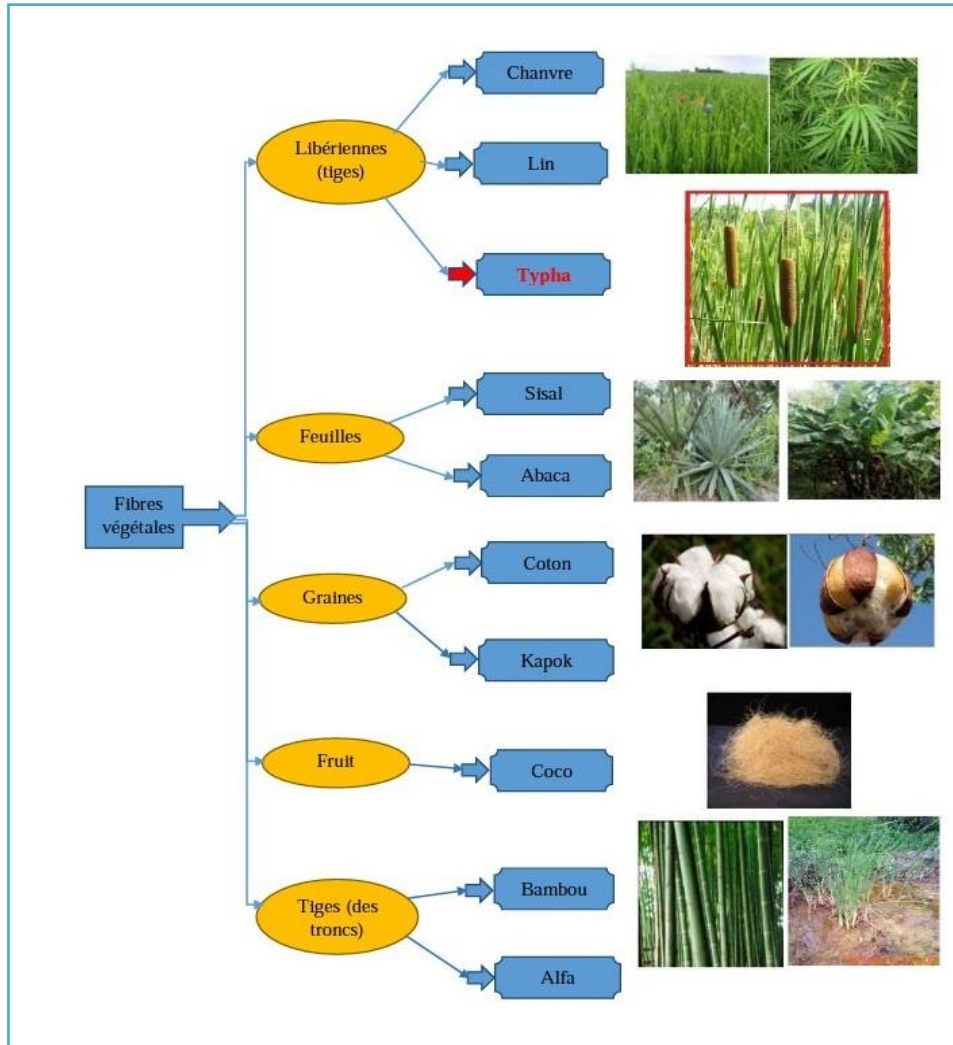


Figure. I.4. Classification des fibres végétales[25].

### A.2. Extraction des fibres végétales

L'extraction de fibres végétales est un procédé classique. Le filage des fibres nécessite des transformations : extraction et purification de la matière première ou brute en une forme filable. Vu la diversité des matières brutes, le procédé d'extraction diffère d'un type à l'autre.

Par contre, d'autres types se récoltent sous forme de tiges. Donc l'extraction des fibres ultimes (filables) est nécessaire. Au cours de l'extraction, on élimine les liants comme les pectines et la lignine. Les fibres obtenues sont appelées les fibres ultimes.

Selon la nature et le domaine d'utilisation des fibres, de différents types de traitements sont proposés : mécaniques, chimiques et biologiques[25].

### A.3 Disponibilité des fibres végétales

Ces dernières années, une attention croissante a été accordée à l'utilisation des ressources renouvelables de faible coût, particulièrement d'origine végétale dans les applications composites au sein des pays industrialisés. L'Inde, la Chine et le Brésil sont les plus grands pays producteurs de fibres dans le monde[21].

L'Algérie est un pays Maghrébin ayant une flore très riche dans les régions montagneuses, les hauts Plateaux et sahariennes : liège, alfa, Disse, Doum, palmier dattier, Pin, Cotton, Lin, etc. L'Algérie avec une production annuelle de liège d'environ 6000 tonnes ; elle est le sixième producteur de liège au monde. De plus, l'alfa occupe environ 4 millions d'hectares en Algérie[21].

### A.4 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales ce sont des bio-composites agro sources qui présentent comme tous les matériaux composites de notre planète des avantages qui favorisent leur utilisation dans plusieurs domaines d'application. Ces matériaux verts montrent aussi des inconvénients qui limitent leur utilisation si aucune amélioration n'a été appliquée sur la fibre brute. Le tableau suivant indique les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales[21].

**Tableau. I.5** .Comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres végétales[21].

Avantages	Inconvénients
Ressource renouvelable et biodégradable.	Variabilité importante et défauts.
Pas d'émission de CO <sub>2</sub> , en plus elle absorbe le CO <sub>2</sub> émis par les activités quotidiennes	Faible durabilité à long terme.
Moins abrasive.	Compatibilité entre la fibre et la matrice.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	Faibles tenue à la température.
Bon régulateur de l'humidité interne dans le bâtiment.	Fort absorption de l'humidité.

Production : peu de technologie, ni d'énergie.	Variations dimensionnelles (gonflement /rétractabilité).
Non-toxiques : Pas d'allergie ou d'irritation cutanée lors de la manipulation.	Nécessite la gestion des stocks, surtout pour des applications industrielles.
Peu coûteux.	Forte capacité d'absorption d'eau : Le coefficient d'absorption de la fibre de Banane, Chanvre, Sisal, Palmier dattier, Lin et Noix de coco est respectivement d'environ 407, 158,149, 140,136, et 120%.
Faible densité (légère).	
Disponible.	
Très bonne capacité d'isolation thermique et acoustique.	

### A.5 Fibre de sisal

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante de la famille des agavaceae, originaire de la ville de Sisal située dans de la péninsule du Yucatán au sud-est du Mexique. la plante est caractérisée par des feuilles qui peuvent dépasser un mètre de longueur composée de fibres longues et très fortes. la récolte est effectuée à la main (**figure I.5**)[26].

La fibre de sisal (*Agave sisalana*) est l'un des plus utilisés dans les fibres naturelles et elle est très facile à cultiver. Près de 4,5 millions de tonnes de fibres de sisal sont produites chaque année dans le monde. La Tanzanie et le Brésil sont les deux principaux pays producteurs[25].

Une plante de sisal produit environ 200-250 feuilles et chaque feuille contient  $1000 \pm 1200$  fibres faisceaux qui sont composés de 4% fibre, 0,75% cuticule, 8% matière sèche et 87,25% eau, donc une feuille pesant environ 600 g donnera environ 3% en poids de fibre, avec chaque feuille contenant environ 1000 fibres[27].



Figure I.5. Processus principales de production des fibres de sisal[22].

Tableau I.6. Propriétés des fibres de sisal[28].

Diamètre	0,10-0,13 mm
Résistance à la traction	371±28 MPa
Module d'élasticité	12.43±2.23 GPa
Forme	Droite
Couleur	Blanche crème
Masse volumique	0.113 g/cm <sup>3</sup>

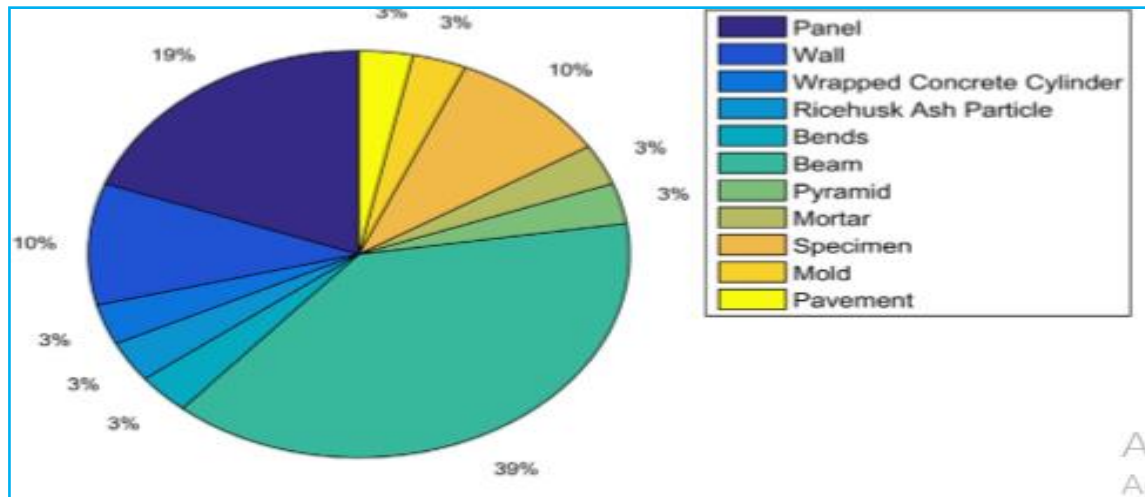


Figure .I.6 Revue de l'application du béton armé en sisal[29].

### I.8. L'effet des constituants d'un mortier sur ces performances

Le mortier de fibres végétales est un matériau composite non homogène ce qui rend caractéristiques très sensibles aux caractéristiques de ces constituants. Or plusieurs chercheurs ont pris ce point en considération, ils ont montré les effets de chaque constituant sur les performances du mortier, en particulier les performances mécaniques.

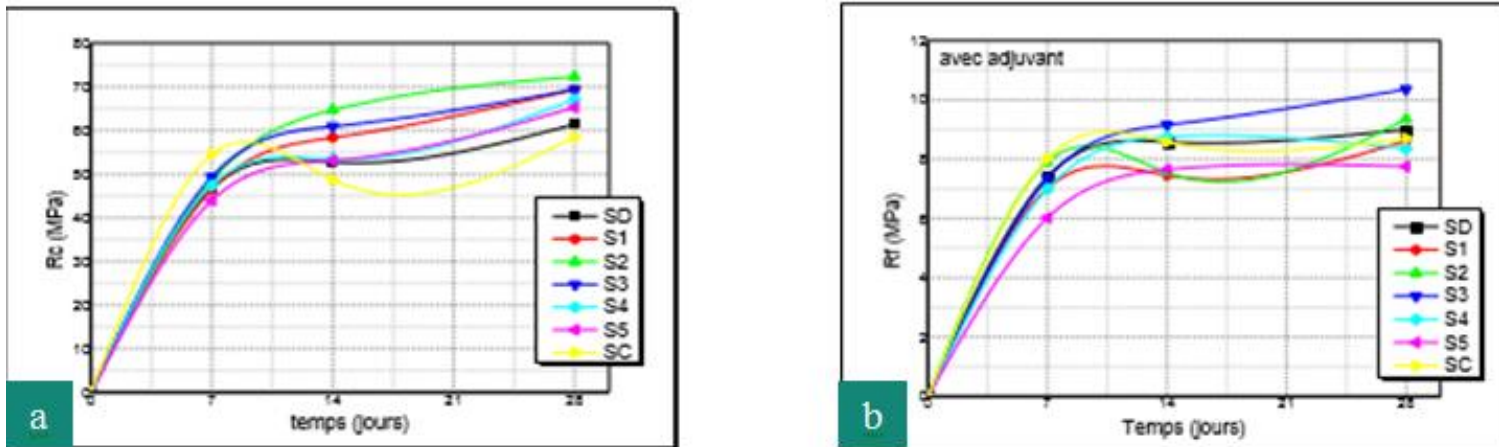
On va citer par la suite quelques travaux jugés intéressants.

#### I.8.1 Effet de type de sable

Le travail réalisé par **B.Benabed et al**[30] tente d'apporter des solutions pour l'emploi de sable dunaire dans la confection des mortiers. Ils résultent que Les mortiers du sable mélangé (alluvionnaire- dunaire) présentent les meilleures performances mécaniques, que celles des mortiers du sable dunaire avec superplastifiant et sans superplastifiant. On note une résistance en compression à 28 jours de l'ordre 37 MPa pour le mortier à sable mixte. Or, l'étude réalisée par **T. Bouziani et al**[31] qui consiste à utiliser un sable de dune de différentes proportions massique (0, 10, 20 et 30) % et de sable alluvionnaire et voir leurs effets sur les propriétés d'un béton de sable. Ils ont conclu que la concentration de sable de dune (10%) permet au béton de sable d'avoir une bonne fluidité, ainsi de bonne performance à la résistance à la compression à 28 jours.

Une autre recherche a été effectuée par **M.Mekki** en 2016 [32] sur l'analyse des propriétés physico-mécaniques du mortier à base de sable mixte (sable de dune et sable concassé), il a conclu que :

- L'ajout du sable concassé permet d'améliorer les propriétés physiques du sable mixte (granularité améliorée, faible porosité, compacité élevée, adhérence pâte ciment-granulats améliorée,..., etc).
- L'utilisation du sable mixte améliore également les résistances mécaniques(**figure I.7**) (compression, flexion et à la traction) du mortier.



**Figure I.7** Résistance a la compression(**a**) et à la flexion(**b**) des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant[32].

## I.8.2 Effet de fibres végétales

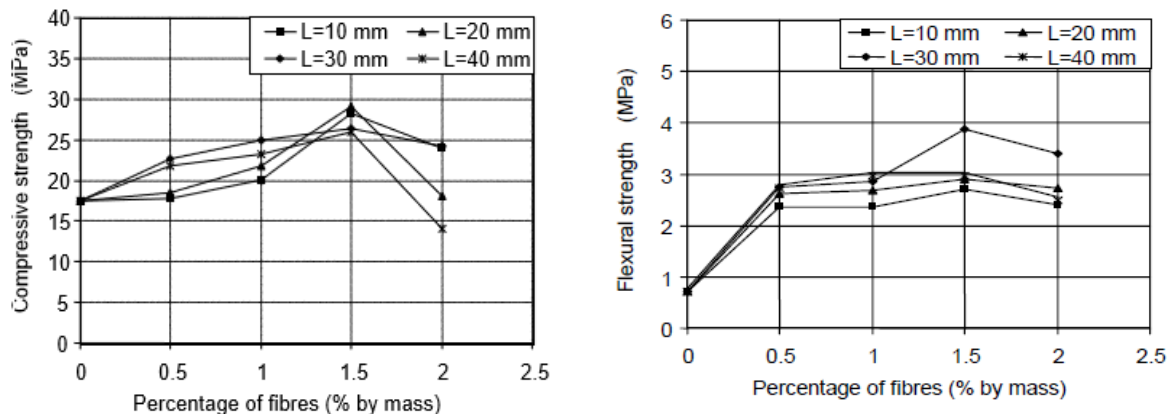
### I.8.2.1 Effet d'ajout des fibres sur les résistances mécaniques

L'étude de l'effet des fibres végétales sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des composites à base d'une matrice cimentaire renforcée a été l'objectif de nombreux travaux de recherche récents. Parmi eux, les travaux de :

**Kwan et al** [33] mènent une étude sur le renforcement des bétons par des fibres de noix de coco. Ils ont été renforcés par des fibres selon quatre teneurs : 0,6 ; 1,2 ; 1,8 et 2,4% en volume du liant et une longueur variant entre 20 et 30 mm. Les essais mécaniques indiquent une performance optimale pour une fraction volumique de 1.8% de fibre, avec une augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours des bétons fibrés de 18% par rapport à celle du béton non fibré. Ils observent également une amélioration de la résistance au choc des composites renforcés par rapport au témoin.

**A.Djoudi et al** [34] mènent une étude de performance d'ajout de différents dosages massiques (0,5 ; 1 ; 1,5 et 2)% et longueurs (10, 20, 30 et 40) mm de fibres de palmier dattier sur le plâtre.

Les résultats montrent que la résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation de dosage de fibre jusqu'à 1,5%, et se diminue à un pourcentage élevé de 2% (figure I.8). Cette diminution est due à une mauvaise distribution et à un excès de dosage de fibre.



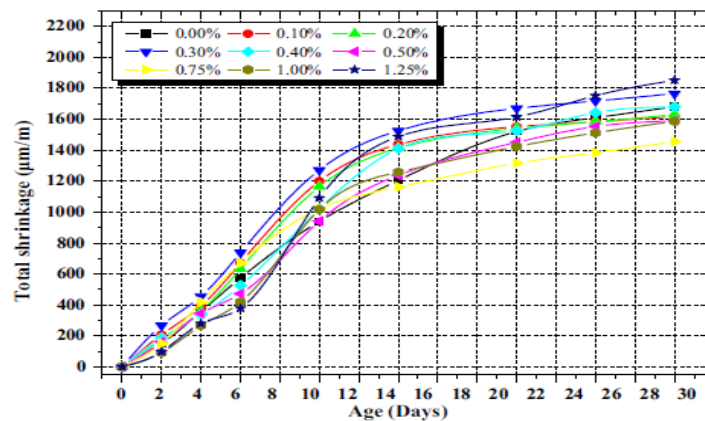
**Figure I.8** Résistance à la compression et à la flexion du plâtre[34].

**Ramli et al** [35] ont étudiés l'effet d'incorporer des fibres courtes (fibre de coco, de bar chip et de verre) dans un béton à haute résistance, chaque type de fibre est ajouté par des volumes différents (0,6 ; 1,2 ; 1,8 ; et 2,4)%. Les essais mécaniques indiquent une augmentation de la résistance. La résistance à la compression a augmenté de 71,8-79 MPa en utilisant 1,8% de fibre de barchip, bien que la résistance à la flexion augmente de 5,21-6,5MPa.

**Dawood et al** [36] ont examiné l'influence de l'ajout des fibres de palmier à huile sur le comportement mécanique des mortiers. La fibre de palmier d'une longueur de 3 cm et des fractions volumétriques 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1,0% de la teneur en ciment ont été utilisés dans la préparation des mélanges de mortier fibrés. Les auteurs ont observé qu'il existe une teneur en fibre optimale. En effet, à 90 jours, les résistances à la compression et à la flexion des composites ont augmenté respectivement, de 12 et 21% par rapport au mortier témoin avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à la teneur de 0,5%. (Au-delà de cette teneur en fibres, les résistances à la compression et à la flexion amorcent une diminution douce. Ils expliquent cette diminution par l'augmentation de la porosité due à l'accroissement de la teneur en fibres dans la masse du mortier.

**I.8.2.2. Effet d'ajout des fibres sur le retrait**

L'incorporation des fibres végétales à une matrice cimentaire a un effet négatif bien que positif sur le retrait. En effet **B. Krobba et al**[37] ils ont contribué à formuler un mortier de réparation à base de sable dunaire et de fibres naturelles d'alfa à différent pourcentage en volume (0,1 ;0,2 ;0,3 ;0,4 ;0,5 ;0,75 ;1 et 1,25) %. L'ajout de 0,75% de fibres augmente la résistance à la flexion et à la compression environ 30et15% respectivement, et pour le même dosage le retrait est diminué de 12% comme montré dans la **figure I.9**

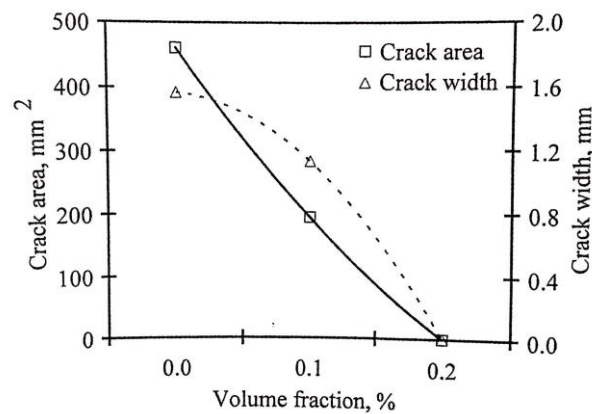


**Figure I.9** Variation de retrait[37].

**N.banthia et al** mènent une étude sur le renforcement des bétons par des fibres de celluloses. Ils ont été renforcés par des fibres ayant la teneur de (0,1 ;0,2) % avec des longueurs de 2 à 3 mm.les résultats obtenus pour le retrait sont montrés dans la Figure I. pour un volume de 0,2% de fibres de cellulose, il a complètement éliminé les fissures qui ont apparus pour le volume de 0,1 % de fibres et béton de référence.



**Figure I.9** Modèle des fissures des éprouvettes renforcés par des fibres.



**Figure I.10** Performance du béton avec et sans fibres de cellulose sur le retrait plastique.

### I.8.2.3 Effet d'ajout de fibres sur le module d'élasticité dynamique

**Ali et al** [38] ont étudié l'effet de l'ajout des fibres de noix de coco sur les propriétés mécaniques et dynamiques du béton. Dans cette étude, Les paramètres étudiés sont les longueurs des fibres (2,5 ; 5 et 7,5 cm) et les volumes des fibres (1 ;2 ;3 et 5%). Les résultats indiquent que les meilleures propriétés mécaniques ont été obtenues avec les composites renforcés avec les fibres longues 5 cm ayant une teneur de 5% en fibre avec une augmentation respective de la résistance à la compression, le module de rupture et la ténacité à la flexion de 4,2 et 9,10% et une diminution respective du module d'élasticité statique. Concernant les propriétés dynamiques, les meilleurs résultats ont été obtenus pour les composites dont les fibres ont une longueur de 5 cm et un volume de 5%. Ils ont observé également que le module d'élasticité dynamique quant à lui diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres ou la longueur des fibres.

### I.8.2.4 Effet d'ajout de fibre sur l'absorption d'eau

L'étude réalisé par **A.A.Okeola et al** [39] en 2018, consiste à voir l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton renforcé par des fibres de sisal. Ce qui correspond à l'ajout de 0,5 % ; 1,0 % ;1,5 % et 2,0 % de fibre de sisal en poids de ciment, ils resultent que l'augmentation de la teneur en fibres est suivie d'une augmentation de l'absorption d'eau (**figure I.11**).

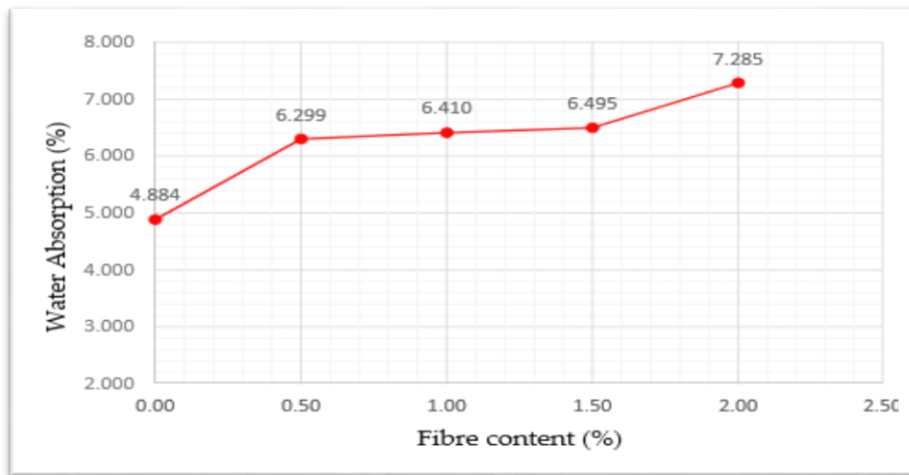


Figure I.11 Effet d'ajout des fibres sur l'absorption d'eau [39].

### I.8.3 Effet d'ajout des fibres de sisal

R.D. Tolêdo Filho et al [40] qui traite l'effet des fibres de sisal et de polypropylène à faible module d'élasticité sur le retrait libre des mortiers à jeune âge. A la comparaison qui a été faite entre les performances d'ajout de (0,1% et 0,2%) pour chaque type de fibres afin de contrôler ce phénomène. Les résultats ont montré que l'ajout de 0,2% de fibres de sisal diminue le retrait plastique libre plus que l'ajout de 0,2% de fibres de polypropylènes.

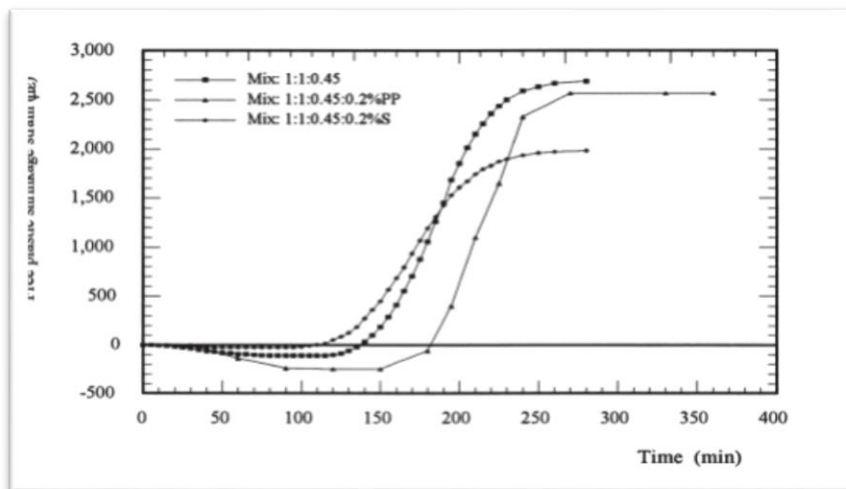


Figure I.12 Variation du retrait plastique du mortier renforcé par les fibres de sisal et de polypropylène [40].

Au jeune âge, le module d'élasticité des deux fibres est plus élevé que la matrice cimentaire, cela est due à un faible volume de fibres de sisal et polypropylène qui ont un effet important à la réduction du retrait plastique, à retarder l'apparition de la première fissure et de contrôler le développement des fissures.

D'autre part, les résultats du même auteur [41] relatifs aux mortiers des fibres de sisal et noix de coco, montrent que l'ajout de fibres améliore la résistance à la flexion et la ductilité.

### **I.9 Conclusion**

Cette partie de l'étude bibliographique a permis de nous donner une idée sur les principaux éléments constituant notre axe de travail, notamment ce qui concerne les mélanges cimentaires à base de sable de dune et sable concassé et les fibres végétales. Ces connaissances sont considérées très importantes pour mieux analyser notre étude de recherche, plus particulièrement en ce qui concerne la partie expérimentale de notre étude.

**CHAPITRE II**  
**Matériaux et méthodes**  
**expérimentales**

---

## II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but d'identifier et caractériser les matériaux utilisés dans notre étude (ciment, poudre de marbre, sable de dune, sable de calcaire et les fibres de sisal). Par la suite les différents essais expérimentaux. A l'état frais la caractérisation est effectuée par des essais d'étalement au mini- cône, et à l'état durci des essais physico-mécaniques [retrait, résistance à la traction par flexion, résistance à la compression, absorption d'eau par capillarité, auscultation par ultra son et la porosité totale].

## II.2 Matériaux utilisés

### II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de type de CEMI d'une classe de résistance de 42.5 provenant des usines Béskra, mélangé avec une poudre de marbre noté par (MP). Leurs propriétés chimiques et physiques sont classées dans le tableau II.1.

**Tableau II.1.** Composition chimique et propriétés physiques de ciment et MP[42].

Composition chimique (%)	Ciment	MP
CaO	65.9	55.6
SiO <sub>2</sub>	21.9	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	0.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	0.2
MgO	1.6	0.1
K <sub>2</sub> O	0.5	-
SO <sub>3</sub>	0.48	-
CaCO <sub>3</sub>	-	90
Na <sub>2</sub> O	-	-
Cl	0.1	0.1
Perte au feu	1.2	43

Propriétés physiques		
Densité	3.1	2.7
Indice d'activité à 28 jours	-	0.79
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	44	-
Finesse (m <sup>2</sup> /kg)	279.2	212.6

### a) Caractéristiques physiques du ciment

- i. **Finesse de ciment** : La finesse d'un ciment se caractérise par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m<sup>2</sup> / kg de poudre ou (cm<sup>2</sup>/g). Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou « perméabilimètre de Blaine » selon la norme **NF EN 196-6**[43].

La surface spécifique c'est le temps que met un volume d'air que l'on fait passer à travers une poudre de ciment. Plus la surface spécifique de cette poudre est élevée et plus que le temps mis par l'air pour traverser la poudre est lent. Elle est calculée par la formule suivante :

$$S_p = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}}$$

**S<sub>p</sub>** : Surface spécifique.

**K** : Constante de l'appareil.

**η** : Viscosité de l'air à la température de l'essai en prises.

**t** : Temps mesuré en seconde.

**e** : Porosité.

**ρ** : Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>).

- ii. **Consistance normale** : L'essai de consistance consiste à déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante, cette consistance mesurée est appelée « consistance Vicat » selon la norme **NF EN 196-3**[44].

- iii. **Temps de prise** : L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée, l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat. Il varie en fonction de la nature de ciment, de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et de la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise. Il est mesuré suivant la norme **NF EN 196-3**[44]. Le tableau II.2 présente les caractéristiques physiques du ciment.

**Tableau II.2.** Caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Masse volumique apparente ( $kg/m^3$ )	Masse volumique absolue ( $kg/m^3$ )	Surface spécifique ( $cm^2/g$ )	Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
Moyenne	1,40	3,04	4100	25,8-26,4	170-190	230-280

b) **Caractéristiques mécaniques du ciment**

Les résultats de la résistance à la compression et la flexion du ciment sont présentés dans le **tableau II.3**

**Tableau II.3.** Résistances à la compression et à la flexion du ciment.

Résistances (MPa)	28 jours
Compression	45,03±2,35
Flexion	8,08±0,4

**II.2.2 Sables**

Dans notre travail, deux types de sables sont utilisés : un sable de dune noté par SD et un sable calcaire noté par SC. Le sable de dune utilisé est un sable de dunes provenant de la région nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord). C'est un sable fin d'origine éolienne.

Le sable calcaire est issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires dite Station d'Ouezzane située au nord de la commune de Laghouat près du pont d'Oued M'zi.

En vue de son utilisation dans la confection des mortiers et bétons, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire tels que l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable et l'analyse chimique ...etc.



**Figure II.1.** Les différents sables utilisés.

**a) Caractéristiques physiques**

**i. Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme **NF EN 933-1**[45], qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension supérieure ou égale à 80 mm, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Les résultats d'analyse granulométrique des sables utilisés sont donnés dans le tableau II.4.

Tableau II.4. Analyse granulométrique des sables.

SD		SC	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Tamis (mm)	Tamisât (%)
0,63	100	4	100
0,5	99,76	3,15	97,62
0,4	99,28	2,5	90,71
0,315	91,36	1,25	59,6
0,25	74,48	0,63	38,06
0,2	57,4	0,315	27,69
0,16	24,6	0,16	17,52
0,125	13,36	0,08	12,75
0,1	8,4	0,063	0,58
0,08	4,28		
0,063	0,2		

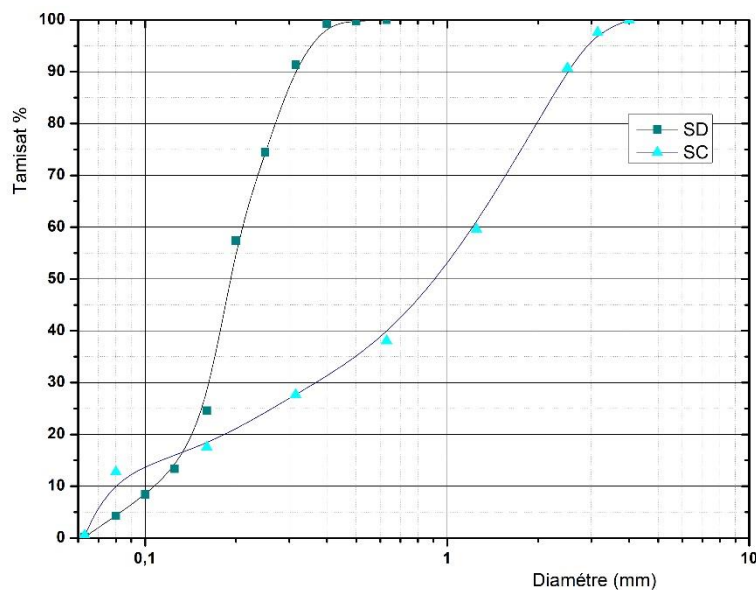


Figure II.2. Courbes granulométriques des deux types de sable.

D'après la figure de l'analyse granulométrique des deux sables, le sable de dune est défini comme étant un sable fin et d'une granulométrie serrée.

Et le sable calcaire est un sable grossier et d'une granulométrie étalée.

- **Module de finesse**

Le module de finesse d'un sable selon la norme **NF P 18-540**[46] est défini comme étant le centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : (0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5) mm.

$$M_f = \frac{\Sigma \text{ des refus cumulés en \% des tamis (0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; 5)}}{100}$$

$M_f$  : Module de finesse.

**Tableau II.5.** Modules de finesse des deux sables.

Type de sable	SC	SD
Module de finesse $M_f$	2.66	1.04

**Tableau II.6.** Classement des sables.

Qualité de sable	Module de finesse
Sable grossier	$2.8 < M_f < 3.2$
Sable préférentiel	$2.2 < M_f < 2.8$
Sable a majorité de grains fins	$1.8 < M_f < 2.2$

La valeur du module de finesse confirme que le sable dunaire est un sable très fin. Et pour le sable calcaire est un sable préférentiel.

**ii. Masses volumiques**

La masse volumique est la grandeur qui permet de passer de la masse d'un matériau, au volume occupé par ce même matériau.

- **Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (tous vides inclus). Elle est donnée selon la norme **NF P 18-555**[47] par la formule suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{M_1 - M_2}{V_{ap}}$$

$\gamma_{app}$  : Masse volumique apparente (kg/m<sup>3</sup>).

$M_1$  : Masse totale (récipient+ matériau) (kg).

$M_2$  : Masse du récipient vide (kg).

$V_{ap}$  : Volume du récipient égale à 1 litre (1000g).

**Tableau II.7.** Masses volumiques apparentes.

Type de sable	SC	SD
$\gamma_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1538,5	1521,1

• **Masse volumique absolue (Méthode du pycnomètre)**

La méthode de pycnomètre est définie selon la norme **NF P 94-054**[48]. Les étapes d'essai sont comme suit :

- Poser le pycnomètre sur une balance en ajustant la tare.
- Remplir le pycnomètre de l'eau jusqu'au repère, puis peser le volume d'eau ( $M_0$ ), Par la suite vider le pycnomètre.
- Introduire le lot de matière à tester (sable) dans le pycnomètre puis peser le lot ( $M_1$ ).
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau. Et à la fin peser l'ensemble eau + matière ( $M_2$ ).

$$\gamma_{abs} = \frac{M_1}{M_0 + M_1 - M_2}$$

$\gamma_{abs}$  : Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>).

$M_0$  : Volume d'eau (kg).

$M_1$  : Masse du pycnomètre + sable

$M_2$  : Masse d'eau + sable (kg).

Tableau II.8. Masses volumiques absolues.

Type de sable	SC	SD
$\gamma_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2624	2595

iii. Compacité

La compacité c'est le rapport du volume de matière pleine au volume total. Elle est définie par :

$$C_p = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} * 100$$

$C_p$  : Compacité (%).

$\gamma_{app}$  : Masse volumique apparente (kg/m<sup>3</sup>).

$\gamma_{abs}$  : Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>).

Tableau II.9. Compacité des sables.

Type de sable	SC	SD
$C_p$ (%)	58,63	58,61

iv. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme **NF P 18-555**[47].

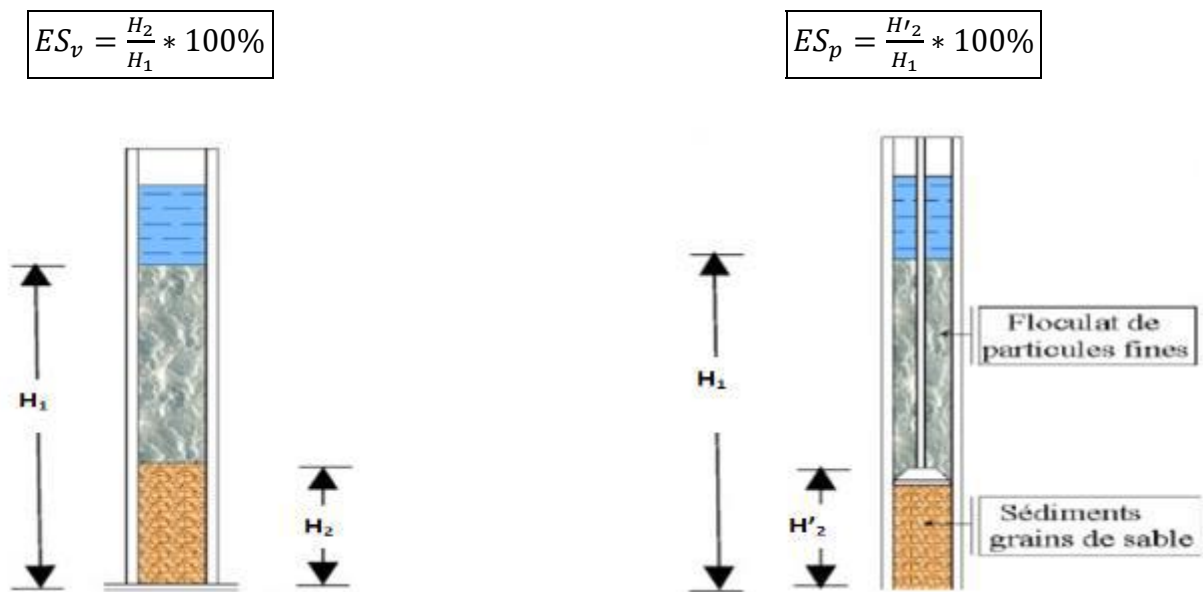
Tableau II.10. Absorption d'eau des sables.

Type de sable	SC	SD
Absorption (%)	5,78	1,95

v. **Equivalent de sable**

Cet essai a pour but de donner une indication sur l'importance des impuretés (argile, poussière, matière organique, ...etc.) contenues dans les sables. Il consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculante, après agitation, le mélange est laissé afin de décanter pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H1) et du sédiment + flocculat (H2).

Cet essai est défini par la norme **NF P 18-598**[49] et peut être calculer par les relations ci-dessous



**Figure II.3.** Essai d'équivalent de sable.

$ES_v$  : Equivalent de sable visuel (%).

$ES_p$  : Equivalent de sable au piston (%).

$H_2$  ou  $H'_2$ : Hauteur des grains solides sableux.

$H_1$  : Hauteur des grains solides sableux + des impuretés argileuses.

**Tableau II.11.** Valeurs d'équivalent de sable.

Type de sable	SC	SD
$ES_v$	73.1	89.50

Tableau II.12. Classe de propreté d'équivalent de sable.

ES visuel	ES piston	Qualité de sable
$ES_v < 65$	$ES_p < 60$	« <b>Sable argileux</b> » risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq ES_v \leq 75$	$60 \leq ES_p \leq 70$	« <b>Sable légèrement argileux</b> » de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$75 \leq ES_v \leq 85$	$70 \leq ES_p \leq 80$	« <b>Sable propre</b> » à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$ES_v \geq 85$	$ES_p \geq 80$	« <b>Sable très propre</b> » l'absence presque totale de fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

D'après les tableaux précédents, **tableau II.11** et **tableau II.12**, on distingue que le sable dunaire est un sable très propre.

Et d'après le **tableau II.11** et la norme **NF P 18-540**[46] la valeur de  $ES_v$  est  $\geq 65$ , alors le sable calcaire est un sable propre.

#### b) Caractéristiques chimiques

Les différents minéraux constituant les sables utilisés sont donnés par les diffractogrammes DRX suivants (Figure II.4, II.5)

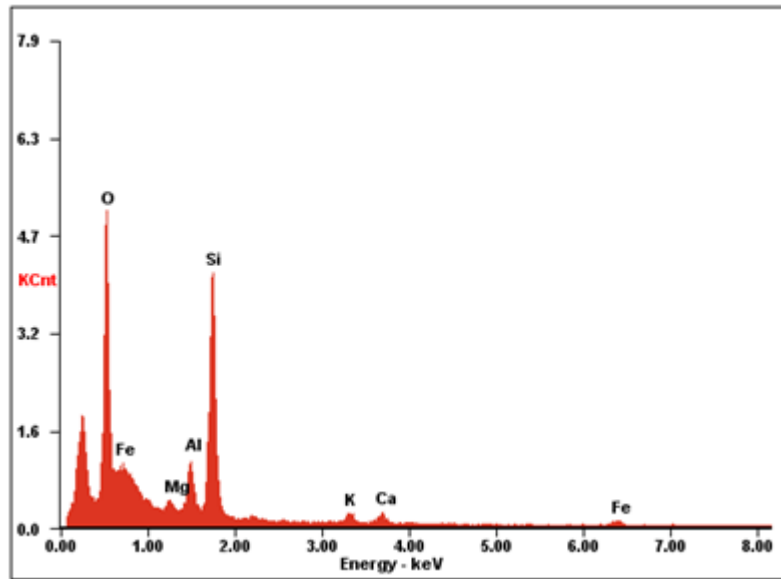


Figure II.4. Diffractogrammes aux rayons X de sable de dune.

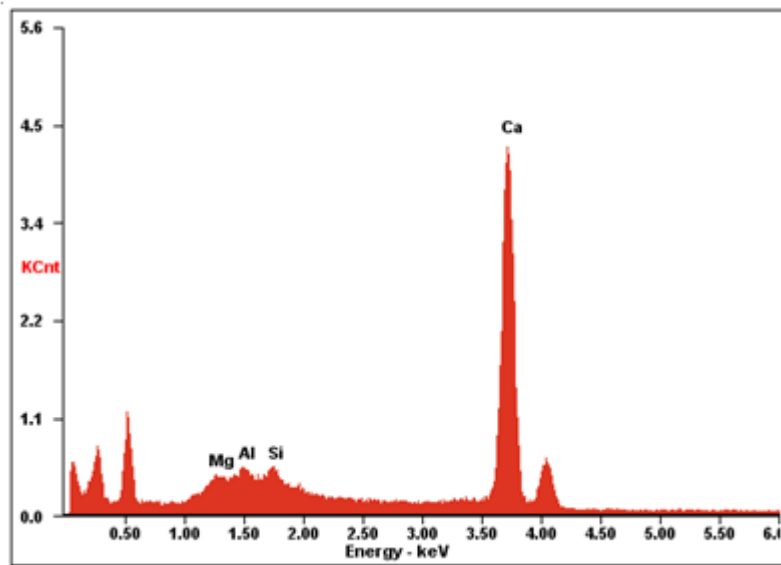


Figure II.5. Diffractogrammes aux rayons X de sable calcaire.

D'après le diffractogramme de sable de dune et du sable calcaire, on peut constater que :

- Le sable de dunes est un sable siliceux.
- Le sable concassé est un sable calcaire.

### II.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers est une eau courante du robinet de laboratoire du Génie civil de Laghouat.

### II.2.4 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant algérien MEDAFLOW30 conforme à la norme **EN 934-2: NA 774**[50]. C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Selon la notice technique GRANITEX :

- Aspect : liquide.
- Couleur : Brun clair.
- Ph : 6-6,6.
- Densité:  $1,07 \pm 0,01$ .
- Teneur en chlore :  $< 0,1 \text{ g/l}$ .
- Extrait sec : 30%.
- Dosage :  $0,90 \pm 0,98 \%$ .

### II.2.5 Fibres

Les fibres utilisées sont des fibres végétales de sisal disponible sur le marché.

Les fibres sont découpées en morceaux à l'aide d'un massicot suivant des longueurs différentes (**Figure II.6.b.c**).



**Figure II.6.** Découpage des fibres de sisal suivant des longueurs différentes.

Les fibres sont découpées suivant les longueurs suivantes : 5,10 et 20 mm. Figure II.7.



**Figure II.7.** Les fibres de sisal découpées.

L'essai de traction au niveau de laboratoire de mécanique à l'université de Laghouat à l'aide d'une presse de traction de 5KN de capacité comme le montre la figure II.8 a été effectués, les résultats trouvés nous a permis de déterminer la loi de comportement des fibres de sisal représenté par la figure II.9.

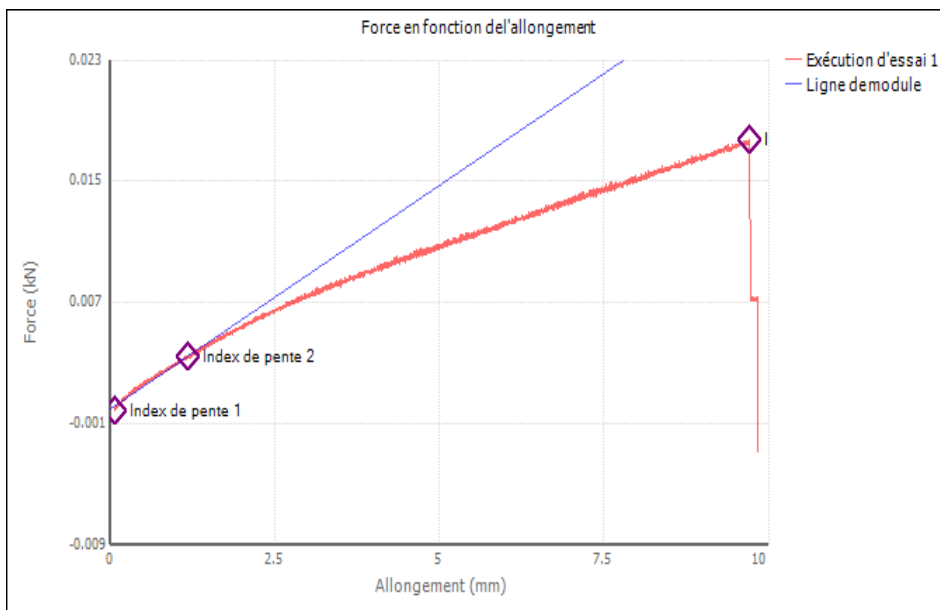


**Figure II.8.** Presse de traction.

Les caractéristiques physiques des fibres utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau II.13.** Caractéristiques chimiques et physico-mécaniques des fibres utilisées.

Propriétés	Valeurs	Références
Densité	1,3	
Taux d'absorption d'eau à l'état saturée (%)	143,78%	
Résistance à la traction (MPa)	572,95	
Module d'élasticité (GPa)	4,77	
Déformation à la rupture (mm/mm)	0,191	
Hémicellulose (%)	9,9	[51]
Cellulose (%)	65,8	[51]
Lignin (%)	9,91	[51]



**Figure II.9.** Loi de comportement à la traction des fibres de sisal.

### **II.3 Méthodes expérimentales**

Les mortiers ont été confectionnés conformément à la norme **ASTM C 305**[52], avec un malaxeur de 5 litres de capacité (figure II.10). L'ouvrabilité des mortiers a été étudiée en utilisant un moule tronconique (D= 100 mm, d= 70 mm, h=50 mm) (figure II.11).



**Figure II.10.** Malaxeur de capacité de 5 litres.



**Figure II.11.** Moule tronconique.

#### **II.3.1 Procédure de malaxage**

Après avoir déterminé les quantités de chaque élément entrant dans la composition du mortier auto plaçant (MAP), on procède à un malaxage du MAP sans fibre et un MAP avec fibre.

- **Mortier auto plaçant sans fibre** : Le début du malaxage se fait par un malaxage des constituants sec (ciment + poudre de marbre + sables) pendant 60 secondes tout en malaxant à une vitesse définie comme une vitesse lente pour bien homogénéiser le

mélange, ensuite 70% de l'eau de gâchage est ajoutée pendant 30 secondes. Après une minute et 30s, le super plastifiant et l'eau restante mélangés sont introduit régulièrement. [Boukendakdji][53] a apporté que l'efficacité du SP est autant plus grande lorsqu'il est rajouté avec 30% d'eau. Le malaxage continu encore 2 minutes à grande vitesse, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules, le mélange doit reposer 90 secondes puis une autre 90 secondes à vitesse rapide. Ce qui fait en totale 7 minutes de malaxage.

- **Mortier auto plaçant avec fibre** : Pour la procédure du malaxage du MAP avec fibre, c'est le même principe que le MAP sans fibre à part que le temps de malaxage des constituants sec (ciment + poudre de marbre + les sables + fibres) 30 secondes est rajoutée, ce qui donne 90 secondes de malaxage sec. Et une autre 30 secondes est rajoutée pour la dernière étape après le repos, ce qui donne 120 secondes de malaxage à vitesse rapide. En totale 8 minutes de malaxage.

La figure II.12 résume la séquence de malaxage

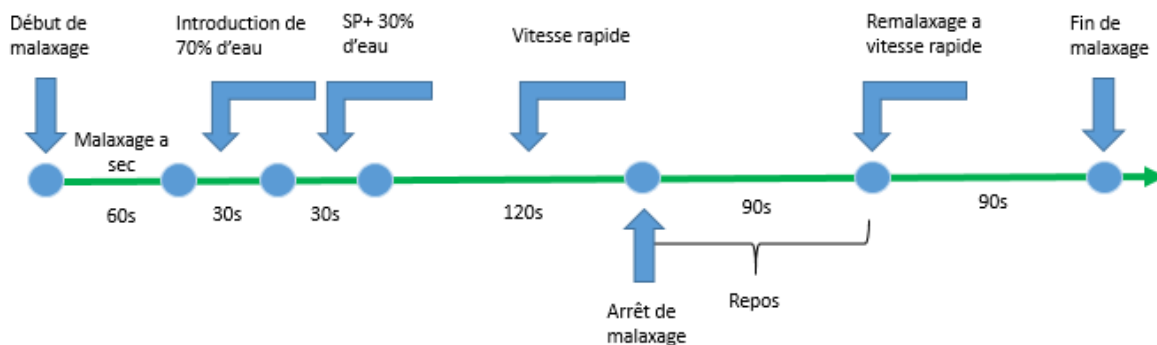


Figure II.12. Séquence de malaxage.

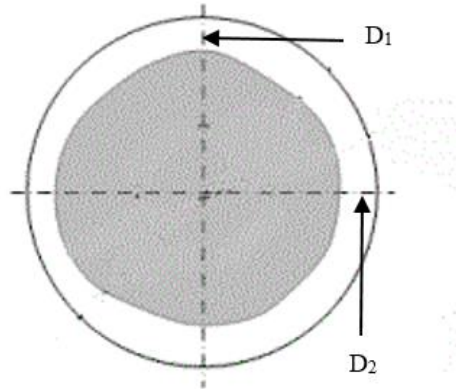
### II.3.2 Essais effectués sur les mortiers à l'état frais

#### a) Étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un mini cône placé sur une surface horizontale lisse et à le soulever verticalement, une fois le cône est soulevé, le mortier auto plaçant s'étale sur la plaque. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire pour retenir une moyenne des deux valeurs (figure II.13).

Le diamètre de la galette du mortier doit être compris entre 270 et 330 mm pour avoir un mortier autoplaçant.

Cet essai permet également d'observer l'homogénéité de la suspension à travers l'apparition ou non d'une auréole autour de l'étalement.



**Figure II.13.** Essai d'étalement au mini cône.

### II.3.3 Essai effectués sur les mortiers à l'état durci

#### a) Confection et cure des éprouvettes

Les mortiers ont été coulés dans des moules prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ). Les moules contenant les spécimens ont été couverts de film plastiques et stockés dans l'environnement du laboratoire (figure II.14.a). Après 24 heures de confection, les échantillons ont été démoulés soigneusement et conservés jusqu'à l'âge de l'essai dans l'environnement suivant :

- A une température de  $(21 \pm 2)^\circ \text{C}$  et  $(60 \pm 10) \% \text{ HR}$  pour l'essai de retrait (figure II.14.b).
- A la chambre de conservation de  $(21 \pm 2)^\circ \text{C}$  et  $(90 \pm 5) \% \text{ HR}$  pour les autres essais (flexion et compression, module d'élasticité, absorption d'eau) (figure II.14.c).

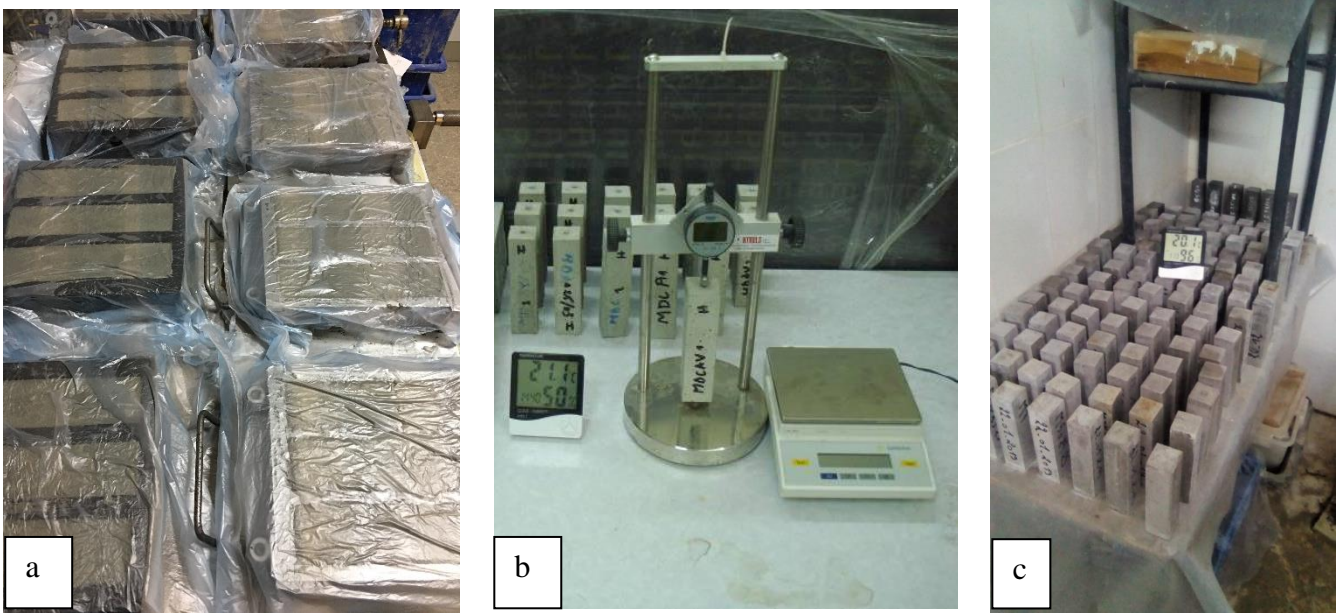


Figure II.14. Mode de conservation des éprouvettes.

## b) Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés

### i. Variations dimensionnelles (retrait)

L'essai est réalisé selon la norme **EN 12617-4**[54] sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . La mesure du retrait est effectuée à l'aide d'un réfractomètre muni d'un comparateur digital de division  $10^{-3}$  (figure II.14.b). Après démoulage, on initialise le comparateur à la valeur zéro à l'aide d'une tige étalon, et ensuite les éprouvettes munies de plots à leurs extrémités sont placés en position verticale sur le réfractomètre et la lecture  $L_0$  est prise. Après cela, les lectures sont effectuées au cours du temps.

Le changement de longueur doit être calculé par rapport à la lecture initiale ( $L_0$ ) effectuée après 24 h. La déformation de déplacement doit être exprimée comme la variation de longueur ( $\Delta L$ ) sur la longueur de repère ( $L$ ), exprimée en mm / m, en 0,001 mm / m près.

### Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur  $L = 160 \text{ mm}$ . Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$ , l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit  $l(t_0)$  la longueur de l'éprouvette au temps  $t_0$  choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps  $t$  sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par  $\varepsilon$  et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$  est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air,  $\Delta l(t)$  est généralement négatif et c'est le retrait.

Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau,  $\Delta l(t)$  peut être positif alors c'est le gonflement.

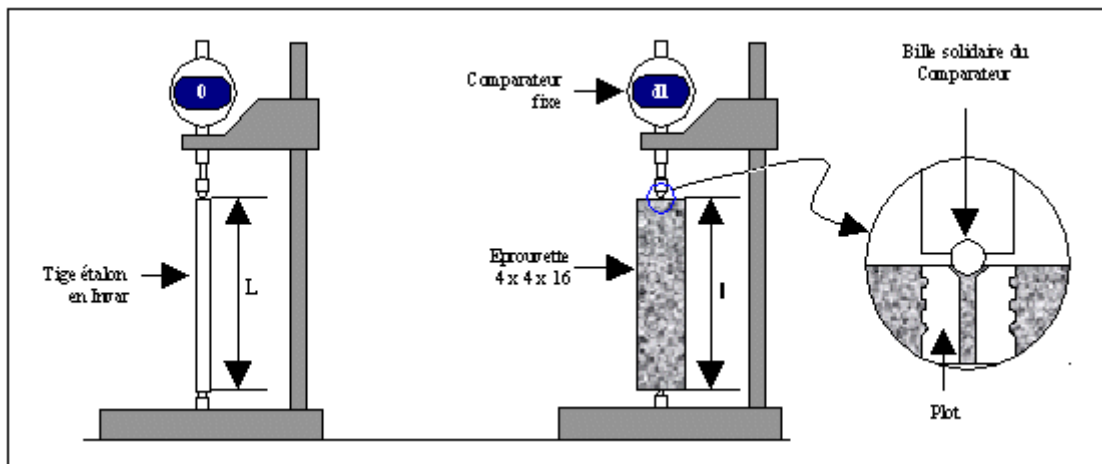


Figure II.15. Dispositif de retrait.

### ii. Résistances mécaniques

Des essais mécaniques sont effectués pour caractériser les mortiers à différents âges :

- Résistance à la traction par flexion sur trois éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .
- Résistance à la compression sur six demi prismes issues des essais de traction par flexion.

### 1. Résistance à la traction par flexion

L'essai est déterminé selon la norme **NF EN 196-1**[55] par un dispositif de flexion trois points (figure II.16) La résistance à la rupture en traction par flexion est déterminées à partir des essais destructifs de flexion trois points effectués sur trois éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  (Figure II.17). La machine utilisée est une presse hydraulique de charge maximale 100 KN. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite les résultats. La vitesse de chargement a été réglée à 50N/s jusqu'à la rupture. La charge à la rupture  $F_f$  est lue sur le cadran de la presse et la résistance à la traction par flexion est calculée par la relation suivante :

$$R_f = \frac{1.5 * F_f * L}{b^3}$$

$R_f$ : Résistance de flexion (MPa).

$F_f$ : Charge de rupture (N).

$L$  : Distance entre les appuis ( $L=100\text{mm}$ ).

$b$  : Largeur de la section droite de l'éprouvette ( $b=40\text{mm}$ ).

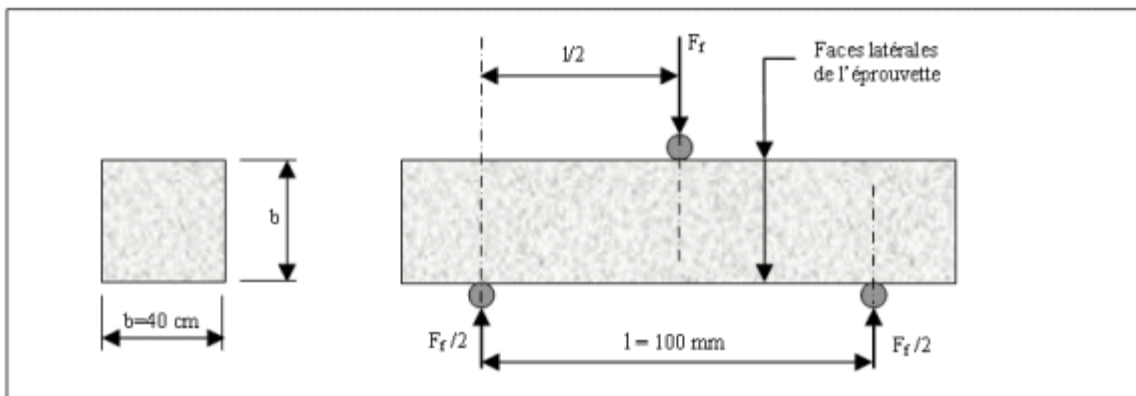


Figure II.16. Dispositif pour l'essai de flexion par trois points.



Figure II.17. Essai de traction par flexion.

## 2. Résistance à la compression

La résistance à la compression est mesurée conformément à la norme **NF EN 196-1**[55] sur les demi prismes des éprouvettes obtenus après rupture en flexion, comme indiqué sur la figure II.18 et figure II.19.

Si  $F_c$  est la charge de rupture à la compression, et  $b$  est le côté de la section, la contrainte de rupture sera :  $R_c = \frac{F_c}{b^2}$

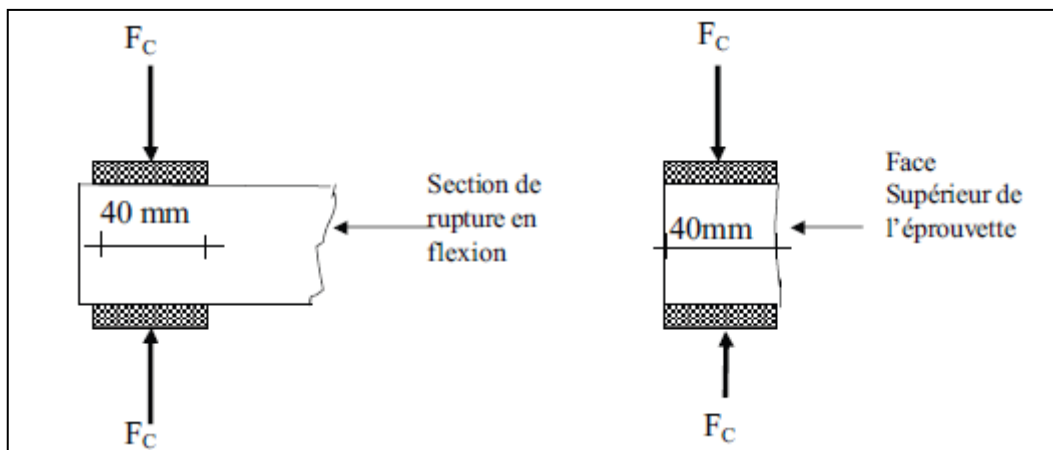
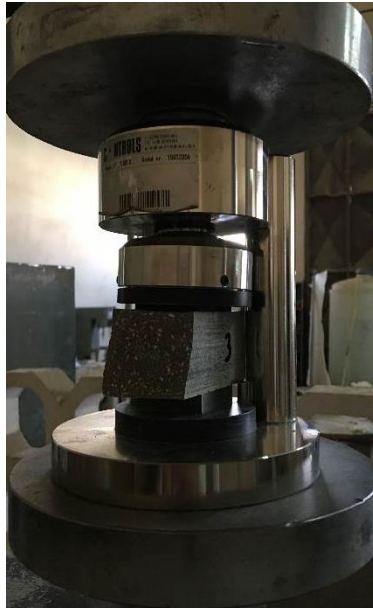


Figure II.17. Dispositif de rupture en compression.



**Figure II.18.** Essai de compression.

**iii. Absorption d'eau par capillarité**

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de caractériser la capacité d'un mortier à absorber et transmettre l'eau par capillarité. Dans cette étude, l'essai est effectué sur des échantillons prismatiques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  selon la norme **EN 1015-18**[56] préalablement séchés dans le four à environ  $80^\circ\text{C}$  jusqu'à poids constant. Ils sont ensuite placés dans un bac de sorte que leur surface inférieure jusqu'à 5 mm soit en contact avec l'eau (figure II.21). L'étanchéité latérale est assurée au moyen d'un ruban adhésif pour obtenir un écoulement unidirectionnel (figure II.20). Le poids des échantillons est mesuré à différents moments : 0, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480 et 1440 min. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un chiffon. L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué après 28 et 180 jours de durcissement.

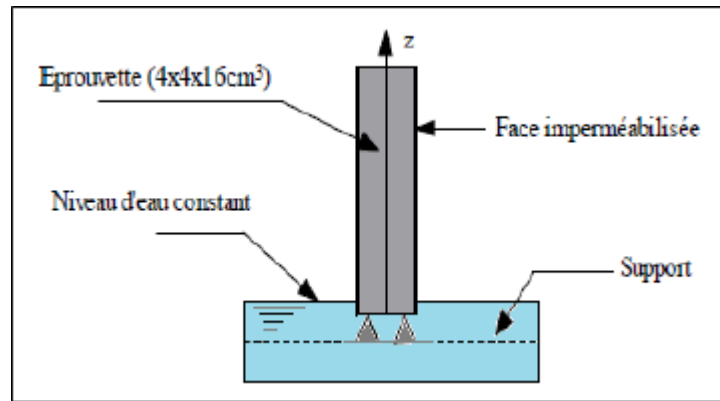


Figure II.19. Schéma d'essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient de capillarité  $C_c$  est obtenu en utilisant la formule suivante :

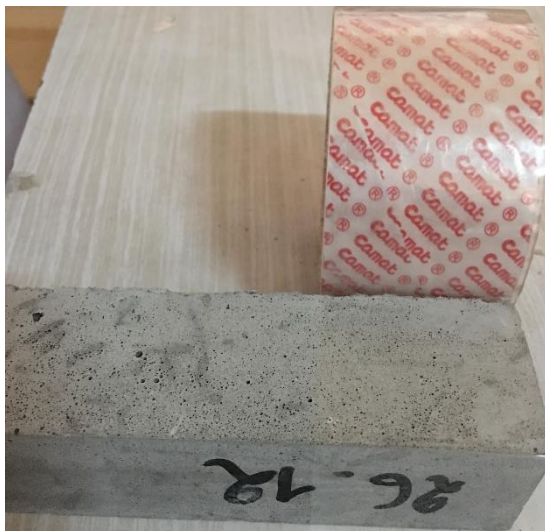
$$C_c = \frac{M}{S * \sqrt{t}}$$

$C_c$  : Coefficient de capillarité ( $g.cm^{-2}.min^{-1/2}$ ).

$M$  : Quantité d'eau absorbé (g).

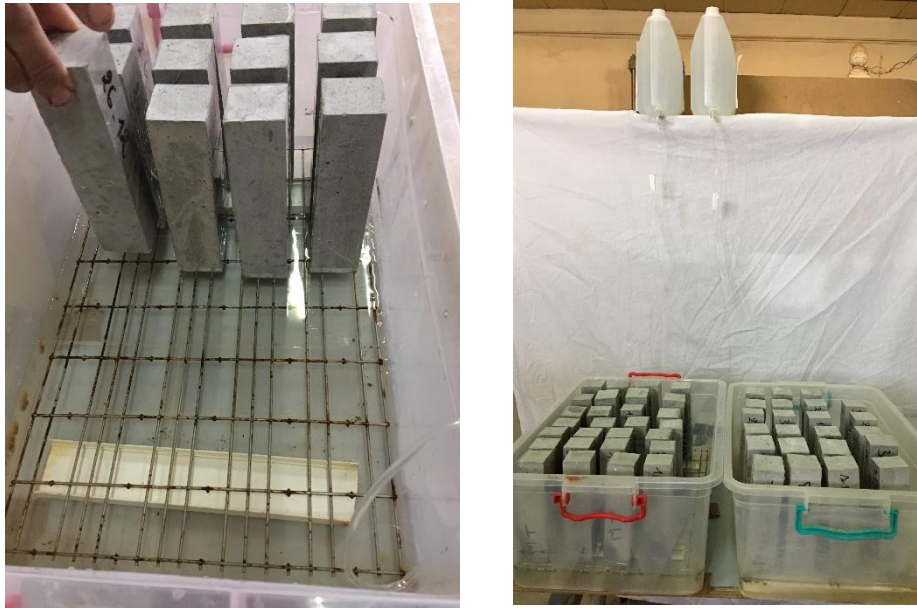
$S$  : Surface d'éprouvette qui est en contact avec l'eau

$t$  : Durée d'absorption (min).



MT 1	M 25 75 03	2M 0 75 25	3M 25 50 25
MT 2	M 25 75 02	4M 0 75 25	2M 25 50 25
MT 3	M 25 75 01	3M 0 75 25	1M 25 50 25
1M 0 50 50	4M 75 25 0	1M 75 0 25	MPP 3
2M 10 50 50	3M 75 25 0	2M 75 0 25	MPP 2
3M 0 50 50	2M 75 25 0	3M 75 0 25	MPP 1
1M 15 0 75	M 0 100 0 1	1M 50 50 0	
2M 25 0 75	M 0 100 0 2	2M 50 50 0	
3M 25 0 75	M 0 100 0 3	3M 50 50 0	
1M 50 25 25	M 50 0 50 3	1M 0 25 75	
2M 50 25 25	M 0 0 50 2	2M 0 25 75	
3M 50 25 25	M 50 0 50 1	3M 0 25 75	
M 0 0 100	M 100 0 0 1	3M 25 50 25	
M 0 0 100	M 100 0 0 2	2M 25 50 25	
M 0 0 100	M 100 0 0 3	1M 25 50 25	

Figure II.20. Etanchéifier les éprouvettes par un film plastique adhésif.



**Figure II.21.** Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

**iv. Auscultation sonique**

L'essai non destructif ultrasonique est la technique utilisée fréquemment pour estimer la qualité de béton ou mortier selon la norme **NF EN 12504-4**[57]. Cette méthode est basée sur la mesure de la vitesse de la propagation d'onde qui est en rapport avec les propriétés mécaniques et, plus directement, avec le module d'élasticité dynamique (figure II.22). Le module d'élasticité dynamique  $E_d$  peut être déterminé à partir de l'équation suivante de la vitesse de propagation d'onde :

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Avec :

$E_d$  : Module d'élasticité dynamique (GPa).

$\rho$  : Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\nu$  : Coefficient de poisson.

$V$  : Vitesse de propagation d'onde au sein du matériau (m/s).

Cette vitesse est le rapport de la longueur d'éprouvette sur le temps de propagation d'onde. Cette dernière mesure peut être faite sur l'ouvrage lui-même et permet de rendre compte in situ de la qualité du béton et de sa régularité.



**Figure II.22.** Appareil d'auscultation dynamique (ultra sonique).

### v. Porosité totale

La porosité est définie comme le rapport ( $V_v/V_t$ ) avec  $V_v$  est le volume occupé par les vides et  $V_t$  est le volume total du mortier. Pour chaque mortier, des éprouvettes cubiques de (50x50) mm<sup>2</sup> ont été utilisées pour déterminer la porosité selon les spécifications de la norme **ASTM C642**[58].

Les éprouvettes cubiques sont immergées dans l'eau pendant 24 heures (figure II.23.a), après elle sont séchées dans une étuve à 80°C (figure II.23.b).

La porosité peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_{abs}}{\rho_{app}}$$

Avec :

**P** : Porosité totale.

**V<sub>v</sub>** : Volume occupé par les vides.

**V<sub>t</sub>** : Volume total du mortier.

**ρ<sub>abs</sub>** : Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_{app}$  : Masse volumique apparente ( $\text{kg/m}^3$ ).

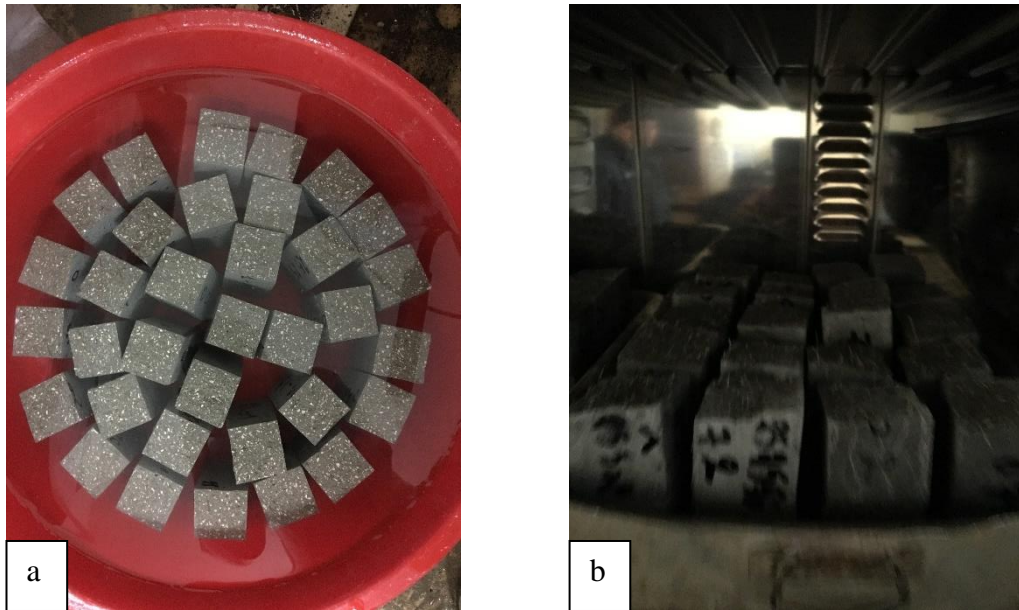


Figure II.23. Des éprouvettes cubiques pour l'essai de la porosité.

## II.4 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. La caractérisation des matériaux nous permet d'obtenir un matériau de bonne qualité, sur cela elle montre que :

- Le sable dunaire est un sable siliceux et très propre.
- Le sable calcaire est un sable propre.
- Les fibres de sisal ont un taux d'absorption de 143,72%.

Le présent travail a nécessité la confection environ de 350 éprouvettes prismatiques.

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussion**

---

### III.1 Introduction

Pour formuler un mortier de réparation, il est nécessaire de choisir les constituants et les proportionner en vue d'obtenir des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques répondant aux critères techniques et économiques, autorisant une meilleure application dans le domaine de la réparation.

1<sup>ère</sup> étape consiste à formuler un mortier auto plaçant (mortier témoin).

2<sup>ème</sup> étape repose sur la formulation d'un mortier auto plaçant en incorporant les fibres de sisal. Nous exposons la méthode utilisée pour l'optimisation des dosages des constituants du MAP avec fibres.

3<sup>ème</sup> étape repose sur l'étude de l'effet de mélange de différentes longueurs de fibres sur les performances des mortiers élaborés. Par la suite les résultats des essais et discussions.

Le mortier à formuler est un mortier de réparation auto plaçant qui doit satisfaire aux critères de maniabilité, de compatibilité et de durabilité :

- Etalement.
- Résistances mécaniques.
- Retrait.
- Module d'élasticité dynamique.
- Porosité.

### III.2. Formulation d'un mortier auto plaçant (MAP) témoin

La formulation des MAP la plus connue est celle développée à l'université de Kochi. Pour obtenir des compositions fluides et en même temps stables vis-à-vis au phénomène de ségrégation. La fluidité peut être obtenue par l'introduction des superplastifiants hauts réducteurs d'eau et la stabilité peut être obtenue par l'introduction des viscosifiants ou l'introduction des fillers calcaire, le principe de cette approche repose sur les conditions suivantes :

- Limitation de volume des granulats (volume important de pâte)
- Diminution de rapport  $E_{eff}/L$
- Utilisation des superplastifiants

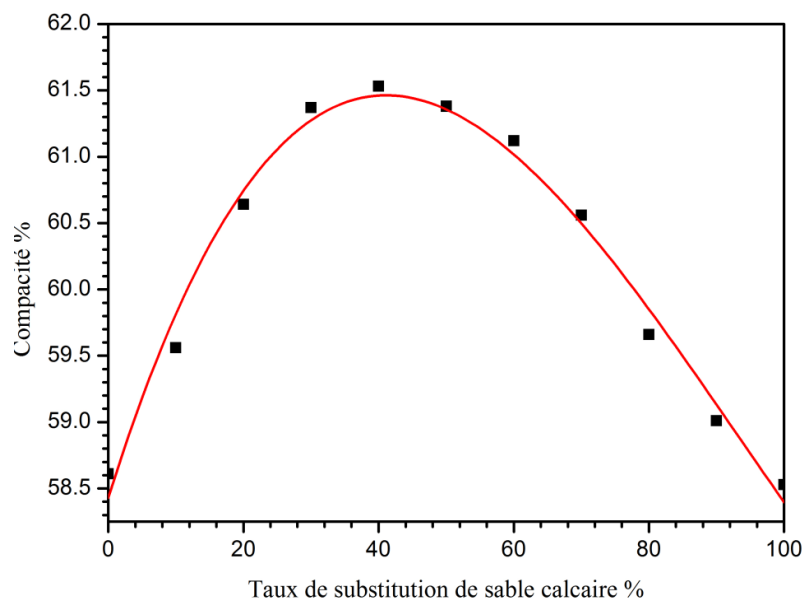
En connaissant d'avance les paramètres suivants :

- Rapport eau sur liant (E/L)
- Dosage de superplastifiant (SP), en % ; ce dosage est ajusté en fonction de la fluidité désirée.
- Masse volumique spécifique de sable ( $\rho_s$ ).
- Masse volumique spécifique de ciment ( $\rho_c$ )
- Masse volumique spécifique de fillers calcaire ( $\rho_{pm}$ )
- Extrait sec du SP (Esp), en %.
- Coefficient d'absorption du sable (Abs), en %
- Rapport poudre de marbre sur ciment (PM/C)

### III.2.1 Optimisation de squelette granulaire de sable (sable de dune – sable calcaire)

La compacité d'un mélange granulaire est une étape primordiale pour la formulation du mortier. Pour un squelette granulaire composé de deux sables de grains solides de tailles différentes, il existe un mélange optimum qui permet d'obtenir la compacité maximale du mélange, c'est-à-dire le pourcentage minimum de vides entre les grains solides.

La compacité C (%) est définie par le rapport du volume de matière pleine ( $V_s$ ) au volume total ( $V_t$ ).



**Figure III.1.** Evolution de la compacité de mélange en fonction du taux de substitution de sable calcaire.

La courbe obtenue de figure III.1 se présente sous forme de cloche et les résultats montrent bien que l'optimum de la compacité se trouve à un taux de substitution de sable calcaire = 40%.

Le mélange qui nous a donné la compacité maximale est celui de (60% de sable dunaire et 40% de sable calcaire) avec un optimum de 61,53%.

Ces résultats sont pris des travaux antérieurs de Mr Krobba dans le cadre de préparation de sa thèse de doctorat.

### III.2.2 Détermination de la composition

La formulation repose sur l'hypothèse suivante :

- Le volume de sable ( $V_s$ ) présente environ 50% du volume de mortier ( $V_m$ ), donc  $V_s/V_m=0.5$ . Si on parle en terme de volume de pâte  $V_s/V_p= 1$ .
- Des études ont montrées que le remplacement d'un pourcentage de l'ordre de 20% du ciment par une addition d'une finesse voisine de ciment peut donner un MAP homogène sans ressuage[61–63]. Pour cela, dans notre travail nous a allons remplacer 15% du ciment par la poudre de marbre.
- La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque vis-à-vis le ressuage. Le rapport  $E_{eff}/L$  choisi est égal à 0.4, pour obtenir un mortier autoplaçant (MAP) satisfaisant ayant un étalement d'environ à  $(28\pm 2)$  cm).

Après avoir déterminé la composition de mortier en maintenant tous les autres paramètres fixes, le dosage en SP est varié de 0.85 % à 0.95 % (tableau III.1), pour obtenir un étalement d'environ  $(28\pm 2)$ cm) avec le mini cône.

**Tableau III.1** Ajustement de dosage du Sp pour un litre de volume

Constituants	Valeurs		
SP(%)	0.85	0.92	0.95
Sable de dune (g/l)	725,24	725,24	725,24
Sable calcaire (g/l)	488,95	488,95	488,95
Ciment (g)	513.4	513.4	513.4
Poudre de marbre (g)	85,17	85,17	85,17
Eau totale (g)	261,13	261,13	261,13
Sp (g)	5,09	5,50	5,69
Etalement (cm)	14	28	34

### III.3 Optimisation de dosage des fibres

Après avoir déterminé le dosage d'eau, de sable et le dosage en superplastifiant, nous pouvons dire qu'on a obtenu la composition du mortier autoplacant sans fibres. L'étape suivante consiste à déterminer les différentes compositions de MAPF (Mortier Autoplacant Fibré).

Le but de la formulation de cette série de mortier consiste à déterminer le taux optimal de fibre de sisal pour avoir un retrait minimal (critère de compatibilité) et une résistance supérieure à celle de béton de structure. Nous devons chaque fois substituer et remplacer une quantité de sable par les fibres de sisal en prenant en considération le taux d'absorption d'eau des fibres, et en corrigeant les dépenses en sable, en eau et superplastifiant de manière à garder le dosage en liant constant (ciment et poudre de marbre) de  $598.6 \text{ kg/m}^3$ .

On a choisi trois longueur des fibres (5, 10, 20mm) et chaque longueur avait trois pourcentage (0,1 ; 0,2 ; 0,3 %). L'augmentation de dosage en fibre et du rapport (l/d) accroît le problème de distribution hétérogène et de floculation des fibres. Pour une longueur donnée, plus le pourcentage

est important, plus l'étalement du mortier diminue et pour un dosage en fibre donné, plus la longueur est importante, plus l'étalement du mortier diminue. Donc il est nécessaire d'ajuster la quantité de superplastifiant pour garder l'étalement dans l'intervalle de  $28 \pm 2$  cm. Les proportions des constituants des mortiers élaborés sont détaillées dans le Tableau ci-dessous.

**Tableau.III.2.** Constituants de différents types de mortiers/m<sup>3</sup>.

Notation		SC (g)	SD(g)	C(g)	PM(g)	SP%	E 70(L)	E30(L)	Fibre(%)
1	MT	488,95	725,24	513,4	85,17	0,92±0,98	182,79	78,34	0
2	ML5P1	487,98	723,8	513,4	85,17		183,57	78,67	0,10
3	ML5P2	487,01	722,37	513,4	85,17		184,32	79	0,20
4	ML5P3	486,04	720,93	513,4	85,17		185,05	79,31	0,30
5	ML10P1	487,98	723,8	513,4	85,17		183,54	78,66	0,10
6	ML10P2	487,01	722,37	513,4	85,17		184,26	78,97	0,20
7	ML10P3	487,04	720,93	513,4	85,17		185,02	79.29	0,30
8	ML20P1	487,01	722,37	513,4	85,17		184,32	79	0,10
9	ML20P2	487,01	722,37	513,4	85,17		184,24	78,96	0,20
10	ML20P3	486,04	720,93	513,4	85,17		184,96	79,27	0,30

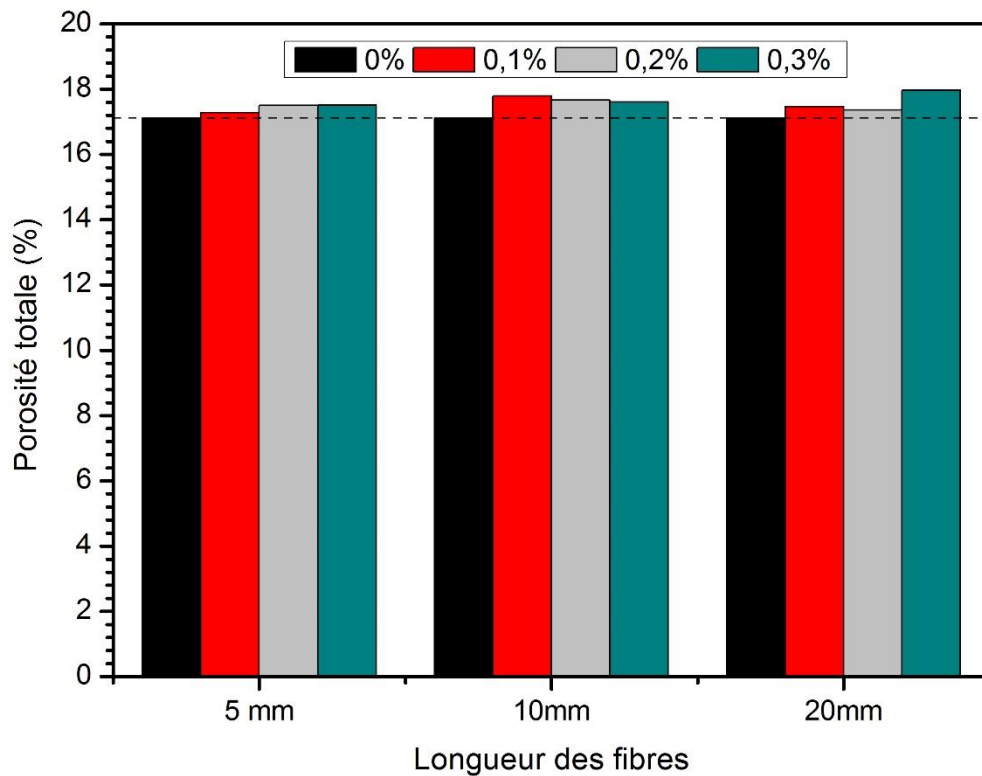
**Tableau III.3.** Désignation des différentes compositions utilisées.

<b>NOTATION</b>	<b>DESIGNATION</b>
MT	Mortier Témoin
ML5P1	Mortier renforcé de 0,10% de fibres d'une longueur de 5mm
ML5P2	Mortier renforcé de 0,20% de fibres d'une longueur de 5mm
ML5P3	Mortier renforcé de 0,30% de fibres d'une longueur de 5mm
ML10P1	Mortier renforcé de 0,10% de fibres d'une longueur de 10mm
ML10P2	Mortier renforcé de 0,20% de fibres d'une longueur de 10mm
ML10P3	Mortier renforcé de 0,30% de fibres d'une longueur de 10mm
ML20P1	Mortier renforcé de 0,10% de fibres d'une longueur de 20mm
ML20P2	Mortier renforcé de 0,20% de fibres d'une longueur de 20mm
ML20P3	Mortier renforcé de 0,30%de fibres d'une longueur de 20mm

### **III.3.1 Effet de dosage et de longueur des fibres sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers**

#### **III.3.1.1 Porosité totale :**

Les résultats des essais de la porosité effectuée sur des éprouvettes renforcées par des fibres de sisal à 28jours, sont présentés dans la figure III.2.

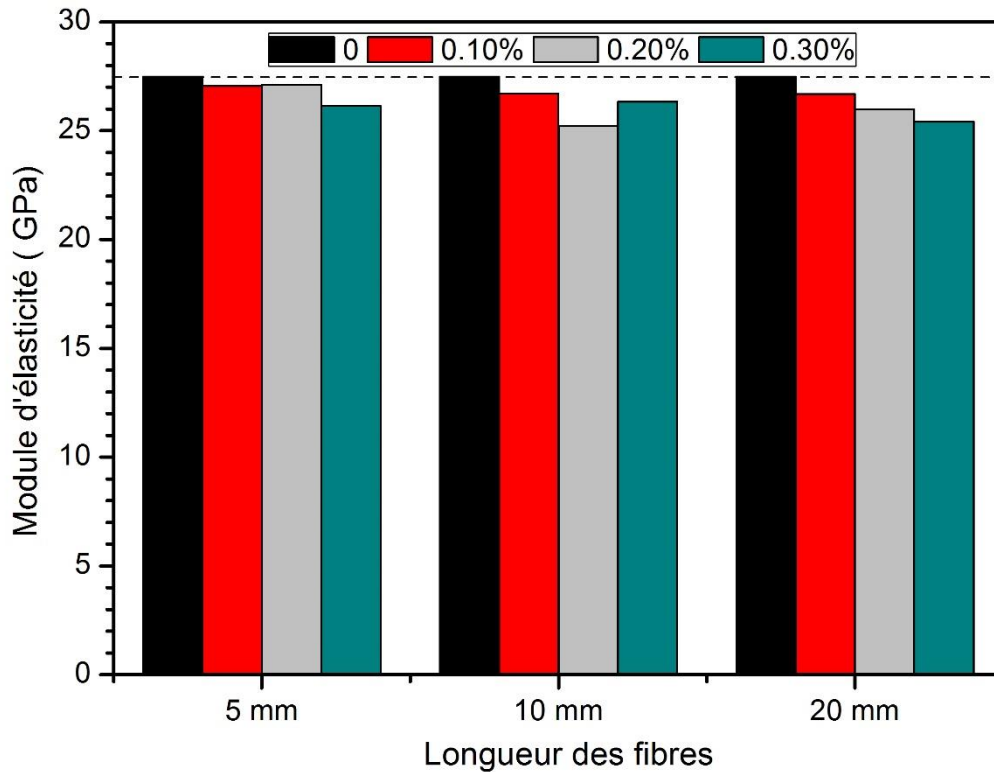


**Figure III.2.** Etude comparative de la porosité totale des différents types de mortier.

D'après la figure III.2, on remarque que, pour tous les mortiers renforcés par des fibres la porosité est légèrement supérieure de 4,96% pour les fibres de 20 mm de longueur et 0,30 % de dosage comparable au mortier sans fibre (témoin). Il peut être expliqué que l'augmentation de la teneur et de la longueur des fibres conduit à perturbation de l'arrangement des grains ce qui influe directement sur la compacité et par conséquent augmente la porosité. Ces résultats sont en accord avec **E.T Dawood et al**[64].

### III.3.1.2 Le module d'élasticité dynamique( $E_d$ )

La figure III.3 présente le module d'élasticité des mortiers testés de différents pourcentages et longueurs. Les résultats montrent que le module d'élasticité dynamique de différents mortiers fibré est inférieur au module d'élasticité de mortier témoin.



**Figure III.3.** Effet de dosage et de longueur de fibres sur le module d'élasticité dynamique( $E_d$ ) à 28 jours.

L'augmentation relative de vides dans les mortiers suite à l'ajout de fibres entraîne un décroissement du module d'élasticité dynamique d'une façon plus sensible pour les longueurs de 10 et 20 mm relativement aux fibres de 5 mm de longueur. D'autre part l'effet de pourcentage sur le module d'élasticité est remarquable lorsqu'il est important. Ces résultats en accord avec les observations rapportées dans le travail de **M.Ali et al**[65].

D'une façon générale le module d'élasticité reste supérieur à la valeur de 20 GPa exigée par la norme EN 1504-3[66].

### III.3.1.3 La résistance à la traction par flexion

A 28 jours, les résistances mécaniques en flexion trois points des mortiers obtenus sur trois éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , sont présentées dans la figure III.4. On constate que le mortier renforcé de 0,10% de fibres de la longueur de 5 mm indique une augmentation maximale de la résistance à la traction par flexion environ 16,88% et de 17,17% pour le mortier renforcé par des fibres de 20 mm de longueur, de 0,30% de dosage comparativement à celle du mortier témoin. La valeur la plus faible est remarquée pour un dosage de 0,30 % des fibres de longueur de 10 et de 20mm. Cependant il est à noter que pour les volumes et les longueurs des fibres utilisés la résistance à la traction par flexion obtenue est toujours supérieure à celle enregistrée pour un mortier sans microfibres. Les résultats trouvés sont en accord avec d'autres chercheurs (R.D.F.Toledo et al, Dawood ) [64, 67].

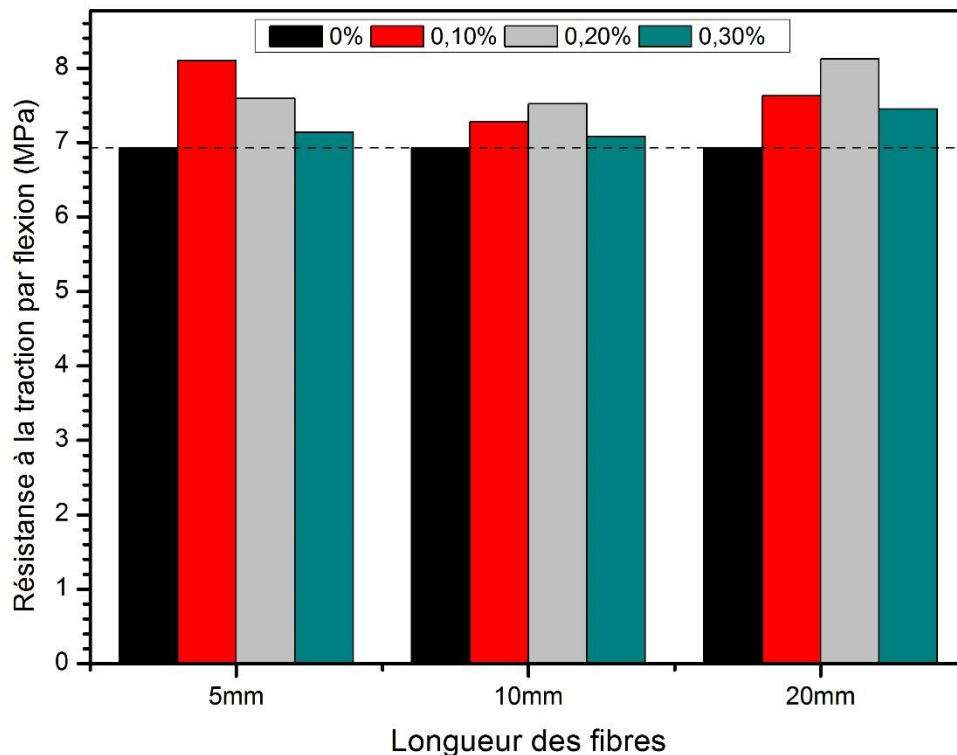


Figure III.4. Effet de dosage et de longueur de fibres sur la résistance à traction par flexion à 28 jours.

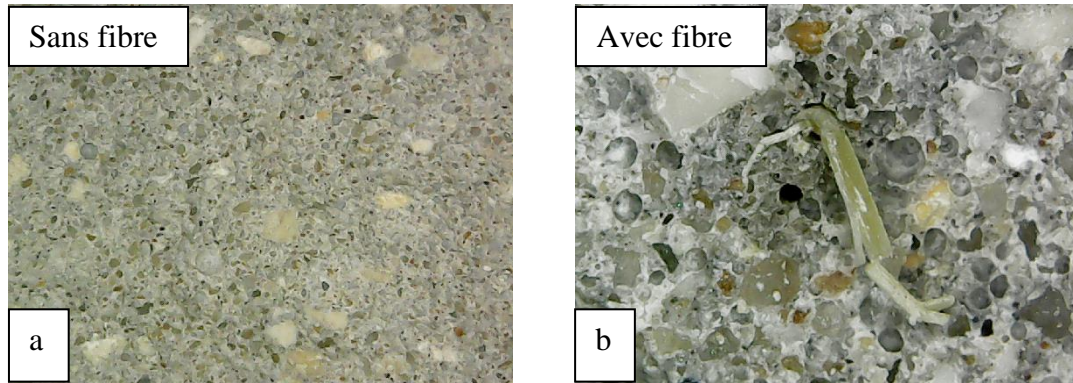


Figure III.5 Vue microscopique des échantillons.

La figure III.5 présente une vue microscopique des échantillons obtenues de l'essai de traction par flexion. Il est remarqué que d'une part, le mortier sans fibre (figure III.5.a) est moins poreux le mortier avec fibre (figure III.5.b), et d'autre part aucun problème d'arrachement des fibres n'est observé lors de l'essai de traction par flexion. Cela est peut-être dû à la meilleure adhérence entre les fibres et la matrice.

#### III.3.1.4 La résistance à la compression

La figure III.6 présente les résultats des essais de la résistance de compression à 28 jours obtenues sur six demi prismes renforcées par différentes teneurs et longueurs de fibres de sisal issues des essais précédents.

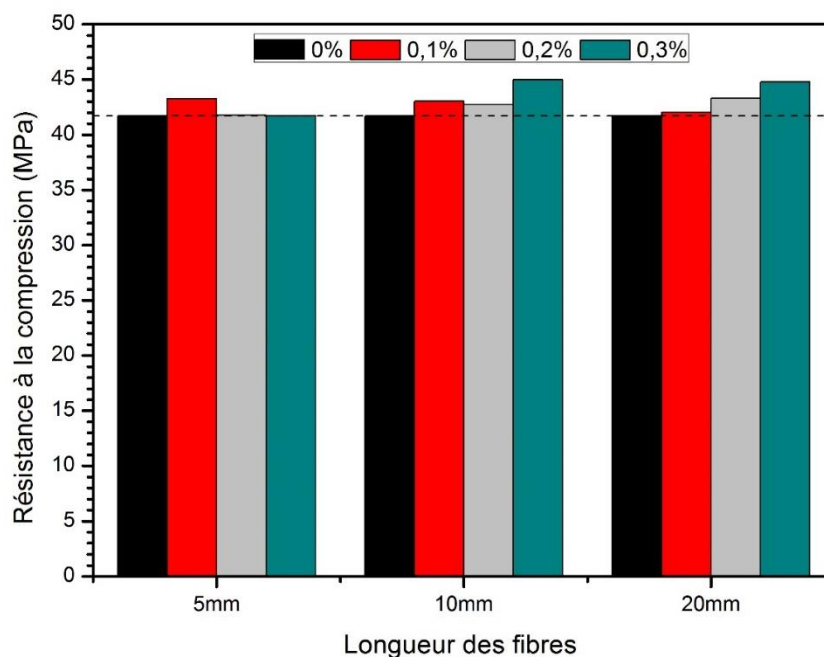


Figure III.6. Effet de dosage et de longueur de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours.

Les résultats de résistance à la compression du mortier avec différentes fractions volumiques et de longueur de fibres montrent que la valeur maximale est obtenue pour les mortiers ML20P3 et ML10P3 par un taux d'accroissement de l'ordre de 7,92% par rapport au mortier témoin qui est comparable à la valeur de la résistance de 45MPa recommandée par la norme 1504-3[66].

Il est bien clair que l'amélioration apportée par l'ajout des fibres sur le comportement mécanique en traction par flexion est beaucoup plus importante que celle à la compression, cette amélioration est due à la participation de la fibre à la couture de fissures.

#### III.3.1.5 Le retrait

Le retrait du béton est souvent l'origine de la fissuration, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition de mortier, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation

Les résultats de l'évolution de retrait total en fonction de temps sont présentés dans la figure III.7, ils ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques renforcées par différentes teneurs et longueurs de fibres de sisal.

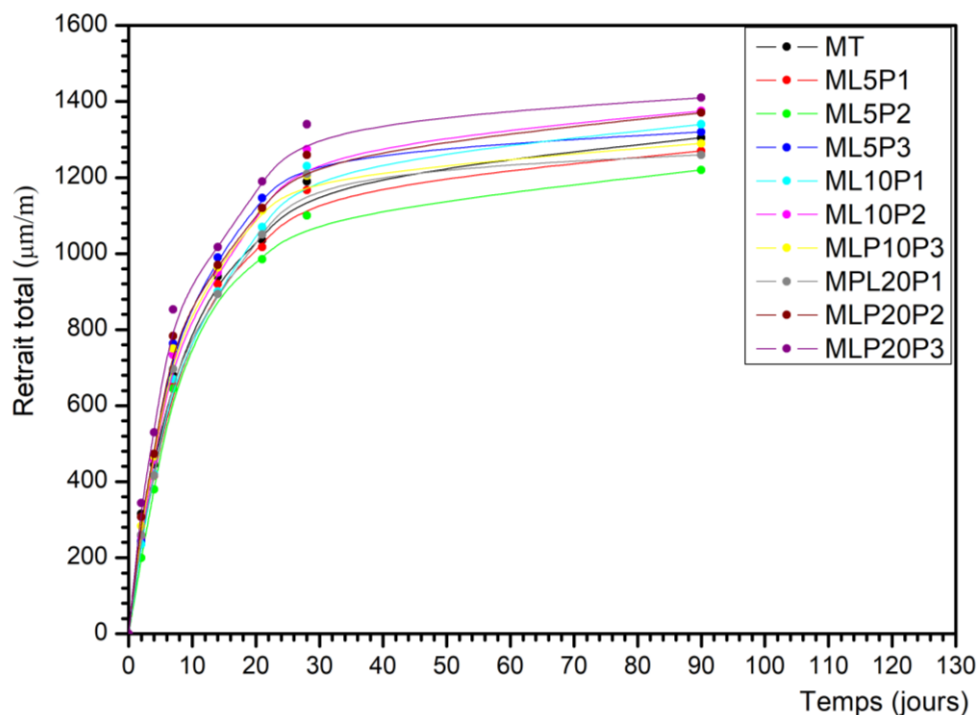


Figure III.7. Evolution de retrait total en fonction de temps.

La variation du retrait des mortiers en fonction du temps représentée dans la figure III.6 confirme la tendance trouvée dans la plupart des matériaux cimentaires. En effet, la majorité du retrait ( $\cong 70\%$ ) des mortiers confectionnés s'effectue à jeune âge (les deux premières semaines). En outre l'évolution du retrait en fonction de l'âge semble montrer la même allure pour tous les mortiers confectionnés.

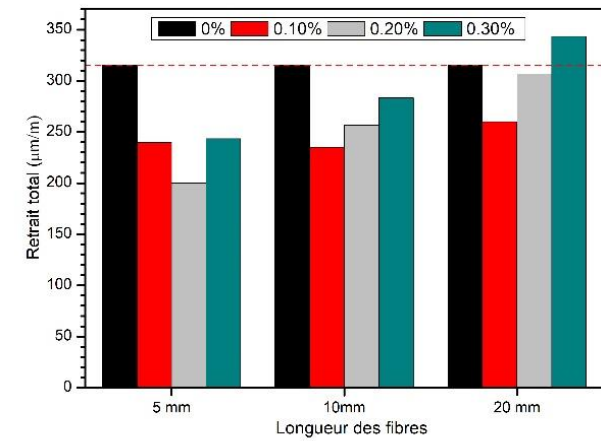
D'après la figure III.8 on peut constater que :

Une diminution notable de l'ordre de 36,50% de retrait à 2 jours pour le mortier renforcé par un taux de 0,20 % des fibres de 5mm de longueur par rapport au mortier témoin par contre pour un taux de 0,30 % des fibres longues (20mm) on constate une augmentation de 9% de retrait (figure III.8 a).

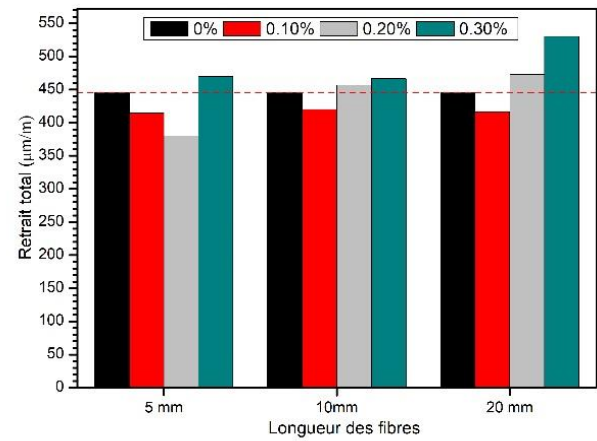
La réduction du retrait total atteinte 14,6% et 5 %, à 2 et 7 jours respectivement (figure III.8.b, c). La diminution de retrait est moins importante à partir de 7<sup>ème</sup> jours comme le montre les figures III.8. d, e , et f ceci est probablement lié au module d'élasticité plus élevé que la matrice cimentaire à courte terme, Ces résultats sont en accord avec le travail de **R.D.F Toledo et al**[67].

On observe aussi que le retrait des longueurs de 5 mm est moins que celui de 10mm, aussi que la longueur de 20mm. Peut-être cette augmentation est due à l'augmentation de la porosité (effet de longueur sur la porosité).

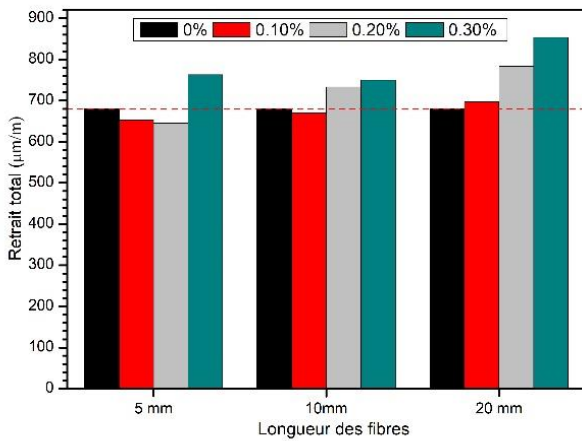
Le retrait du mortier renforcé par 0,2 % des fibres de 5mm de longueur reste toujours inférieur à celle de mortier témoin.



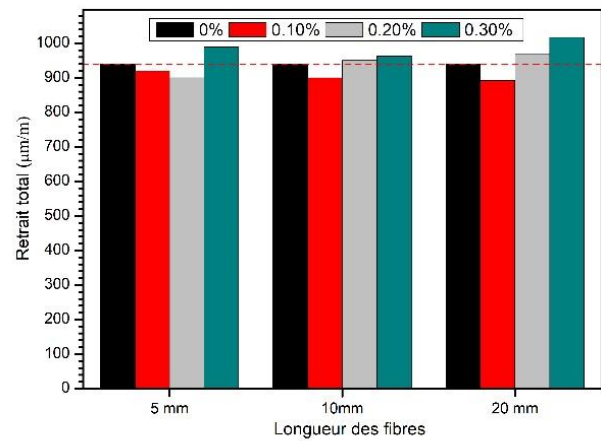
(a)



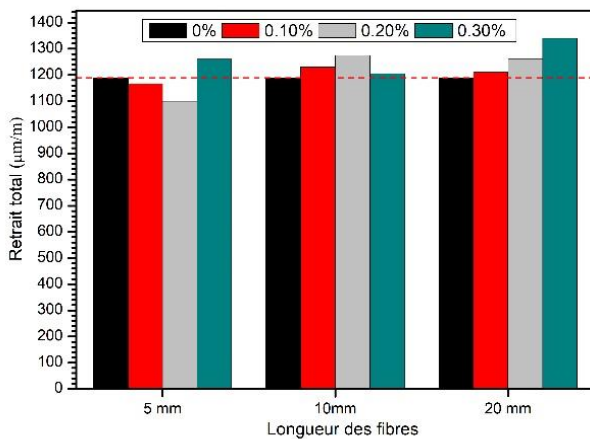
(b)



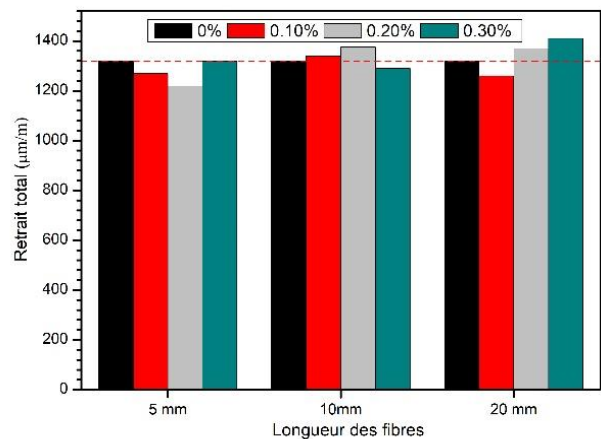
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figure III.8.** Etude comparative de retrait entre les différents types de mortiers : (a) à 2 jours ; (b) à 4 jours ; (c) à 7 jours ; (d) à 14 jours (e) à 28 jours (f) à 90 jours.

L'étude qui vient d'être exposée nous a permis d'effectuer une prospection systématique qui s'est traduite par la mise en évidence de deux paramètres de contrôle du comportement du mortier à savoir le dosage et la longueur de fibre. Nous rappelons que les recommandations de plusieurs chercheurs mettent l'accent sur l'importance des qualités de durabilité, de résistance et de compatibilité à satisfaire impérativement par tout mortier de réparation. Notre étude nous a permis de nous rendre compte qu'en fait ces critères ne sont pas forcément compatibles car la condition de retrait minimum (compatibilité) ne correspond pas à la condition de résistance.

Par voie de conséquence, la solution recherchée, se présentera sous forme d'un mortier présentant un compromis entre le critère de résistance et celui du retrait. La composition adoptée à cette fin est la suivante :

**Tableau III.4.** Mortier fibré choisi.

<b>Ciment [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Poudre de marbre [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Sable de dune [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Sable calcaire [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Eau [L]</b>	<b>SP [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Fibre %</b>
513,4	85,17	725,24	488,95	264,31	0,93÷0,95	0,2

Il est à indiquer que le dosage volumique des fibres de 0,2% choisi correspond à la valeur minimale en terme de retrait et des valeurs de résistance à la compression, de module d'élasticité qui satisfait les conditions de la norme EN 1504-3[66] pour une réparation structurale de classe R3.

### III.4 Effet de mélange

Après avoir déterminé le dosage optimal de fibres en terme de retrait, de résistance et de module d'élasticité, l'étape suivante consiste à étudier l'influence des différentes longueurs de fibres sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers confectionnés avec un système ternaire des fibres, des essais physiques et mécaniques ont été réalisés. Pour établir les diverses variations du mélange de fibres, un total de 15 mélanges établies par un plan d'expérience selon le plan de mélange, réalisé à l'aide du logiciel JMP 11. Les mélanges sont préparés avec un des rapports constants et des fibres constituées des mélanges ternaires comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau III.5. Constituants de différents types de mortiers

N°	Nomination	Ciment (g)	Sable D (g)	Sable C (g)	PM (g)	SP %	E70 (L)	E30 (L)	L5 %	L10 %	L20 %
1	M05050	487.01	722.37	513.40	85.17	0.93±0.98	184.32	79.00	0	50	50
2	M25075	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	25	50	25
3	M502525	487.01	722.37	513.40	85.17		184.29	78.98	50	25	25
4	M00100	487.01	722.37	513.40	85.17		184.24	78.96	0	0	100
5	M25750	487.01	722.37	513.40	85.17		184.24	78.96	25	75	0
6	M75250	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	75	25	0
7	M01000	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	0	100	0
8	M50050	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	50	0	50
9	M10000	487.01	722.37	513.40	85.17		184.29	78.98	100	0	0
10	M07525	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	0	75	25
11	M75025	487.01	722.37	513.40	85.17		184.29	78.98	75	0	25
12	M50500	487.01	722.37	513.40	85.17		184.29	78.98	50	50	0
13	M02575	487.01	722.37	513.40	85.17		184.24	78.96	0	25	75
14	M252550	487.01	722.37	513.40	85.17		184.24	78.96	25	25	50
15	M255025	487.01	722.37	513.40	85.17		184.26	78.97	25	50	25

**III.4.1 Modèles des réponses**

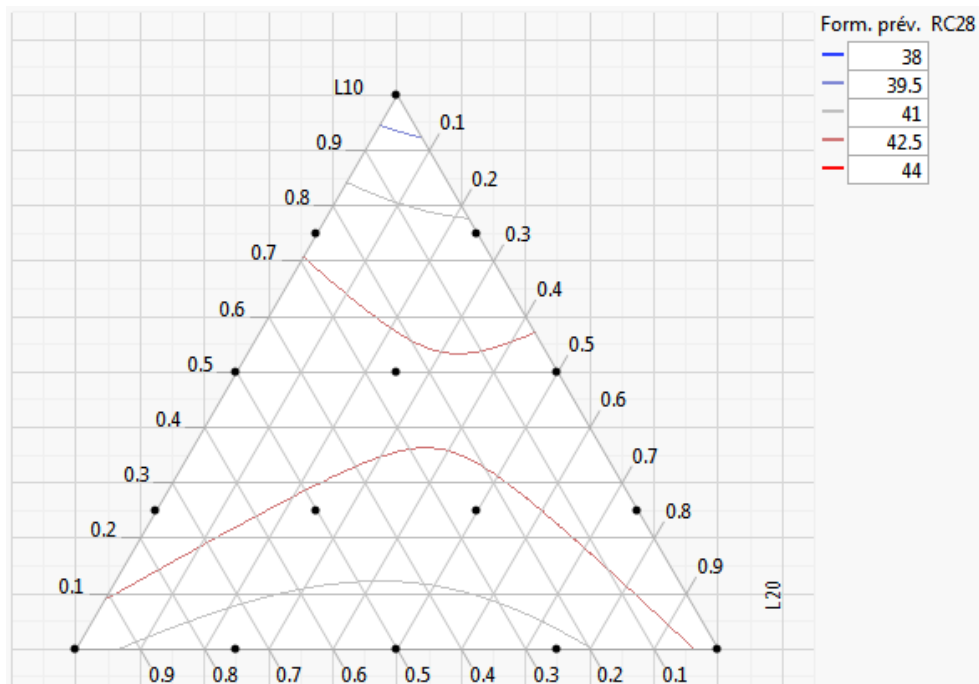
**a. Résistance à la compression**

$$R_{c28} = 41.57 \cdot L_5 + 38.55 \cdot L_{10} + 42.95 \cdot L_{20} + 14.84 \cdot (L_5 \cdot L_{10}) - 10.64 \cdot (L_{20} \cdot L_5) + 8.39 \cdot (L_{20} \cdot L_{10})$$

$$R^2 = 0.89$$

**Tableau III.6.** Résistance à la compression à 28 jours.

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	39,45	42,858
2	M25075	37,80	40,606
3	M502525	41,66	42,209
4	M00100	43,31	42,939
5	M25750	39,59	42,088
6	M75250	43,95	43,592
7	M01000	38,74	38,564
8	M50050	39,76	39,601
9	M10000	41,36	41,573
10	M07525	43,56	41,238
11	M75025	42,06	39,923
12	M50500	43,95	43,764
13	M02575	43,11	43,425
14	M252550	43,54	42,153
15	M255025	44,34	42,647



**Figure III.9.** Courbes isoréponses de la résistance à la compression à 28 jours par graphique ternaire.

**b. Résistance à la flexion**

$$Rf28 = 7.614 * L5 + 7.653 * L10 + 8.088 * L20 + L5 * (L10 * 1.511) + L5 * (L20 * 0.989) - L10 * (L20 * 0.225714285714264)$$

$$R^2 = 0.92$$

Tableau III.7. Résistance à la traction par flexion à 28 jours.

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	7,83	7,814
2	M25075	8,1	8,155
3	M502525	8	8,041
4	M00100	8,12	8,088
5	M25750	8	7,927
6	M75250	7,91	7,907
7	M01000	7,59	7,653
8	M50050	8,16	8,098
9	M10000	7,59	7,614
10	M07525	7,78	7,720
11	M75025	7,96	7,918
12	M50500	8	8,012
13	M02575	7,92	7,937
14	M252550	8	8,051
15	M255025	7,95	7,975

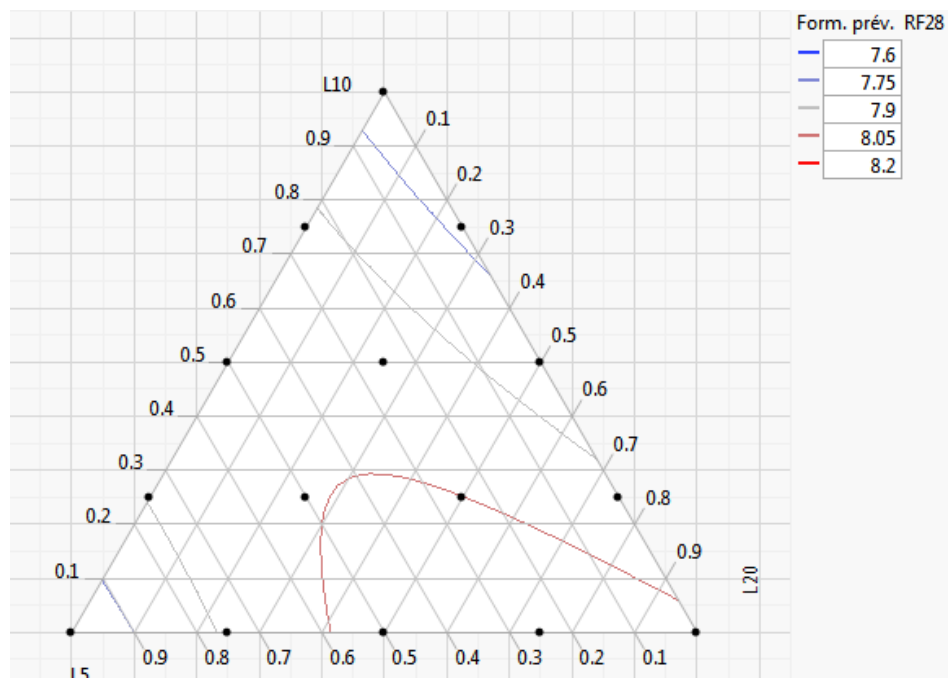


Figure III.10. Courbes isoréponses de la résistance à la traction par flexion à 28 jours par graphique ternaire.

c. Module d'élasticité

$$Ed_{28} = 25.51 * L5 + 25.15 * L10 + 25.34 * L20 + L5 * (L10 * 4.73) + L5 * (L20 * -1.3) + L10 * (L20 * -1.87)$$

$$R^2 = 0.92$$

Tableau III.8. Module d'élasticité à 28 jours.

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	24,8	24,776
2	M25075	25	25,139
3	M502525	25,43	25,689
4	M00100	25,32	25,340
5	M25750	26	26,125
6	M75250	26,4	26,307
7	M01000	25,21	25,146
8	M50050	25,24	25,100
9	M10000	25,42	25,511
10	M07525	24,82	24,844
11	M75025	25,29	25,224
12	M50500	26,7	26,512
13	M02575	25,01	24,941
14	M252550	25,4	25,234
15	M255025	25,41	25,563

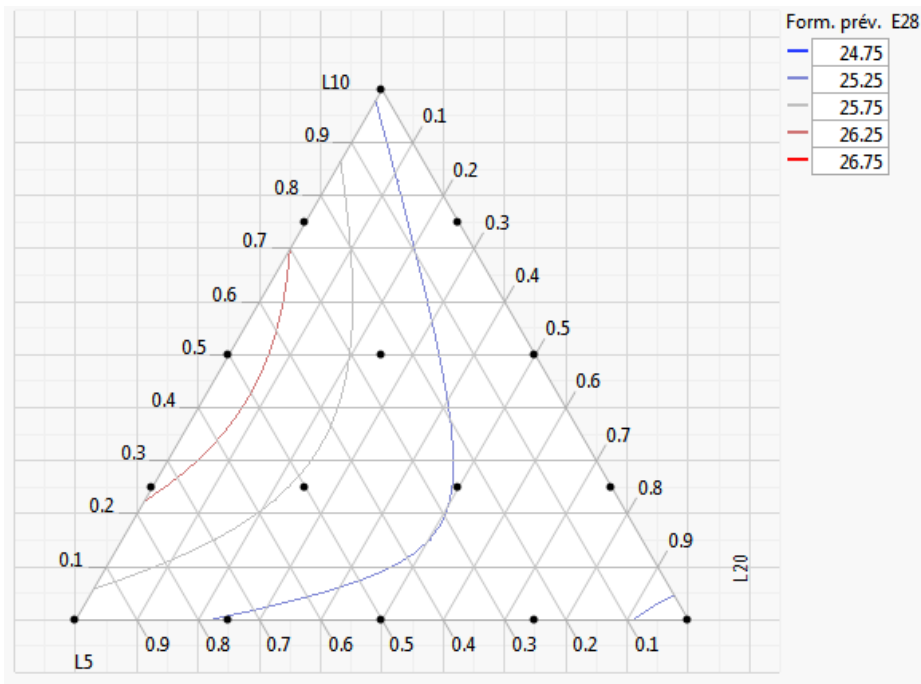


Figure III.11. Courbes isoréponses du module d'élasticité à 28 jours par graphique ternaire.

**d. Coefficient d'absorption**

$$C_s = 0.4284 * L5 + 0.559 * L10 + 0.462 * L20 + L5 * (L10 * 0.383) + L5 * (L20 * -0.134) + L10 * (L20 * 0.446)$$

$$R^2 = 0.96$$

Tableau III.9. Coefficient d'absorption d'eau par capillarite à 28 jours.

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	0,640	0,622
2	M25075	0,418	0,428
3	M502525	0,530	0,528
4	M00100	0,460	0,462
5	M25750	0,600	0,598
6	M75250	0,531	0,533
7	M01000	0,563	0,559
8	M50050	0,410	0,412
9	M10000	0,410	0,428
10	M07525	0,600	0,618
11	M75025	0,447	0,412
12	M50500	0,600	0,589
13	M02575	0,589	0,570
14	M252550	0,509	0,541
15	M255025	0,590	0,597

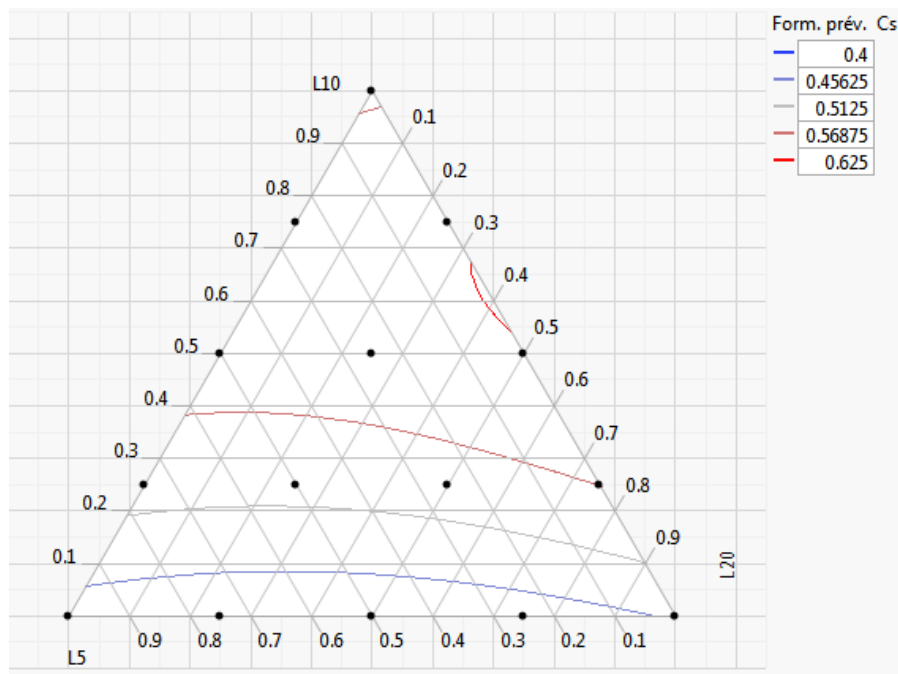


Figure III.12. Courbes isoréponses de coefficient d'absorption d'eau par capillarite à 28 jours par graphique ternaire.

e. Retrait à 2 jours

$$\varepsilon_{2\text{jours}} = 192.804 * L5 + 273.339 * L10 + 313.576 * L20 + L5 * (L10 * -0.477) + L5 * (L20 * 129.431) + L10 * (L20 * 109.994)$$

$$R^2=0.63$$

Tableau III.10. Retrait à 2 jours

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	375,13	320,96
2	M25075	367,17	307,65
3	M502525	220,59	266,12
4	M00100	306,7	313,58
5	M25750	261,1	253,12
6	M75250	221,21	212,85
7	M01000	256,7	273,34
8	M50050	276,75	285,55
9	M10000	200	192,8
10	M07525	301,46	304,02
11	M75025	240,72	247,27
12	M50500	238,66	232,95
13	M02575	272,64	324,14
14	M252550	275,05	303,22
15	M255025	308,73	285,04

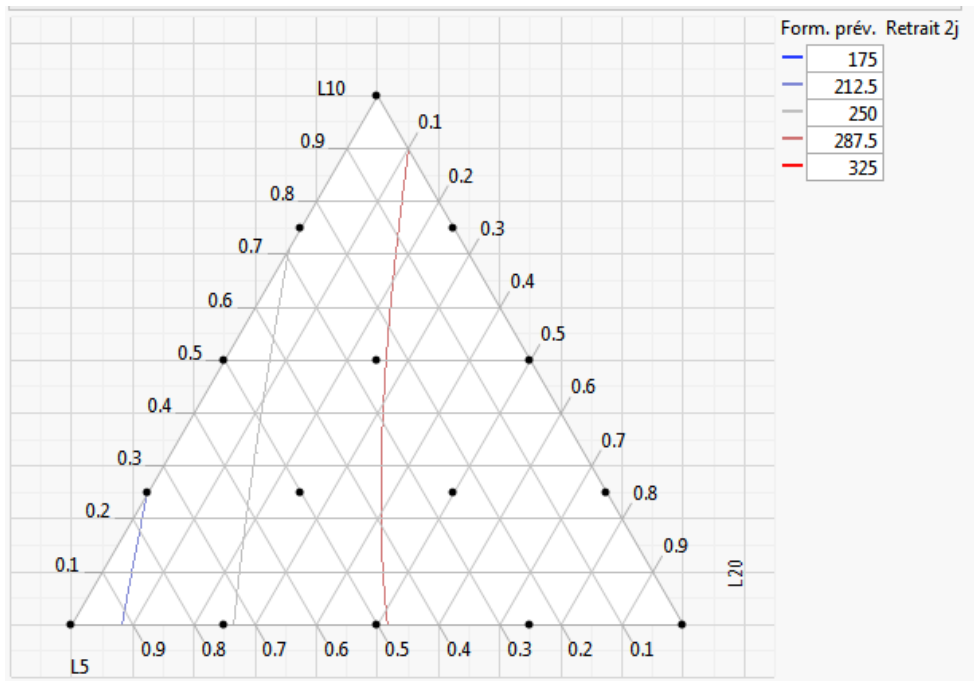


Figure III.13. Courbes isoréponses du retrait à 02 jours par graphique ternaire.

**f. Retrait à 28 jours**

$$\epsilon_{28\text{jours}} = 1117.798 *L5 + 1132.401*L10 + 1299.8434* L20 + L5 * (L10 * -421.536) + L5 * (L20 * -48.1735021428552) + L10 * (L20 * -16.420560571427)$$

$R^2=0.78$

Tableau III.11. Retrait à 28jours.

N°	Nomination	Résultats expérimentaux	Résultats analytiques
1	M05050	1199,8	1212,017
2	M25075	1272,5	1245,299
3	M502525	999,59	1107,220
4	M00100	1260	1299,843
5	M25750	1047,4	1049,712
6	M75250	1045,5	1042,411
7	M01000	1116,7	1132,401
8	M50050	1211,6	1196,777
9	M10000	1100	1117,798
10	M07525	1196,9	1171,182
11	M75025	1193,7	1154,277
12	M50500	1091,9	1019,715
13	M02575	1307,9	1254,904
14	M252550	1174,1	1178,051
15	M255025	1077	1112,855

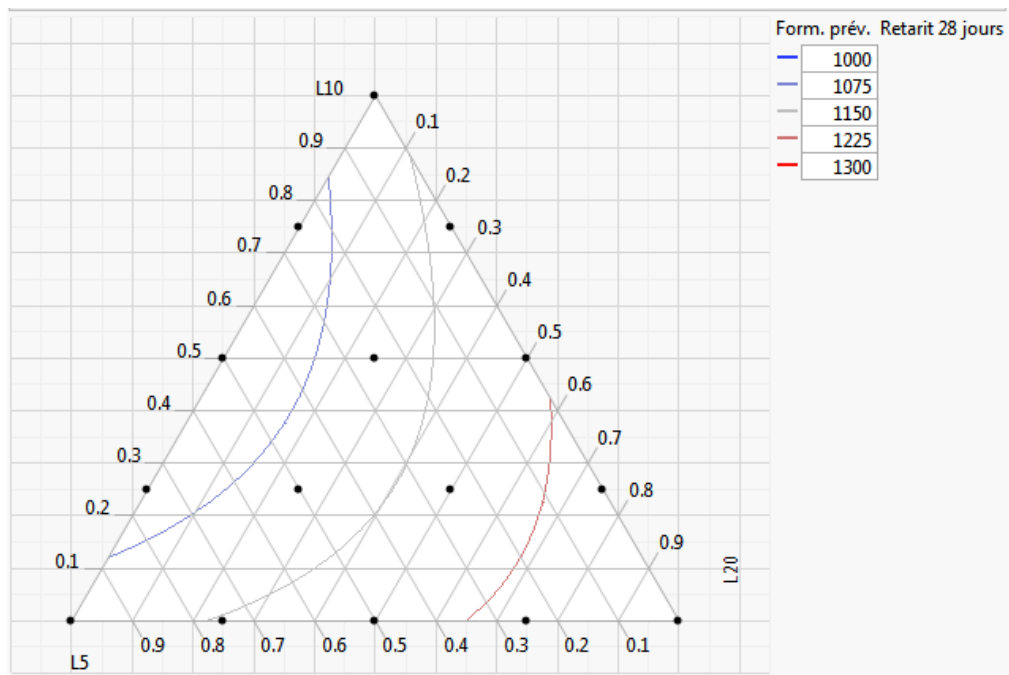


Figure III.14. Courbes isoréponses du retrait a 28 jours par graphique ternaire.

Dans les modèles cités précédemment on peut conclure que :

- L'importance d'un facteur est liée à la valeur absolue de son coefficient. Le signe négatif d'un coefficient signifie que le facteur fait diminuer la réponse, par contre le signe positif signifie que l'augmentation du facteur fait augmenter la réponse.

Les coefficients de corrélation des réponses étudiées sont acceptables ( $R^2 > 0,85$ ), à l'exception de retrait ( $R^2 = 0,63$  et  $0,78$ ).

# **Conclusion Générale**

---

## Conclusion générale

---

L'objectif que nous sommes fixés par ce travail consistait à apporter une contribution à la formulation d'un mortier de réparation à base de sable dunaire et sable calcaire renforcé par des fibres végétales de sisal. Ce choix s'explique par la rareté de travaux en relation avec le sujet. Il vise d'autre part à mettre à la disposition des réparateurs de constructions en béton et à des coûts aussi bas que possible, un matériau performant satisfaisant le maximum de critères techniques ceci grâce à la rentabilisation des ressources locales telles que le sable dunaire, sable calcaire, et les fibres végétales de sisal largement disponible sur le marché.

Le travail que nous présentons a nécessité la confection d'un nombre important d'éprouvettes dépassant le nombre de 350 éprouvettes de différentes formes et il s'articule sur les phases principales suivantes :

- Recherche bibliographique dans laquelle nous avons essayé de faire le point sur l'état de l'art en la matière.

- Optimisation des compositions de mortier témoin MT en utilisant de critères de compacité maximale du squelette granulaire ; elle est obtenue pour un mélange de 60% de sable dunaire et 40% de sable calcaire ; avec un optimum de 61.53%.

L'étude de la corrélation entre ces critères nous a mené à retenir les valeurs de  $V_S/V_M=0,5$  et  $E/L = 0,4$ .

Après avoir déterminé la composition de mortier, l'ajustement de dosage de superplastifiant, pour obtenir un étalement d'environ ( $28 \pm 2$ cm) avec le mini cône.

Nous avons entrepris par la suite l'étude de l'effet de l'ajout de différents pourcentages (0.1, 0.2, et 0.3) % de fibres de sisal avec différentes longueurs (5,10 et 20) mm (9 mélanges) sur le comportement physico-mécanique de mortier.

Les résultats que nous avons obtenus nous permettent de conclure que :

- L'ajout de fibre de sisal augmente légèrement la porosité de 4,96% pour les fibres de 20 mm de longueur et 0,30 % de dosage par rapport au mortier sans fibre (témoin).
- L'ajout de fibre de sisal réduit légèrement le module d'élasticité dynamique.
- L'introduction de 0,10% de fibre de sisal de 5mm de longueur apporte une augmentation de la résistance à la traction par flexion environ 16,88%

## *Conclusion générale*

---

- Le mortier renforcé par des fibres de 20 mm de longueur et de 0,30% de dosage a enregistré un gain de la résistance à la traction par flexion égale à 17,17%.
- Amélioration assez nette des résistances à la compression (de l'ordre de 7,92%) obtenue pour les mortiers ML20P3 et ML10P3.
- Une réduction du retrait total atteinte 14,6% et 5 %, à 2 et 7 jours respectivement.

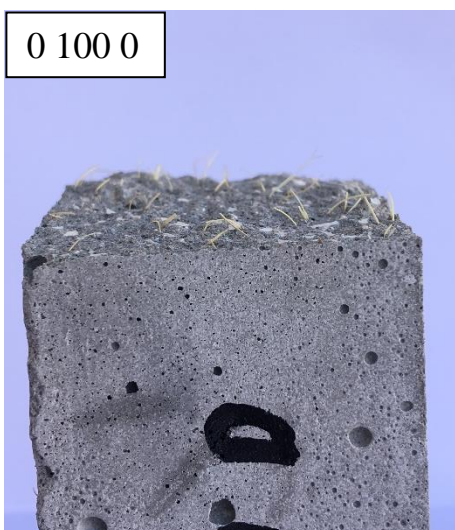
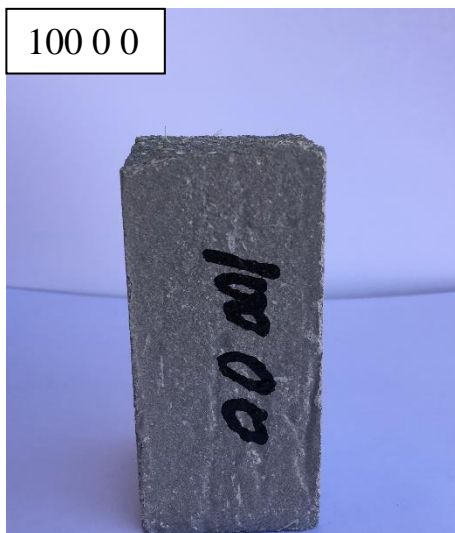
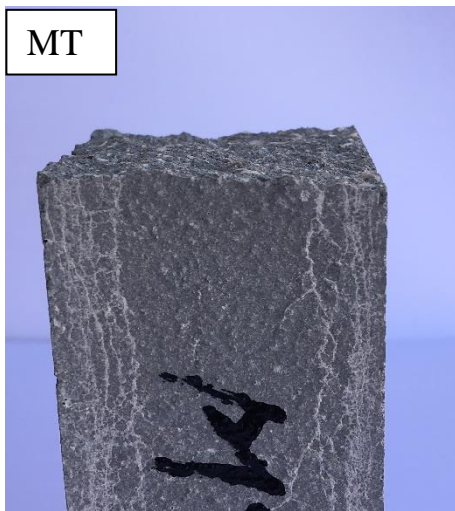
Le dosage volumique des fibres de 0,2% choisi correspond à la valeur minimale en terme de retrait et des valeurs de résistance à la compression, de module d'élasticité qui satisfait les conditions de la norme EN 1504-3[64] pour une réparation structurale de classe R3.

L'étude d'effet de mélange par la méthode de plans d'expériences de différentes longueurs des fibres sur les propriétés physico mécaniques des mortiers a fait l'objet de la dernière partie pour tirer le maximum des résultats de différentes propriétés par le minimum des essais, aux facteurs des trois longueurs (5,10, 20) mm. Les résultats trouvés à l'issue de cette étude expérimentale montrent que les coefficients de corrélation des réponses étudiées sont acceptables.

# **Annexes**

---

A.1 Vue des sections droites après la rupture



## **Références Bibliographiques**

---

## *Références bibliographiques*

---

- [1] Courard, L. and Bissonnette, B.: Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic, Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation, (2016).
- [2] Courard, L. and Bissonnette, B.: Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 2: Compatibilité et performances, Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation, (2016).
- [3] Pattnaik, R.: INVESTIGATION INTO COMPATIBILITY BETWEEN REPAIR MATERIAL AND SUBSTRATE CONCRETE USING EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHOD, (2006), p. 168.
- [4] Laurence, O.: La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation, (2001), p. 347.
- [5] Beer, F.P. ed.: Mechanics of materials, 6th ed ed., McGraw-Hill, New York, 2011.
- [6] Cusson, D.: Durability of repair materials, (1996), p. 8.
- [7] Nguyen, T.-H.: Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation2010.
- [8] Belkhiri, H. and Derragui, A.: Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses2016.
- [9] Filho, R.D.T. and Sanjuán, M.A.: Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age, Cement and Concrete Research, **29** (1999), no. 10, pp. 1597–1604.
- [10] B. Parmentier; V. Pollet and G. Zarmat: Le retrait empêché du béton. Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution, **2** (2009), p. 12.
- [11] Ahmad, Z.; Ibrahim, A. and Tahir, P.: Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber, International Journal of Engineering Science and Technology, **2** (2010), p. 10.
- [12] Bissonnette, B. and Pigeon, M.: Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes, Cement and Concrete Research, **25** (1995), no. 5, pp. 1075–1085.
- [13] EN, B.: 1504-3 (2005) Products and systems for the protection and repair of concrete structures-Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity-Part 3: Structural and non-structural repair, British Standard Institute, (2005).
- [14] Kiani, B.; Liang, R.Y. and Gross, J.: Material selection for repair of structural concrete using VIKOR method, Case Studies in Construction Materials, **8** (2018), pp. 489–497.
- [15] Hamiane, M. and Benmounah, M.: Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, (2014), p. 109.

- [16] Rossi, P.; ULM, F.-J. and Chauvel, D.: Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton 1996.
- [17] R.Dupain, R.Lanchon, J-C.Saint-Arroman «Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.docx no date.
- [18] Yahoui, K. and Sadki, M.: PROPRIÉTÉS DE MORTIER AUTOPLAÇANT À BASE DE DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES 2017.
- [19] Mekhermeche, A.; Hatia, M.; Kriker, A. and Abbani, S.: Contribution à L'étude des Propriétés Thermiques des Briques en Terre, *5 حوليات العلوم و التكنولوجيا* (2013), no. 1, pp. 81–89.
- [20] Nassah, D.: Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers fibrés 2017.
- [21] Allal, M.A.; Ghomari, F.; Ghomari, A.; Bouhraoua, R.T. and Belayachi, N.: Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales, (2017), p. 116.
- [22] Lima, P.R.L.; Toledo Filho, R.D. and Melo Filho, J.A.: Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fibre, *Materials Research*, **17** (2013), no. 1, pp. 38–46.
- [23] Lima, P.R.L.; Barros, J.A.O.; Roque, A.B.; Fontes, C.M.A. and Lima, J.M.F.: Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs, *Construction and Building Materials*, **187** (2018), pp. 620–634.
- [24] Belkadi, A.A.; Aggoun, S.; Amouri, C.; Geuttala, A. and Houari, H.: Effect of vegetable and synthetic fibers on mechanical performance and durability of Metakaolin-based mortars, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **32** (2018), no. 15, pp. 1670–1686.
- [25] Zabia Badr Eddine. Hidani Ibrahim Extraction et caractérisation mécanique des bio-fibres. Mmoire master. 2016. 2017 no date.
- [26] Nassah, D.: Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers fibrés 2017.
- [27] Di Bella, G.; Fiore, V.; Galtieri, G.; Borsellino, C. and Valenza, A.: Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene), *Construction and Building Materials*, **58** (2014), pp. 159–165.
- [28] Yahiaoui, L.: Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss) 2018.
- [29] Thomas, B.C. and Jose, Y.S.: Impact of sisal fiber reinforced concrete and its performance analysis: a review, *Evolutionary Intelligence*, (2019).

- [30] Benabed, B.; Azzouz, L.; Kadri, E.; Belaidi, S.E. and Soualhi, H.: Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes, (2012), p. 11.
- [31] Bouziani, T.; Bederina, M. and Hadjoudja, M.: Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC), *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **6** (2012), no. 1, pp. 59–64.
- [32] Maza.Mekki. Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à base de sable mixte (SD et SC). THESE DE DOCTORAT. 2016 no date.
- [33] Kwan, W.H.; Ramli, M. and Cheah, C.B.: Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment, *Construction and Building Materials*, **63** (2014), pp. 62–71.
- [34] A. Djoudi; M.M. Khenfer; A. Bali; E.H. Kadri and G. Debicki: Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete, *International Journal of the Physical Sciences*, **7** (2012), no. 21.
- [35] Ramli: Influences of Short Discrete Fibers in High Strength Concrete with Very Coarse Sand, *American Journal of Applied Sciences*, **7** (2010), no. 12, pp. 1572–1578.
- [36] Dawood, E.T. and Ramli, M.: Evolution of Durable High-Strength Flowable Mortar Reinforced with Hybrid Fibers, *ISRN Civil Engineering*, **2012** (2012), pp. 1–10.
- [37] Krobb, B.; Bouhicha, M.; Kenai, S. and Courard, L.: Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and *Stipa tenacissima* microfibers plant, *Construction and Building Materials*, **171** (2018), pp. 950–959.
- [38] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H. and Chou, N.: Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **30** (2012), pp. 814–825.
- [39] Okeola, A.; Abuodha, S. and Mwero, J.: Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete, *Fibers*, **6** (2018), no. 3, p. 53.
- [40] Filho, R.D.T. and Sanjuán, M.A.: Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age, *Cement and Concrete Research*, **29** (1999), no. 10, pp. 1597–1604.
- [41] Tol, R.D.: Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites, (2000), p. 17.
- [42] Bouziani, T.; Benmounah, A.; Makhloufi, Z.; Bédérina, M. and Queneudec T’kint, M.: Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **28** (2014), no. 18, pp. 1823–1834.
- [43] EN, N.: 196-6, Methods of testing cement-Part, **6** (2010).

- [44] EN, N.: 196-3: Méthodes d'essais des ciments–Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité (March), Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris, France, (2006).
- [45] EN, N.: 933-1. Mai 2012, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie, **1** (no date).
- [46] P 18-540, N.: Granulats: Définitions, conformités et spécifications, Afnor Paris, 1997.
- [47] P 18–555, N.: Granulats: mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, AFNOR– Paris, 1997.
- [48] P 94-054, N.: Sols: Reconnaissances et essais, détermination de la masse volumique des particules solides des sols, méthode du pycnomètre à eau, Association Française de Normalisation France, no date.
- [49] Magnan, J.-P.: Description, identification et classification des sols, Ed. Techniques Ingénieur, 1997.
- [50] EN, T.: 934-2 “Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling”, British Standards Institution, (2009).
- [51] Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss).PDFno date.
- [52] ASTM, C.: 305-99. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [53] Boukendakdji, O.; Kenai, S.; Kadri, E.H. and Rouis, F.: Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete, *Construction and Building Materials*, **23** (2009), no. 7, pp. 2593–2598.
- [54] EN, B.: 12617-4. Products and systems for the protection and repair of concrete structures-test methods-Part 4: Determination of shrinkage and expansion, Br Stand Inst. London, (2000).
- [55] EN, N.: 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques, French Standard, (2006).
- [56] EN, B.: 1015-18 (2002) Methods of test for mortar for masonry, Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, (2002).
- [57] Norme, N.F.: EN 12504-4, Essai d'auscultation sonore, AFNOR, (2005).
- [58] ASTM: ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM Philadelphia^ ePA PA, 2001.

- [59] Bouziani, T.; Benmounah, A.; Makhloufi, Z.; Bédérina, M. and Queneudec T'kint, M.: Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **28** (2014), no. 18, pp. 1823–1834.
- [60] Boukendakdji, O.; Kadri, E.-H. and Kenai, S.: Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, **34** (2012), no. 4, pp. 583–590.
- [61] bederina, M.; makhloufi, Z. and bouziani, T.: Effect of Limestone Fillers the Physic-Mechanical Properties of Limestone Concrete, *Physics Procedia*, **21** (2011), pp. 28–34.
- [62] Dawood, E.T. and Ramli, M.: Evolution of Durable High-Strength Flowable Mortar Reinforced with Hybrid Fibers, *ISRN Civil Engineering*, **2012** (2012), pp. 1–10.
- [63] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H. and Chouw, N.: Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **30** (2012), pp. 814–825.
- [64] Raupach, M.: Concrete repair according to the new European standard EN 1504, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, (2006), pp. 6–8.
- [65] Filho, R.D.T. and Sanjuán, M.A.: Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age, *Cement and Concrete Research*, **29** (1999), no. 10, pp. 1597–1604.

**ملخص :** في السنوات الأخيرة، ظهر اهتمام واضح لاستعمال المواد المحلية والموارد الطبيعية المتجددة في مجال البناء والإشغال العمومية وهذا لتلبية الحاجة الهائلة لمواد البناء والمساهمة في التنمية المستدامة. إن تقوية المونة بواسطة الألياف أصبحت أكثر استخداماً وذلك لتحسين أدائها الميكانيكي لا سيما مقاومة الشد والتشققات وهذا بهدف استعمالها في مجال الإصلاح. في هذا الإطار تهدف هذه الدراسة إلى المشاركة في تطوير خلطة لمونة إصلاح ذات قاعدة رمل كثبان ورمال كلسية لهذا دراسة تجريبية تمت لإيجاد التركيبة للمونة ثم تمت دراسة تأثير إضافة الألياف سيزال على الخصائص الفيزيوميكانيكية للمونة المتحصل عليها. من أهم النتائج المتحصل عليها أظهرت التأثير الإيجابي للألياف المضافة على الانكماش والمقاومات الميكانيكية للمونة.

**الكلمات المفتاحية:** المونة، رمل الكثبان، الرمال الكلسية، الياف السيزال، الانكماش، المقاومة الميكانيكية.

**Abstract** In recent years, great interest has been oriented towards the use of local materials and renewable natural resources in building and public works. This is to satisfy the enormous need for these materials and contribute to sustainable development. Hence, the technique of reinforcing building materials, in this case of repair mortars with fibres has developed and become more and more used in order to improve their mechanical performances, in particular their tensile strengths and cracking whose purpose is to use it in the field of repair. In this context, the objective of this work is to contribute to the formulation of a repair mortar based on sand dunes and limestone sand. At first part of the work, an experimental investigation was carried out to determine the optimal of the constituents of the mortar.

In the second part, the effect of adding sisal fibre on the physical-mechanical behaviour of optimised mortar was assessed. One of the remarkable results obtained is that the favourable effect of sisal fibre on the shrinkage and strength of the mortar.

**Keywords:** Repair mortar, dune sand, limestone sand, sisal fibre, shrinkage, mechanical strength.

**Résumé :** Depuis quelques années, un grand intérêt s'est orienté vers l'utilisation des matériaux locaux et les ressources naturelles renouvelables dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Ceci pour satisfaire le besoin énorme de ces matériaux et contribuer au développement durable. D'où, la technique du renforcement des matériaux de constructions, en l'occurrence les mortiers, par des fibres s'est développée et devenue de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration dont le but de l'utiliser dans le domaine de réparation. Dans ce cadre, l'objectif de notre travail est de contribuer à la formulation d'un mortier de réparation à base de sable des dunes et sable calcaire. A cet effet, une première investigation expérimentale portant sur l'optimisation des constituants du mortier a été effectuée, ensuite l'effet d'adjonction des fibres de sisal sur le comportement physico-mécanique de ce mortier optimisé a été appréhendé. L'un des résultats les plus remarquables que nous avons obtenu est celui de l'effet favorable des microfibrilles de sisal sur le retrait et les résistances mécaniques du mortier.

**Mots clés :** Mortier de réparation, sable de dune, sable calcaire, fibre de sisal, retrait, résistances mécaniques.