



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par :

NOUREDDINE Belgacem Ayoub & BOUHADDA Omar

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : STRUCTURES

Thème

**ETUDE D'UN COMPOSITE DE REPARATION A BASE DE
DECHETS DE VERRE DESTINE AU RENFORT DE BETON
DEGRADE**

Jury de soutenance :

Mr. AMARA Saleh

Maître de conférences A

Président

Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine

Maître de conférences A

Examineur

Mme. DAMENE Zineb

Maître de conférences B

Rapporteur

Promotion : Juin - 2019

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تجميع نفايات الزجاج واستعمالها كإضافة لإنتاج ملاط إصلاح عالي الأداء يلبي متطلبات القوة والمتانة. يعد استغلال هلام الصبار كمساعد راتيني في مجال مواد البناء بديلاً قيد الدراسة.

مبدأ العمل هو دراسة إمكانية إنتاج مركب اسمنتي لإصلاح الشقوق والخرسانة المتدهورة. تتكون ملاط الإصلاح هذا من نسبة مئوية من الزجاج الناعم (20٪)، ونسبة من الألياف الزجاجية المهذورة (4٪) المستبدلة جزئياً في الرمال، ويتم إدخال هلام الصبار كراتنج بين المصفوفة والتقوية (الألياف الزجاجية). أظهرت نتائج الدراسة المركبة أن استبدال نفاية الألياف الزجاجية له تأثير سلبي على الخصائص الميكانيكية، في حين أن استبدال نفايات الزجاج المسحوقة يحسن بشكل كبير من أداء المركب، مما يجعل من الممكن اعتباره مركب إصلاح.

كلمات مفتاحية: تجميع، نفايات الزجاج، مسحوق الزجاج، ألياف الزجاج، هلام الصبار.

Abstract

This study aims at recovering glass garbage as an addition for the production of a high-performance repair mortar that meets the requirements of strength and durability. The exploitation of gel aloe-vera as resin additive in the field of building materials is an alternative to study.

The principle of the work is to study the possibility of producing a cement composite for the repair of cracks and degraded concrete. These repairs mortars are composed of a percentage of fine glass (20%), a percentage of fiberglass garbage (4%) substituted in sand, the introduction of aloe-vera gel is studied as a resin between the matrix and the reinforcement (fiberglass). The results of composites study showed that the substitution of fiberglass garbage has a negative effect on the mechanical properties, however substitution of fine glass improved considerably the performance of composite, which allows to consider it as a repair composite.

Key words: valuation; glass garbage; Fine glass; fiberglass; aloe vera gel.

Résumé

Cette étude vise la valorisation des déchets de verre comme ajout pour la production d'un mortier de réparation performant qui répond aux exigences de résistance et de durabilité. L'exploitation du gel d'aloé-vera comme adjuvant résineux dans le domaine des matériaux de construction est une alternative à étudier.

Le principe du travail est d'étudier la possibilité de production d'un composite cimentaire destiné à la réparation des fissures et du béton dégradé. Ces mortiers de réparations sont composés d'un pourcentage de fine de verre (20%), un pourcentage de déchets de fibre de verre (4%) substitués dans le sable, l'introduction du gel d'aloé-vera est étudié comme résine entre la matrice et le renfort (fibre de verre). Les résultats d'étude des composites ont montré que la substitution de déchets de fibre de verre a un effet négatif sur les caractéristiques mécaniques, en revanche la substitution des fines de verre broyé améliore considérablement les performances du composite, ce qui permet de le considérer comme un composite de réparation.

Mots clés : valorisation ; déchets des verres ; Fine de verre ; fibre de verre ; gel d'aloé-vera.

REMERCIEMENT

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Nous tenons à remercier notre encadreur **Mme Zineb DAMENE**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à Monsieur **AMARA Saleh**, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, pour le grand honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de soutenance.

Nous remercions également Monsieur **BELAIDI Akram Salah Eddine**, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants en particulier : **Mr B. KROBBA** pour leurs conseils enrichissants, leurs appuis et leurs disponibilités.

Nos grands remerciements vont également à **Mr B. HAMDI** et l'ensemble du personnel du laboratoire de Génie civil de Laghouat.

A nos collègues fidèles et sincères qui nous ait accompagné pendant nos études universitaires.

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.

Dédicaces

**Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie **

** A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours inconditionnels, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études **

وقل ربّ ارحمهما كما ربياني صغيرا

**A mon très cher frère et son petite famille **

** A mes très chères sœurs **

**A mes charmants neveux **

** A toute la famille BOULHADA **

**A Mon binôme Ayoub et son famille **

**A Tous mes amis (es) que j'ai côtoyés Durant ma vie **

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible

CHAR

Dédicace

*Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de
m'avoir permis d'apprendre ce que j'ignorais, de m'avoir donné la
santé et tout ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail
imposé et rédiger ce mémoire.*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours inconditionnels,
leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études,*

A mon cher frère, Islam,

*A mes chères sœurs Asmaa, Sirine et Israa pour leurs encouragements
permanents,*

A mes amis (Hamid , Kacem , Taha ,Mohamed,)

A mon binôme Omar et toute la famille BOUHADDA

*A toute la famille NOUREDDINE et KERROUCHE pour leurs soutiens tout au
long de mon parcours d'études,*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à
mes côtés,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi.*

Ayoub

Table de matières

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. Différentes causes de dégradation	3
I.1.1. Les dégradations dues aux attaques chimiques.....	5
I.1.1.1. Carbonatation du béton	5
I.1.1.2. Corrosion des armatures	6
I.1.1.3. Attaque par les sulfates	7
I.1.1.4. Attaque par des acides	8
I.1.1.5. Alkali-réaction.....	8
I.1.2. Les dégradations d'origine mécanique	9
I.1.2.1. Les chocs.....	9
I.1.2.2. Erreurs de conception et d'exploitation.....	9
I.1.2.3. Défauts d'exécution.....	10
I.1.3. Les dégradations d'origine physique.....	10
I.1.3.1. Le feu	10
I.1.3.2. Cycle gel/ dégel.....	11
I.1.4. Symptômes de la dégradation du béton	11
I.1.5. Conclusion sur causes de dégradation	12
I.2. Evaluation et diagnostique	12
I.2.1. Inspection de routine.....	13
I.2.1.1. Inspection visuelle	13
I.2.2. Essais de base.....	13
I.2.2.1. Dureté de Surface.....	13

Table de matières

I.2.2.2. Localisation des armatures et détermination de leur enrobage	14
I.2.2.3. Profondeur de carbonatation	14
I.2.2.4. Mesure des largeurs de fissuration.....	14
I.2.3. Essais complémentaires	15
I.2.3.1. Examen par ultrasons	15
I.2.3.2. Détermination de la résistance en compression	15
I.2.3.3. Évaluation de la structure.....	15
I.3. Généralité sur les techniques de réparation	16
I.3.1. Réparation des désordres superficiels	16
I.3.2. Traitement des fissures	16
I.3.2.1. Injection	17
I.3.2.2. Cachetage	17
I.3.2.3. Calfeutrement.....	17
I.3.2.4. Pontage.....	17
I.3.2.5. Protection généralise	17
I.3.3. Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles	18
I.3.4. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement ...	19
I.3.5. Béton projeté	19
I.3.5.1. Intérêt de la technique	20
I.3.5.2. Réalisation.....	20
I.3.6. Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites	21
I.4. Matériaux de réparation et de renfort.....	22
I.4.1. Mortiers de réparation.....	22
I.4.1.1. Mortiers de ragréage à base de liant hydraulique	22
I.4.1.2. Mortiers de ragréage à base de résines	23
I.4.2. Produits de protection anticorrosion des armatures	25

I.4.3. Produits de protection fluides pour le béton	25
I.4.3.1. Produits d'imprégnation hydrofuges.....	25
I.5. Les renforts	25
I.5.1. Fibre de verre	25
I.5.1.1. Fibre de carbone.....	26
I.5.1.2. Fibre d'aramide	27
I.5.2. Les matrices	28
I.6. Synthèse du chapitre	28

CHAPITRE II : IDENTIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE

II.1. Introduction	29
II.2. Matière première.....	29
II.2.1. Sable	29
II.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P94-056)	29
II.2.1.2. Caractéristique physique du sable	30
II.2.2. Ciment	30
II.2.3. Eau de gâchage	31
II.2.4. Fine de verre	32
II.2.5. Laine de verre	34
II.2.6. Le gel d'aloe-Véra	35
II.2.7. Adjuvant	37
II.2.8. Résine	37
II.3. Composition.....	38
II.3.1. Le mortier à base de fine de verre	38
II.3.1.1. Composition choisie	38
II.3.1.2. Malaxage	39
II.3.2. Mortier à base de fibre de verre	40

Table de matières

II.3.2.1. Composition choisie	40
II.3.2.2. Malaxage	40
II.3.2.3. Choix de pourcentage	42
II.4. Essais réalisés	43
II.4.1. Essai de traction par flexion (NF P 15-471)	43
II.4.2. Résistance à la compression (NF P 15-471)	44
II.4.3. Essai d'arrachement	45
II.4.4. Essai au scléromètre (NF P-18 417)	47
II.4.5. Essai d'auscultation dynamique (NF P-18 418)	48
II.5. Conclusion	50

CHAPITER III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction	51
III.2. Mortier à base de fines des verres	51
III.2.1. Résistance à la traction par flexion (NF P 15-471)	51
III.2.1.1. L'effet des fines sur la résistance à la traction par flexion	53
III.2.2. Résistance à la compression (NF P 15-471)	54
III.2.2.1. L'effet des fines sur la résistance à la compression	55
III.2.3. Essai d'arrachement	56
III.2.4. Scléromètre (NF P-18 417)	57
III.2.5. Auscultation sonique (NF P-18 418)	58
III.3. Mortier à base de fibres des verres	59
III.4. Analyse comparative	61
III.5. Synthèse du chapitre	63
Conclusion générale	64
Références bibliographiques	
Annexe	

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I. 1 : Principaux symptômes de la dégradation du béton.....	11
Tableau I. 2 : Classification générale des pathologies liées au bâtiment	12
Tableau I. 3 propriété des matériaux de réparation de béton	23
Tableau I. 4 : caractéristiques spécifiques des fibres.....	27

CHAPITRE II : IDENTIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE

Tableau II. 1 : Caractéristiques physiques du sable	30
Tableau II. 2 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	30
Tableau II. 3 : Fiche technique du ciment Matine.....	31
Tableau II. 4 : Caractéristiques physiques et chimiques des fines de verre	33
Tableau II. 5 : Teneur en eau et densité du gel	36
Tableau II. 6 : Composition chimique du gel.....	36
Tableau II. 7 : caractéristiques spécifiques de la résine.	37
Tableau II. 8 : compositions en grammes des mortiers préparés.	38
Tableau II. 9: Compositions préparées.....	40
Tableau II. 10 : Résistance à la traction et à la compression à l'âge de 7j.....	42
Tableau II. 11: Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions	49

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III. 1 : Résultats de résistance à la traction par flexion.	51
Tableau III. 2 : Résultats de résistance à la compression.....	54
Tableau III. 3: Résistance à la traction par flexion.	59
Tableau III. 4 : Résistance à la compression.	59
Tableau III. 5 : Récapitulé des résultats	63

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I. 1 : Les trois grandes cause de dégradation.....	3
Figure I. 2 : causes de dégradation.....	4
Figure I. 3 : Processus général de carbonatation.....	5
Figure I. 4: Dégradation du béton par la corrosion	6
Figure I. 5: Dégradation du béton par des sulfates.....	7
Figure I. 6: Attaques acides.....	8
Figure I. 7: Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis.....	8
Figure I. 8: Dégradation du béton par choc.....	9
Figure I. 9: Détachement d'un balcon (Napped'acier posé dans la partie comprimée).	10
Figure I. 10: Dégradation causé par incendie.....	10
Figure I. 11: Dommages causé par le gel-dégel	11
Figure I. 12 : Détermination la dureté à l'aide du scléromètre.	13
Figure I. 13: Lepachomètre.	14
Figure I. 14: le fissuromètre	14
Figure I. 15: Fibre de verre ; fibre carbone ; fibre d'aramide	27

CHAPITRE II : IDENTIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE

Figure II. 1 : Courbe granulométriques de sable.....	29
Figure II. 2: Fine de verre.....	32
Figure II. 3 : Courbe granulométrique de la fine de verre.....	33
Figure II. 4 : Laine de verre à l'état intact et comme un déchet.....	34
Figure II. 5: Préparation de gel d'aloë-vera	35
Figure II. 6: La laine de verre à l'état initiale.....	40
Figure II. 7 : Le malaxage automatique de laine de verre avec le sable.	41
Figure II. 8 : Les différents étapes pour élaborer le mortier de fibre de verre.	41
Figure II. 9 : Résistance à la flexion et à la compression à l'âge de 7j.	42
Figure II. 10 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.	43
Figure II. 11 : Dispositif de compression.....	44
Figure II. 12 : Presse utilisé pour l'essai de compression.	44
Figure II. 13: les éprouvettes utilisées pour l'essai d'arrachement.	45

Liste des figures

Figure II. 14: Des éprouvettes en attente de séchage	46
Figure II. 15: Eprouvettes et la presse utilisée.	47
Figure II. 16 : Courbe de transformation unique.....	48

CHAPITER III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III. 1: l'évolution de la résistance à la traction par flexion	52
Figure III. 2 : Eprouvette fléchée jusqu'à la rupture.....	53
Figure III. 3 : l'évolution de la résistance à la compression.	54
Figure III. 4: Eprouvette écrasé par compression	55
Figure III. 5 : contrainte d'arrachement	56
Figure III. 6: Résistance à la compression par scléromètre.....	57
Figure III. 7 : Résistance à la compression à l'âge de 28 jours.....	57
Figure III. 8: Vitesse de son	58
Figure III. 9 : L'évolution de la résistance à traction en fonction de temps.....	60
Figure III. 10 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction de temps.....	60
Figure III. 11 : L'évolution de la résistance à la flexion des différents composites.	61
Figure III. 12 : L'évolution de la résistance à la compression des différents composites.	62

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La structure d'un bâtiment peut subir divers désagréments et déformations. Des facteurs externes ou internes peuvent provoquer ces dégâts. Il est important de déterminer les causes avant de choisir les méthodes et principes de réparations.

Ils existent plusieurs types de mortiers et de produits de réparation, chacun a une destination particulière selon la nature de la dégradation. Le marché de la construction propose des mortiers de réparation aussi bien pour les surfaces (réparation structurale ou non structurale, collage et scellement) que pour la protection contre la corrosion des armatures

Pour chaque type de dégradation correspond une méthode de réparation. Par exemple :

- Une surcharge (tassement du béton) : on peut procéder au collage de plaque après projection du béton, ou remplacer le béton et les éléments abîmés par du mortier de réparation ;
- Pour des fissures (mauvaise vibration du béton) : on peut injecter du mortier pour colmater les fissures ;

L'utilisation des matériaux composites dans la réparation ou le renforcement des ouvrages en béton présente des avantages indéniables. Plusieurs méthodes de renforcement et réparation ont été développées.

Les mortiers de réparation apportent de nombreux avantages ; ils permettent de pousser toujours plus loin la durabilité des ouvrages en béton. Les solutions de réparation évoluent au fil des années pour assurer une parfaite compatibilité avec le béton et traiter durablement les dégradations liées au temps.

Par exemple, de nombreuses techniques et exploitations ont fait l'objet de recherche. En particulier, l'utilisation des déchets minéraux dans la technologie des bétons soit comme ajouts minéraux (par substitution partielle du ciment ou du sable), soit comme granulats fins ou granulats grossiers (par substitution des granulats traditionnels).

Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans les années soixante sur les déchets de verre comme ajouts dans le béton[1],[2].

L'utilisation de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment et du sable présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets [3], [4], [5], la poudre de verre est en général considérée comme étant pouzzolanique [6], [7] puisqu'elle contient des quantités relativement appréciables de silice.

Les efforts de recherche ont permis de mettre au point une technologie qui permet d'utiliser le verre broyé en poudre pour fabriquer des mortiers et béton plus résistant [8], [9] peu perméable et plus durable [10].

Ce travail vise à étudier la possibilité d'utiliser des déchets de verres (en fibres ou en fines) dans la composition d'un mortier de réparation. L'influence de la proportion de ces déchets utilisés sur les propriétés physique et mécanique du nouveau matériau a été étudiée et analysée.

Le pourcentage de déchet de verre substitué dans la masse de sable est choisi après une série d'essai, un optimum de 20% de la masse de sable pour les fines [3], et 4% pour les fibres issues de la laine de verre. Le gel d'aloë-vera a fait l'objet d'une tentative d'essais pour voir son effet résineux sur l'adhérence des fibres à la matrice [11].

Quant à l'organisation du mémoire il est subdivisé en quatre grands chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les pathologies des bétons, généralités sur l'évaluation et diagnostique, les techniques de réparation et les matériaux de réparation et de renfort.

Le deuxième chapitre constitue une description des techniques expérimentales utilisées et la caractérisation des matières premières.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et discussion des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique du mortier témoin sans ajout, du mortier avec ajout de fines de verre dans le sable alluvionnaire et aborde l'idée de substituer les déchets de fibres de la laine de verre récupérée des chantiers et d'analyser leur exploit par une étude comparative avec le mortier de réparation confectionné avec les fines de verre.

Enfin, et sur la base des résultats obtenus, le travail s'achèvera par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Ce chapitre est consacré aux différentes connaissances générales concernant les définitions et propriétés des matériaux qui font l'objet de cette recherche. Nous présentons tous les éléments bibliographiques recueillis des travaux de chercheurs qui sont utiles dans l'analyse du comportement des matériaux à élaborer dans cette recherche.

I.1. Différentes causes de dégradation

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats.

Les désordres qui affectent les structures en béton peuvent être classés en trois grandes catégories :

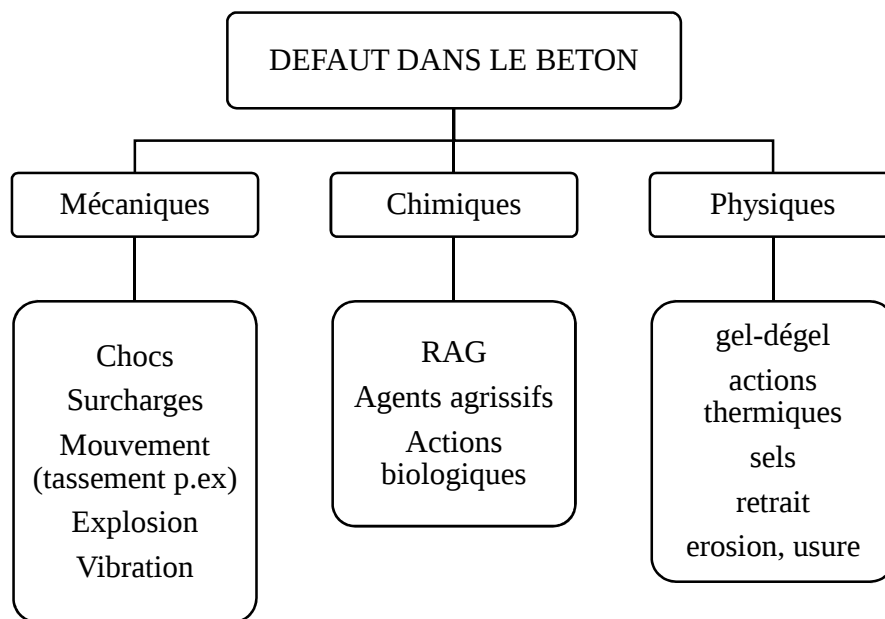


Figure I. 1 : Les trois grandes causes de dégradation

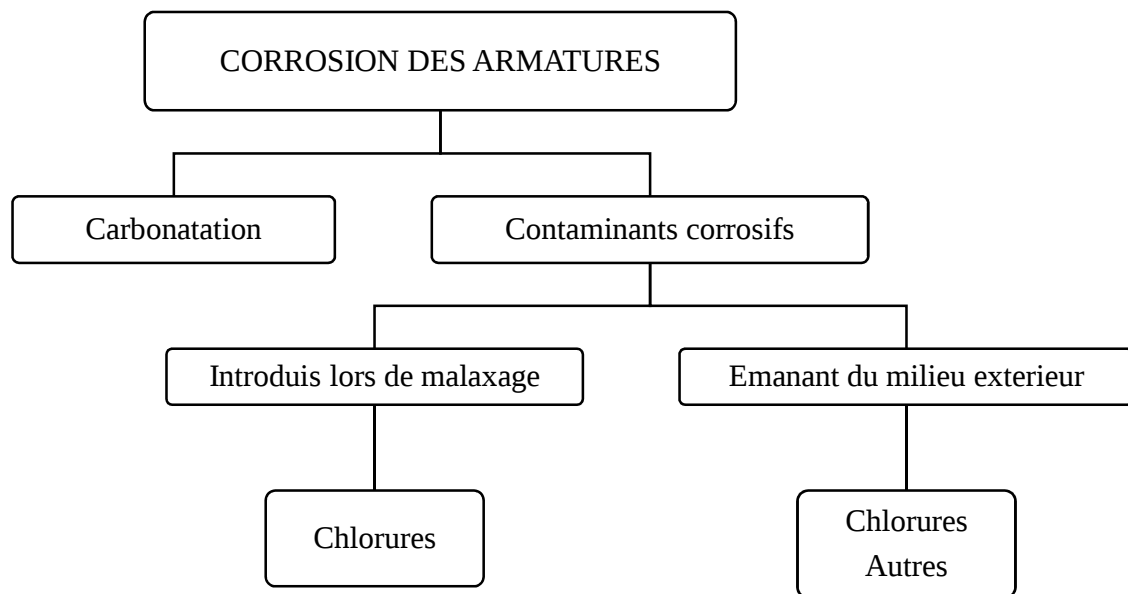
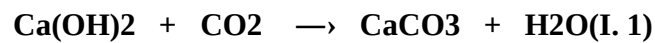


Figure I. 2 : causes de dégradation [12]

I.1.1. Les dégradations dues aux attaques chimiques

I.1.1.1. Carbonatation du béton

Lors de la prise du béton, il se produit une réaction chimique complexe qui se traduit notamment par la formation d'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 . Cette chaux libérée est présente dans toute la masse du béton. De ce fait, le pH initial du béton est de l'ordre de 12.5; dans le temps, le béton perd environ 50% de l'eau de gâchage qu'il contenait lors de la prise. Cette perte d'eau crée un réseau capillaire à l'intérieur du béton qui favorise la pénétration du dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air et alimenter une réaction chimique appelée : carbonatation



Cette réaction est irréversible précipite l'hydroxyde de calcium sous forme de sel insoluble. Le béton se carbonate et son PH diminue pour atteindre une valeur de 9.

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complété par enduit) [13].

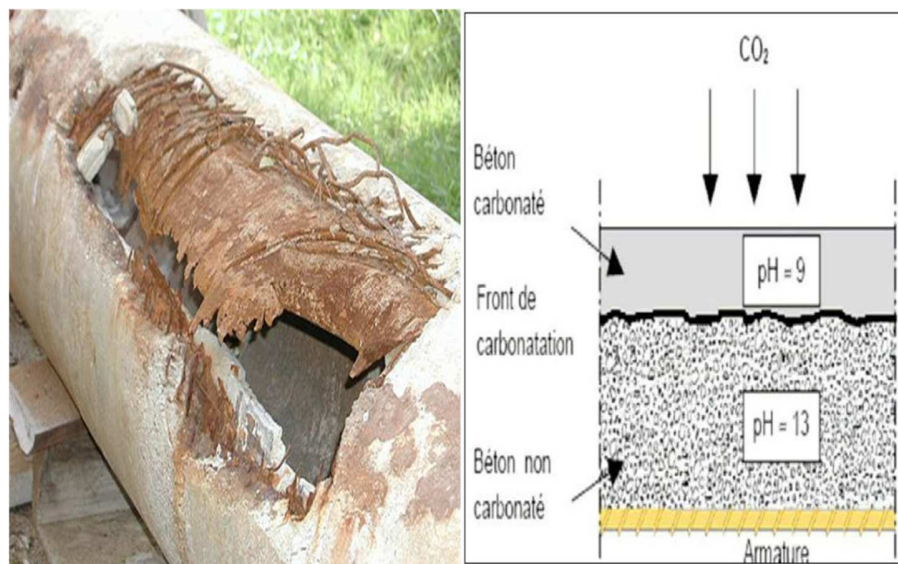


Figure I. 3 : Processus général de carbonatation

I.1.1.2. Corrosion des armatures

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton est issue d'un processus chimique. Pour que l'acier dans le béton se corrode (formation de rouille), il se trouve dans un milieu favorable :

- Un électrolyte avec une forte conductibilité (ionique).
- Une zone riche en oxygène.

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel...) [14].

Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- Ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couverte de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.
- Ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde).

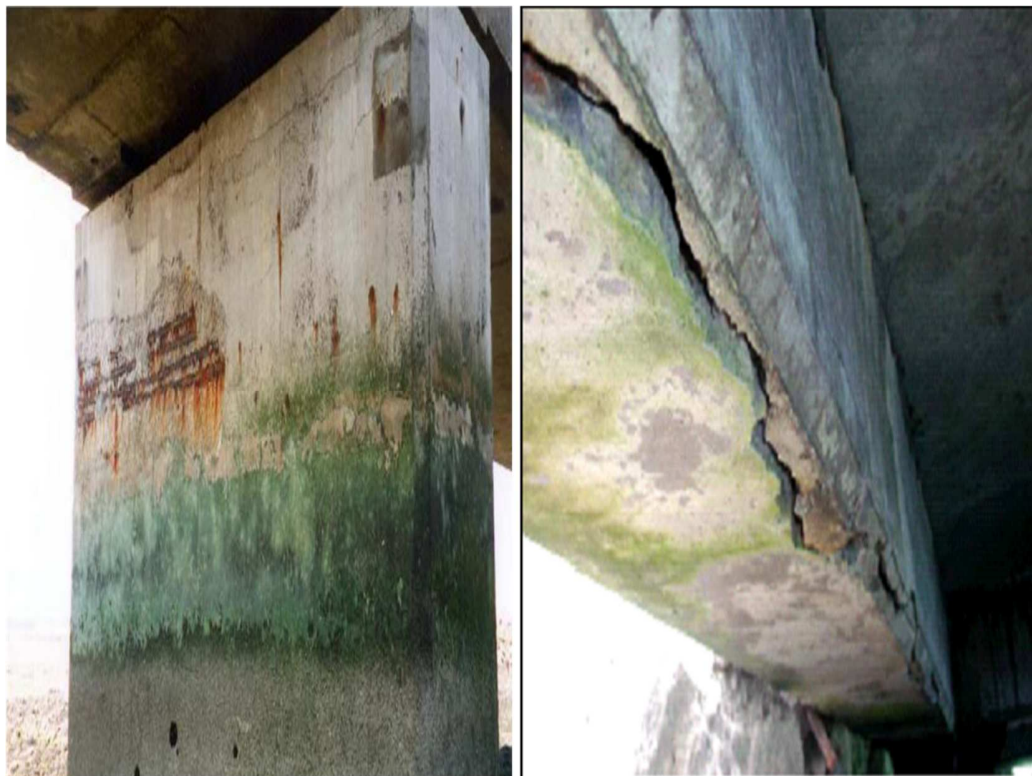


Figure I. 4: Dégradation du béton par la corrosion

I.1.1.3. Attaque par les sulfates

Les sulfates présentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton, ils peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle.

Les sulfates sont généralement retrouvés dans :

- Les eaux de mer.
- Les eaux souterraines.
- Lessols agressifs.
- Les milieux agricoles.
- Les eaux usées (domestiques et industrielles).
- Certaines industries.

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans).



Figure I. 5: Dégradation du béton par des sulfates

I.1.1.4. Attaque par des acides

Le béton résiste mal aux acides ou des composés qui peuvent se transformer en acide. Plusieurs acides organiques et inorganiques peuvent arriver dans l'eau de mer ou dans les eaux souterraines qui contiennent des composés de soufre ferreux comme une conséquence d'activité bactériologique.

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.



Figure I. 6: Attaques acides.

I.1.1.5. Alkali-réaction

L'alkali-réaction est une dégradation interne du béton. L'alkali-réaction est une réaction très lente allant d'un an jusqu'à dix ans (1 à 10 ans) [15].

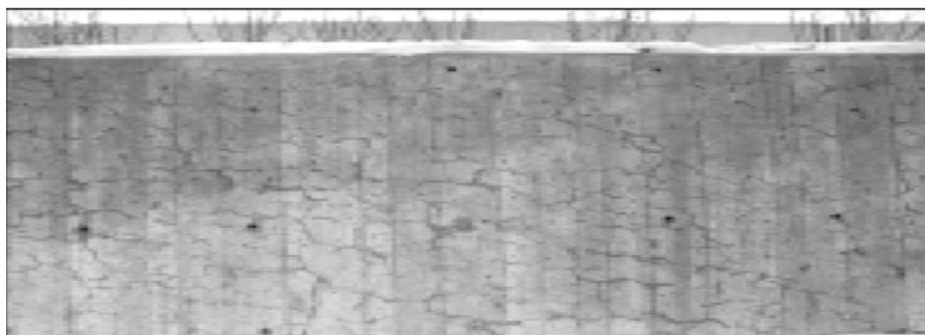


Figure I. 7: Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis.

I.1.2.Les dégradations d'origine mécanique

I.1.2.1.Les chocs

Le phénomène de choc peut provenir de :

- Les chocs des véhicules surponts.
- Les chocs de bateaux sur piles.
- La mauvaise manutention d'éléments préfabriqués.



Figure I. 8: Dégradation du béton par choc

I.1.2.2. Erreurs de conception et d'exploitation

Les différentes erreurs de conception peuvent être résumées comme suit :

- Untassement.
- Une poussée à vide dans les escaliers.
- Une surcharge que la structure ne peut subir.
- Un manque de joints.
- Un manque d'armatures.

I.1.2.3. Défauts d'exécution

Les défauts d'exécution sont dus généralement à :

- Une mauvaise position des armatures d'aciers.
- Une mauvaise mise en œuvre du béton.
- Un mauvais coffrage.
- Une mauvaise formulation du béton.
- Un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers [16].

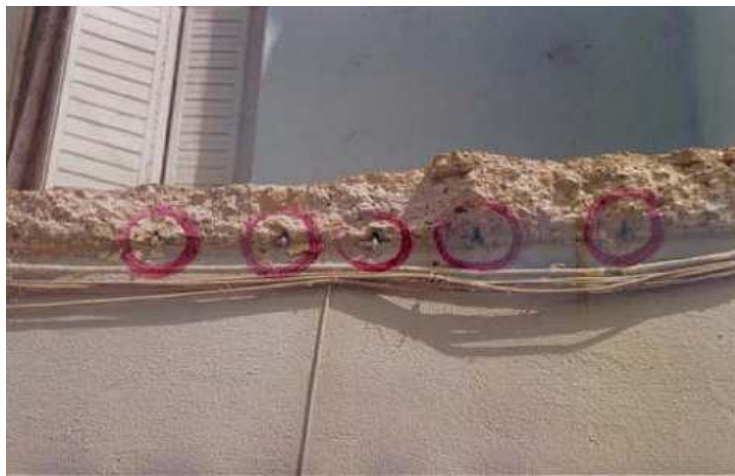


Figure I. 9: Détachement d'un balcon (Nappes d'acier posé dans la partie comprimée).

I.1.3. Les dégradations d'origine physique

I.1.3.1. Le feu

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.



Figure I. 10: Dégradation causée par incendie.

I.1.3.2.Cycle gel/ dégel

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.



Figure I. 11:Dommages causé par le gel-dégel

I.1.4.Symptômes de la dégradation du béton

Le tableau au-dessous regroupe les principaux symptômes de la dégradation du béton :

Tableau I. 1 : Principaux symptômes de la dégradation du béton.

	Fissures	Epaufure s	Ecail lag e	Désagrégat ion	En activité ou en évolutio n
Carbonatation					
Corrosion des armatures	X	X			OUI
Dégradation interne (alcali-réaction)	X				OUI
Attaque bactériologique	X			X	OUI
Attaque sulfatique externe)	X		X	X	OUI
Retrait, tassement	X				NON
Gel- dégel	X		X	X	OUI
Chocs	X	X			NON
Abrasion, érosion				X	OUI
Défaut d'exécution	X	X			NON
Incendie	X		X	X	NON

I.1.5. Conclusion sur causes de dégradation

Tableau I. 2 : Classification générale des pathologies liées au bâtiment

Le tableau résume les grandes causes de dégradations et les différents types.

Famille	Lésions	Types
Physique	Humidité	Capillaire/De filtrage/De condensation/Accidentelle/De travaux
	Saleté	Par dépôt / Par nettoyage différentiel
	Erosion	Météorologique
Mécanique	Déformations	Tassement/Effondrement/Flambement/Gauchissement/Flèche
	Fissures	Par charge / Par dilatation - contraction
	Fissures superficielles	Par support / Par finition
	Détachements	Finitions continues / Finitions par éléments
	Erosion	Coups / Frottements
Chimique	Efflorescence	Sels solubles cristallisés/Réaction chimique avec les sels
	Oxydation	Oxydation superficielle
	Corrosion	Oxydation préalable/Immersion/Aération différentielle/Paire galvanique
	Organismes	Présence et attaque d'animaux/Présence de plante
	Erosion	Pollution

I.2. Evaluation et diagnostique

Le choix de la procédure de réparation doit être fondé sur une étude préalable de l'état de la structure en béton. Cette étude comprend des opérations de préparation, une inspection de routine, des essais complémentaires, l'évaluation des résultats et l'estimation de l'état de l'ouvrage [17].

Le programme d'évaluation doit prendre en compte au minimum :

- L'état de la structure en béton existante, y compris les défauts invisibles et potentiels
- L'approche conceptuelle initiale
- L'environnement, y compris l'exposition antérieure à des polluants divers
- Les conditions qui ont présidé à la construction (conditions climatiques, par exemple)
- L'historique de la structure
- Les conditions d'utilisation (charges, ...)

I.2.1. Inspection de routine

L'inspection de routine comprend un examen visuel de la structure, complété par quelques essais de base qui peuvent être réalisés sur place. Dans la plupart des cas, l'inspection de routine suffit déjà à avancer un certain nombre de conclusions quant à l'état de l'ouvrage.

I.2.1.1. Inspection visuelle

Elle permet :

- D'identifier les conditions d'exposition qui ont pu engendrer des désordres
- De répertorier les anomalies observables visuellement, telles que décolorations, érosion, fissures, déformations, corrosion, etc.
- D'évaluer l'ampleur des zones dégradées
- De sélectionner les essais à réaliser en fonction des constatations
- De déterminer les zones qui feront l'objet de mesures complémentaires. Pour dresser un tableau complet de la situation, il est conseillé d'inclure dans le programme d'essai aussi bien des zones présentant des anomalies que des zones qui en sont dépourvues

I.2.2. Essais de base

I.2.2.1. Dureté de Surface

La dureté de surface du béton est déterminée à l'aide du scléromètre[18].

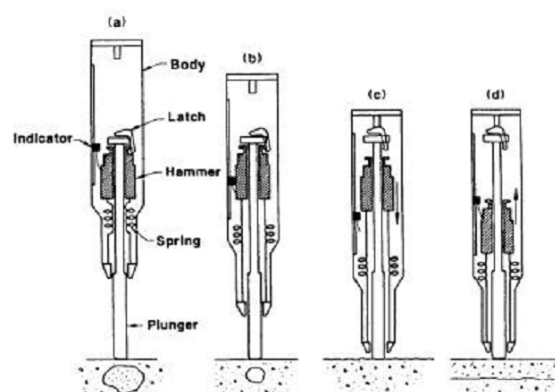


Figure I. 12 : Détermination la dureté à l'aide du scléromètre.

I.2.2.2.Localisation des armatures et détermination de leur enrobage

Le pachomètre (ou détecteur d'armatures) est utilisé pour localiser les armatures et évaluer leur enrobage.

Les mesures peuvent toutefois être faussées par une grande densité de ferrailage ou par la présence de plusieurs nappes d'armatures.



Figure I. 13:Le pachomètre.

I.2.2.3.Profondeur de carbonatation

Pour limiter au maximum les dégâts pendant l'inspection, on peut se contenter de forer de petits trous de 6 à 8 mm de diamètre et mettre la poudre de forage en contact avec la solution de phénolphthaléine.

Dès qu'on observe un changement de couleur, on cesse de forer et on mesure la profondeur du forage [19].

I.2.2.4.Mesure des largeurs de fissuration

La largeur des fissures présentes dans le béton est mesurée au moyen d'un fissuromètre.



Figure I. 14: le fissuromètre

I.2.3.Essais complémentaires

I.2.3.1.Examen par ultrasons

On peut se faire une idée de l'homogénéité et de la qualité du béton en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau.

La méthode sert également à détecter la présence de nids de gravier, de fissures.

I.2.3.2.Détermination de la résistance en compression

Les essais de compression s'effectuent sur des carottes de forage prélevées

Les éprouvettes sont progressivement mises en charge jusqu'à rupture, avec une force de 0,2 à 1 N/mm² par seconde.

La force maximale est notée afin d'être utilisée pour le calcul de la résistance du béton à la compression. L'évaluation correcte de cette caractéristique nécessite un nombre d'essais relativement important.

I.2.3.3.Évaluation de la structure

Une fois en possession des résultats d'essai, on procède à l'évaluation de la structure point par point, à savoir :

- État global de l'ouvrage
- Vieillessement du béton
- Capacité portante des éléments
- Durée d'utilisation de la structure

I.3.Généralité sur les techniques de réparation

I.3.1.Réparation des désordres superficiels

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- Une préparation de sur face avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution ;
- Le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion ;
- La reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton ;
- La mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :

1. Produits et systèmes à base de liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères
2. Produits et systèmes à base de résines synthétiques ;
3. Produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques

Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement [20].

I.3.2.Traitement des fissures

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration : ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression...de l'état et du type de support et du délai imposé pour la remise en service de l'ouvrage[21].

I.3.2.1.Injection

Elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est au moins comprise entre 0.1 et 0.2 mm.

L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques.

L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

I.3.2.2.Cachetage

Il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

I.3.2.3.Calfeutrement

Il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple (mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou d'empêcher la pénétration de matières solides, mais sans bloquer les mouvements de la fissure.

I.3.2.4.Pontage

Il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée...) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou empêcher la pénétration de matières solides en laissant libres les mouvements de la fissure.

I.3.2.5.Protection généralise

Ce traitement consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support.

Le choix des produits à utiliser est fonction de l'ouverture des fissures, de la présence éventuelle d'eau et de l'activité des fissures.

- Produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques
- Mastics à base de liants de synthèse : silicone, polyuréthane...
- Coulis à base de silicate, de polyuréthane...

- Résines époxydes, résines polyuréthanes...
- Gels de silice, gels en solution aqueuse...

Les techniques de traitement de fissures comportent une étape primordiale qui est la préparation et le nettoyage du support et des fissures :

Brossage, décapage thermique, aspiration, lavage à l'eau sous pression, à l'air comprimé... afin d'éliminer toute trace de laitance, de poussières, de mousses qui pourrait perturber l'efficacité de l'injection.

I.3.3. Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles

Les techniques de réparation et de renforcement de structures par des armatures passives additionnelles concernent la mise en œuvre :

- D'armatures de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier au carbone ou en inox) ou en matériaux composites au sein de l'ouvrage après enlèvement local du béton par réalisation d'une saignée qui est ensuite rebouchée ;
- D'armatures de béton armé en métal ou en matériaux composites en surface du béton autour de la partie d'ouvrage existante et liées à celle-ci puis enrobées par un ajout de béton coulé, projeté ou contrecollé ;
- De plaques (bandes, lamelles) ou de tissus en matériaux composites collés à la surface du béton ;
- De tôles et plats collés de faibles épaisseurs (3 à 5 mm) découpées en bande de faible largeur (300 à 500 mm) et collées sur le béton par une résine époxydique (technique quasiment plus utilisée).

La réparation d'armatures passives intérieures au béton consiste à enlever le béton endommagé ou pollué et à dégager les armatures longitudinales ou transversales corrodées. Après préparation du support (nettoyage, aspiration soufflage, repiquage du béton, élimination des poussières et morceaux de béton et ragréage éventuel) et des armatures (décapage complet des armatures corrodées, par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous pression, le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le

recouvrement des barres), les nouvelles armatures sont mises en place en respectant les dispositions constructives habituelles. Le raccordement des armatures est assuré par recouvrement, par soudure ou raboutage.

Les caractéristiques du mortier ou du béton de ré enrobage des armatures remplacées doivent être compatibles avec celles du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage.

Le mortier ou le béton mis en place permet de reconstituer la géométrie initiale de la partie d'ouvrage concernée et enrober les nouvelles armatures. Il est mis en œuvre manuellement ou mécaniquement dans des coffrages ou projetés, selon le volume et la géométrie de la cavité à combler. Après durcissement du mortier ou du béton, la mise en place d'un produit ou d'un système de protection est souvent nécessaire pour améliorer la durabilité de la réparation[22].

I.3.4. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement

La protection des bétons vis-à-vis des agressions ou des attaques extérieures par application de produits à la surface du parement permet :

- Soit de prolonger la durée d'utilisation d'ouvrages anciens pour lesquels les désordres par corrosion sont apparents mais qui ne présentent pas de dégradation structurelle.
- Soit de protéger de manière préventive des parties d'ouvrages neufs particulièrement exposées aux agents agressifs ou aux intempéries.

La protection permet de ralentir le vieillissement du béton ou d'arrêter l'évolution de la dégradation, empêchant la pénétration des agents agressifs sous forme liquide ou gazeuse [23].

I.3.5. Béton projeté

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé. La technique consiste à [24]:

- Malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage
- Transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe

- Projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé. Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie mouillée. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton).

I.3.5.1. Intérêt de la technique

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...).

Le choix de la technique de projection est fonction :

- De l'importance du chantier. La technique par voie sèche qui offre une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents.
- De la nature des travaux à effectuer.
- Des cadences de réalisation souhaitées : la technique par voie humide permet des capacités de production élevées.
- Des performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.

I.3.5.2. Réalisation

Les opérations de bétonnage comprennent la succession des étapes suivantes :

- Préparation du support.
- Projection du béton par passes successives.
- Mise en œuvre d'une couche de finition éventuelle et protection par cure.

I.3.6.Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites

Les techniques de renforcement des structures au moyen de matériaux composites utilisent le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe in situ de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...)[25].

Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés.

Elle permet :

- D'augmenter la résistance de structures dégradées, endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'exécution afin de prolonger leur durée d'utilisation.
- D'adapter la structure à des modifications de ses conditions d'exploitation ou d'accroître sa capacité portante.

Ces techniques permettent :

- L'accroissement de la résistance à l'effort tranchant ou vis-à-vis de la flexion de poutres.
- Le renforcement de structures en cas de modification des charges d'exploitation, de changement de système statique, d'insuffisance d'armatures ou de capacité portante ou de défaut d'exécution.
- L'augmentation de la résistance et de la rigidité de structures en béton.

La mise en œuvre de la technique nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect de conditions climatiques adaptées (travaux à l'abri de la pluie, pas d'ensoleillement direct, température extérieure comprise entre 10 et 25° C, humidité relative limitée...), des conditions d'emploi des différents matériaux (durée d'utilisation des résines ...), des critères de sécurité et de grandes précautions lors de la préparation des supports.

I.4. Matériaux de réparation et de renfort

I.4.1. Mortiers de réparation

Les mortiers de ragréage sont classés en fonction de la nature du liant (hydraulique ou résineux)

I.4.1.1. Mortiers de ragréage à base de liant hydraulique

Les propriétés des mortiers hydrauliques peuvent être améliorées au moyen de polymères ou d'adjuvants et de fibres. L'ajout de polymères offre divers avantages : compensation du retrait, meilleure résistance en traction, adhérence accrue, moins grande perméabilité à l'humidité et au dioxyde de carbone (CO₂), amélioration de la résistance au gel et meilleure résistance chimique [26]

Les polymères accroissent toutefois la dilatation thermique, ce qui augmente les contraintes.

Les mortiers de ragréage à liant hydraulique protègent les armatures en rétablissant l'alcalinité du béton d'enrobage.

Les mortiers hydrauliques modifiés à l'aide de polymères (5 à 20 % de polymères par rapport à la masse de ciment) sont désignés sous l'appellation PCC (Polymère Cement Concrete/Mortar, bétons ou mortiers de ciment aux polymères), les autres mortiers (< 5 % de polymères par rapport à la masse de ciment) sous l'appellation CC (Cement Concrete/Mortar, bétons ou mortiers de ciment).

L'application doit impérativement se faire sur un support humidifié. La projection du mortier s'avère souvent la technique la mieux adaptée pour la réparation de grandes surfaces. En présence de grands volumes, le coulage constitue une bonne alternative.

Dans le cas de petites réparations, le mortier est appliqué localement à la main.

Etant donné le retrait inévitable des mortiers hydrauliques, les précautions nécessaires (cure adéquate, ...) devront être prises pour prévenir une fissuration inacceptable, surtout si les surfaces à traiter sont étendues.

I.4.1.2. Mortiers de ragréage à base de résines

Ces mortiers se composent d'une résine synthétique (liant principal), d'une matière de charge et d'un ou de plusieurs agents favorisant la polymérisation ou le durcissement (catalyseur, durcisseur)[27].

Appliqués tout le long des armatures, les mortiers résineux font barrage à l'eau et à l'oxygène et protègent ainsi les armatures contre la corrosion. La surface de ces dernières doit cependant être sèche et requiert l'application d'une couche d'adhérence.

Ces mortiers sont désignés sous l'appellation PC (Polymère Concrete Mortar, mortiers polymères). Les résines les plus courantes sont les époxydes à base d'amines jouant le rôle de durcisseur, bien qu'on utilise également des polyuréthanes ou des acrylates. Certaines formulations contiennent en outre des additifs et des pigments.

Comparés aux mortiers hydrauliques, les mortiers résineux possèdent une grande résistance mécanique en compression et en traction, propriété qu'ils acquièrent d'ailleurs très rapidement. Par contre, ils se caractérisent par un coefficient de dilatation thermique plus élevé, un module d'élasticité plus faible et un retrait plus important au durcissement. Ils n'offrent par ailleurs qu'une faible résistance au feu.

Le tableau suivant représente les propriétés des matériaux de réparation.

Tableau I. 3 propriété des matériaux de réparation de béton

Types 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 $^{\circ}\text{C}(10^{-6})$	25-30	10-20	10
Température max de service $^{\circ}\text{C}$	40-80	100-300	≥ 300

I.4.1. 2 Mortier de surfacage

Mortier de réparation dont l'objet principal est de rétablir la continuité de surface du béton, ces discontinuités pouvant provenir de défauts de surface du béton (pores, retassures, ...), soit de sollicitations physiques ou chimiques résultant en la mise à nu des granulats du béton.

Il peut aussi s'appliquer sur des surfaces réparées au mortier de ragréage. L'épaisseur d'une couche de surfacage peut varier de 2 mm à 8 mm, avec une moyenne de l'ordre de 5 mm.

I.4.1. 1 Enduit de protection

Constituant d'un système de réparation dont l'objet est de protéger la surface du béton contre les sollicitations physico-chimiques provenant de l'environnement.

Il peut aussi s'appliquer sur des surfaces réparées au mortier de ragréage ou de surfacage. L'épaisseur moyenne d'une couche de protection est de l'ordre de 2 mm.

Les enduits de protection font partie des revêtements minéraux.

I.4.2. Produits de protection anticorrosion des armatures

Une fois les armatures décapées, il est nécessaire, dans certains cas, d'appliquer un revêtement de protection anticorrosion. Celui-ci peut être composé [28]

- Soit d'un liant hydraulique modifié, principalement dans le cas de réparations au mortier hydraulique
- Soit encore de zinc.

La protection anticorrosion est appliquée en deux couches et ne peut affecter l'adhérence du béton ou du mortier de ragréage.

I.4.3. Produits de protection fluides pour le béton

I.4.3.1. Produits d'imprégnation hydrofuges

L'imprégnation hydrofuge agit en tapissant les pores et capillaires, sans toutefois les combler entièrement [29].

Les produits utilisés silanes ou siloxanes, par exemple se présentent sous forme de gel, ce qui permet d'éviter un séchage trop rapide et de favoriser la pénétration. Ils n'ont pas d'action filmogène à la surface du béton et ne modifient pas sensiblement son aspect extérieur.

L'efficacité des produits d'imprégnation hydro, pratiquement nulle sur les surfaces horizontales, est optimale sur une surface verticale en raison de leur effet tensioactif.

I.5. Les renforts

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures Multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

I.5.1. Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion.

Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux

, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

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

I.5.1.1.Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000-1500 °C

Fibres haut module (HM): pour une température de combustion de 1800-2000 °C

En effet, les fibres de carbone se brisent aisément si elles sont comprimées dans le sens de leur longueur, alors que, à masse égale, elles sont cinq fois plus raides et dix fois plus résistantes à la traction que l'acier.

I.5.1.2.Fibre d'aramide

Souvent appelée Kevlar, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes

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

Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède d'exceptionnelles qualités de résistance à la Traction et à l'allongement. Seule la toile d'araignée propose de meilleures caractéristiques (3 fois plus résistante)

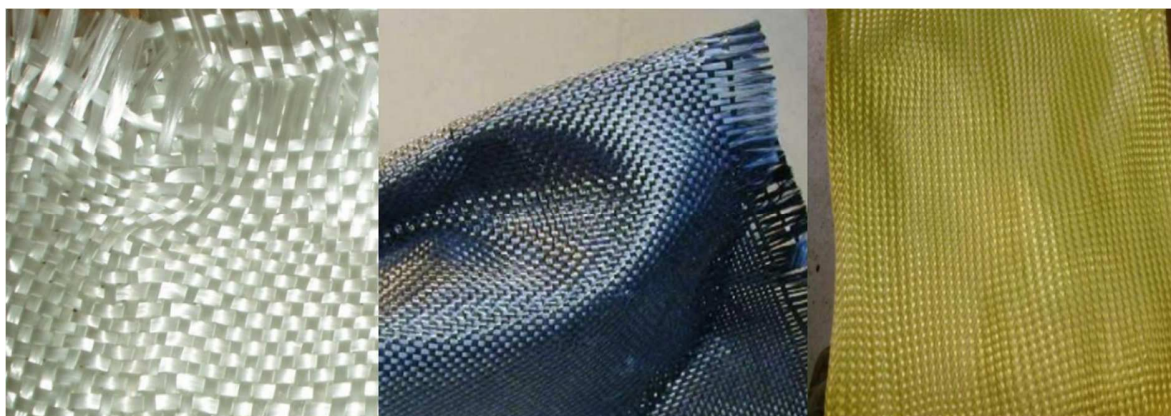


Figure I. 15: Fibre de verre ; fibre carbone ; fibre d'aramide

Le **tableau I.3** regroupe les caractéristiques spécifiques des fibres, tel que diamètre du filament, masse volumique, module d'élasticité, module de cisaillement. Coefficient de poisson, contrainte de rupture par traction, allongement à rupture [30].

Tableau I. 4 : caractéristiques spécifiques des fibres.

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à rupture %
Verre E	16	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5
Verre R	10	2500	86000	-	0.2	3200	4
Carbone HM	6.5	1800	390000	20000	0.35	2500	0.6
Carbone HR	7	1750	230000	50000	0.3	3200	1.3
Kevlar 49	12	1450	130000	12000	0.4	2900	2.3
Bore	100	2600	400000	-	-	3400	0.8
Silicate d'alumine	10	2600	200000	-	-	3000	1.5
polyéthylène	-	960	100000	-	-	3000	-

I.5.2. Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporté la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible. Parmi les résines thermoplastiques, on trouve les Polyesters insaturés, Vinylester, Phénoliques, Epoxydes, Polyuréthanes et polyurées, Polyimide et les Bismaléimides [31].
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

I.6. Synthèse du chapitre

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique, une synthèse sur les dégradations du béton et plusieurs origines des dégradations, et la méthodologie du diagnostic.

On a vu les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé, mais n'importe quelle méthode est utilisée, le but est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de satisfaire cette condition par l'ajout d'un autre matériau.

CHAPITRE II

IDENTIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE

II.1.Introduction

Pour l'élaboration du mortier de réparation envisagé comme solution pour les traitements des fissures et bétons dégradés, nous sommes obligés passer par les essais de caractérisation de la matière première selon les normes exigées au laboratoire.

II.2.Matière première

II.2.1.Sable

Le sable utilisé dans notre recherche expérimentale est le sable alluvionnaire provenant de la wilaya de Laghouat (oued M'zi).

Ci-dessous les essais de caractérisation de ce sable.

II.2.1.1.Analyse granulométrique (NF P94-056)

Les résultats ont permis de tracer la courbe granulométrique de ce sable illustré dans la figure II.1 ci-dessous.

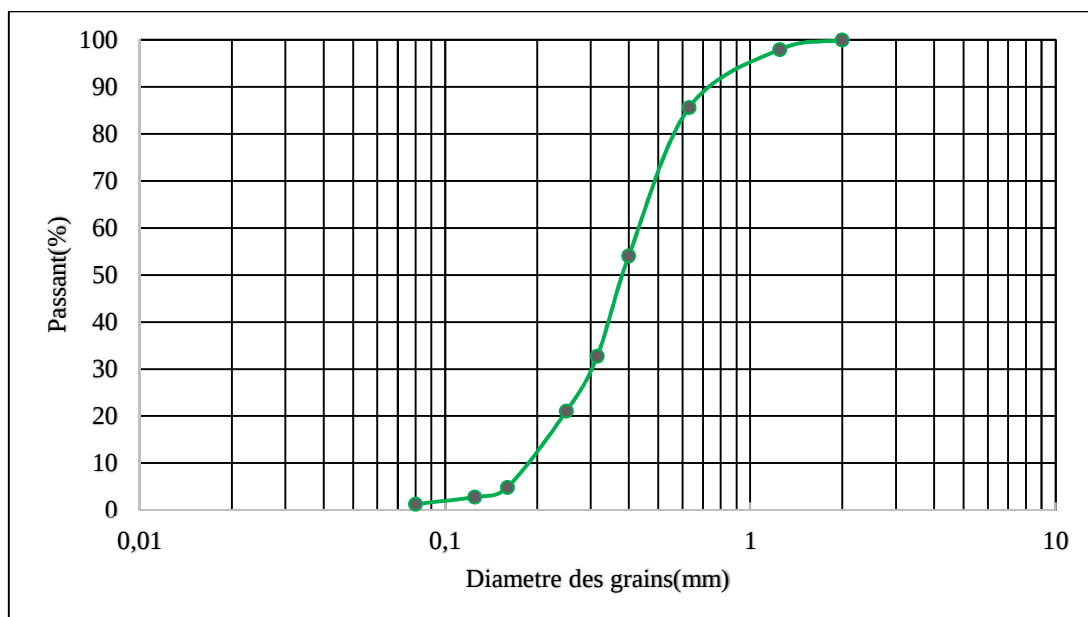


Figure II. 1 : Courbe granulométriques de sable

II.2.1.2.Caractéristique physique du sable

Les caractéristiques physiques tels que la masse volumique absolue, la masse volumique apparente, l'équivalent de sable visuel, l'équivalent de sable au piston et le module de finesse sont représentés dans le **tableau II.1**

Tableau II. 1 : Caractéristiques physiques du sable

Masse volumique absolue	$\rho_{abs}=2.47 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Masse volumique apparente	$\rho_{app}=1.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Module de finesse	1.68
Equivalent de sable	Esv=94.2% Esp=79.9%

II.2.2.Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /B 42.5N selon la norme algérienne NA 442, (MATINE) confectionné et mis en sacs de 50 kg à M'sila . Les principales caractéristiques physiques de ce ciment sont résumées dans le tableau II.2 [3].

Tableau II. 2 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Masse volumique absolue	$\rho_{abs} = 3100 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente	$\rho_{app}=1030.05 \text{ kg/m}^3$
Consistance normale	E/C=0.25-0.28
Début de prise	DP=150-170 min
Fin de prise	FP=03 :30 – 04 : 30(h : min)
Surface spécifique Blaine	SSB3700 g/cm ²

Les caractéristiques chimiques de ce ciment sont résumées dans le **tableaux II.3**

Tableau II. 3 : Fiche technique du ciment Matine [32]

Teneur en SiO_2 %	17.49
Teneur en CaO %	62.78
Teneur en Al_2O_3 %	04.51
Teneur en Fe_2O_3 %	03.02
Teneur en K_2O %	00.64
Teneur en Na_2O %	00.05
Teneur en sulfate $\text{SO}_3\%$	02.5 ± 0.5
Teneur en $\text{MgO}\%$	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures %	0.02-0.05
Perte de feu %	10.00 ± 2

II.2.3.Eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

II.2.4.Fine de verre

Les Fines employés dans la composition du mortier dérivent des déchets de verre récupérés de chez les vitriers ou des chantiers.

Les fines utilisées dans notre travail sont obtenues par broyage des déchets de verre à l'appareil Los Angeles équipée de 11 boules métalliques à raison de 9990 tours.

Cette opération est suivie d'un tamisage manuel à sec à l'aide d'un tamis de diamètre de maille égal à 100 μ m.



Figure II. 2: Fine de verre

La courbe granulométrique de fines de verre est identifiée dans la **figure II.3**. L'analyse granulométrique montre 50% des fines de verres ont un diamètre inférieur à 20 μ m ($D_{50} < 20\mu\text{m}$). Les caractéristiques physiques et la composition chimique de fine de verre sont données dans le **tableau II.4**.

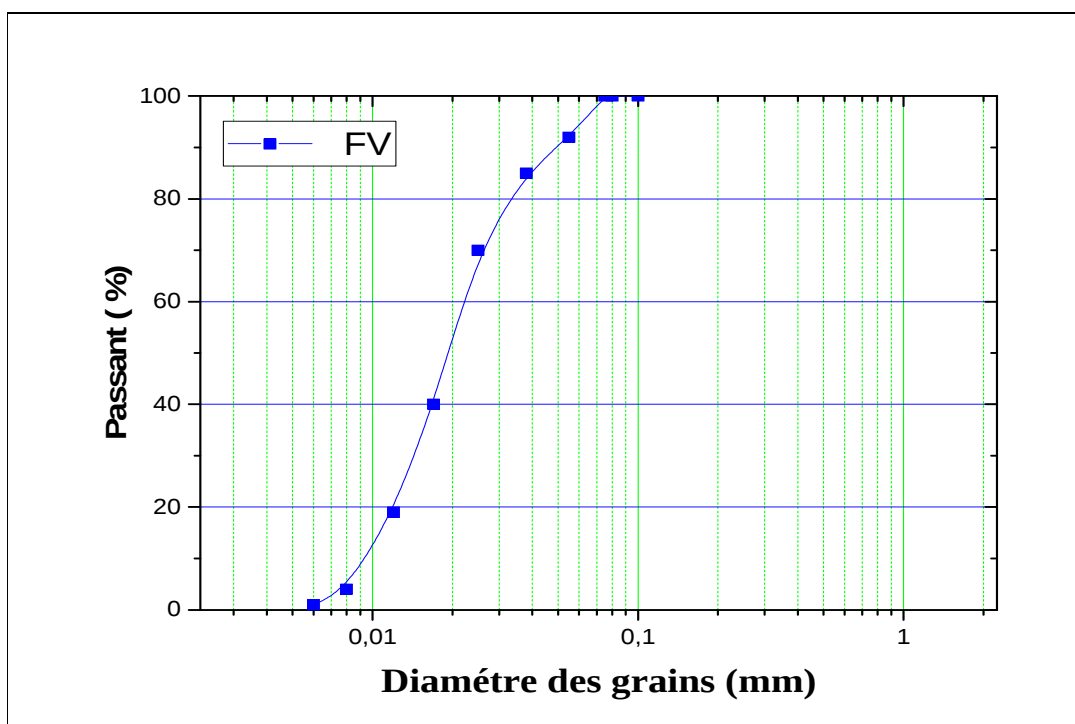


Figure II. 3 : Courbe granulométrique de la fine de verre

Tableau II. 4 : Caractéristiques physiques et chimiques des fines de verre(Z.Damene,2017)[3].

Caractéristiques physiques	
Masse volumique absolue	2365 kg/m ³
Masse volumique apparente	899.6 kg/m ³
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3200 cm ² /g
Composition chimique	
SiO ₂ (%)	72.5
Al ₂ O ₃ (%)	0.15
SO ₃ (%)	0.41
CaO(%)	9.18
Fe ₂ O ₃ (%)	0.2

II.2.5.Laine de verre

La laine de verre est un isolant fabriqué à partir du sable qui se présente sous la forme d'un matelas de fibres enchevêtrées emprisonnant de l'air immobile. Utilisé en isolation thermique, en isolation phonique, en correcteur acoustique ou dans la protection incendies.

Les fibres de verre à usage spécial sont essentiellement des fibres dont le diamètre est inférieur à $3\text{ }\mu\text{m}$ pouvant aller jusqu'à $0,01\text{ }\mu\text{m}$. Elles ne sont pas solubles dans l'eau. Ces fibres se fragmentent transversalement. Leur masse volumique est entre $2,4$ à $2,6\text{ g/cm}^3$ [41].



Figure II. 4 : Laine de verre à l'état intact et comme un déchet.

II.2.6. Le gel d'aloë-Véra

Le gel d'aloë-vera est constitué par le mucilage des cellules polyédriques de la région centrale de la feuille.

La récolte du gel d'aloë-vera se fait en coupant longitudinalement les feuilles et en raclant la pulpe centrale mucineuse. Par un bras mixeur on mixe le gel avec l'eau pour l'utiliser ultérieurement dans la confection de mortier.



Figure II. 5: Préparation de gel d'aloë-vera

Le gel contenu dans cette plante est une substance gélatineuse transparente visqueuse et flexible et elle peut se diluer dans l'eau facilement les caractéristiques de ce gel sont ceux donnés par la référence (**Emanuel Morin 2008**)[33].

Tableau II. 5 : Teneur en eau et densité du gel (**L. Chaoui2017**)[11].

$\rho_{app} \text{ kg/m}^3$	Teneur en eau
1.00	98.5%

On remarque d'après ce **tableau II. 5** que le constituant principal du gel est l'eau.

Tableau II. 6 : Composition chimique du gel (**L. Chaoui2017**)[11].

Composants		Pourcentage% / valeurs mg.L^{-1}
Les polysaccharides%		60%
Fraction protéique		9.6 mg.g^{-1}
Fraction lipidique %		$2\% \div 5\%$
Minéraux	Ca (mg.L^{-1})	313
	Mg (mg.L^{-1})	76
	Na (mg.L^{-1})	80
	K (mg.L^{-1})	379
	P (mg.L^{-1})	18
Vitamines	B1 (mg.L^{-1})	$18 \div 21$
	B2 (mg.L^{-1})	$18 \div 21$
	C (mg.L^{-1})	$140 \div 180$
	B3 (mg.L^{-1})	$90 \div 110$
	B6 (mg.L^{-1})	$9 \div 11$
Enzymes	Amylase (UI.L^{-1})	$11000 \div 16000$
	lipase (UI.L^{-1})	6000000

II.2.7.Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant « MEDAFLOW 30 » fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar Alger. Le super plastifiant Medaflow 30 est une solution hydrosoluble de couleur jaunâtre, de PH égal à 6.5 et de densité de 1.07. Spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage. Il est incorporé préalablement à l'eau de gâchage en ce qui concerne le dosage nous avons respecté la fiche technique de GRANITEX, qui donne une plage entre 0.5 et 2% du poids du ciment [42].

II.2.8.Résine

La résine utilisée pour l'essai d'arrachement est **Sikadur®-31 CF** fournie par **Sika El Djazair**.

Sikadur®-31 CF est une colle structurale thixotrope à 2 composants, sans solvant et un mortier de réparation à base de résine époxydique et de charges spécialement sélectionnées.

Ces caractéristiques physiques et mécaniques extraient de la fiche technique du produit[34].

Tableau II. 7 : caractéristiques spécifiques de la résine.

Densité	1.65 kg/l
Module d'élasticité	4300 N/mm ²
Résistance à la compression après 24 h	
+20°C	~60-70 N/mm ²
+30°C	~40-45 N/mm ²
+50°C	~30-45 N/mm ²
Résistance à la flexion	30-40 N/mm ²
Résistance à la traction	15-20 N/mm ²
Adhérence au béton	3.5 N/mm ²
Adhérence à l'acier	~15 N/mm ²

II.3.Composition

II.3.1.Le mortier à base de fine de verre

II.3.1.1.Composition choisie

La composition du mortier est définie par la norme EN 196-1

Suite à des études antérieures (**Damene.Z, 2005**)[35] concernant le choix de la composition d'un mortier à base de sable alluvionnaire selon le rapport C/S, nous avons opté à l'élaboration du mortier de sable avec le rapport C/S= 1/3. La confection de ces mortiers consistait à faire varier un pourcentage de substitution de déchets de verre (laine ou fine) dans le sable et d'optimiser la quantité d'eau nécessaire pour un mortier plastique facile à mettre en moule. Pour cela on a fait varier le rapport E/C de 0.45 à 0.6 par pas de 0.05.

Le pourcentage de fine de verre substitués dans la masse de sable est choisi après une série d'essai, un optimum de 20% de la masse de sable (**Damene.Z, 2017**)[3] , et pour le gel d'aloe-vera nous fixions le pourcentage à 5% de la masse de ciment pour obtenir un mortier de sable avec des fine nommé MFi , et un mortier de référence nommé MTSA.

Le **Tableau II.8** résume les compositions en grammes des différents constituants des mortiers préparés.

Tableau II. 8 : compositions en grammes des mortiers préparés.

	MTSA	MFi
C/S	1/3	1/3
E/C	0,6	0,6
Fine de verre	0%	20%
Gel d'aloe-vera	0%	5%

II.3.1.2.Malaxage

Nous avons adoptées pour les bétons de sable un malaxage normalisé selon la norme européenne EN 196-1 et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage le mélange soit le plus homogène possible.

On prépare l'eau à laquelle on a ajouté le gel d'aloë-vera avec le pourcentage mentionné auparavant.

Le mélange sable, fines et ciment est malaxée à sec pendant deux minutes à vitesse lente à l'aide d'un malaxeur à mortier normalisé.

L'eau (et le gel) est graduellement versée dans le mélange, sans interrompre le malaxage. La durée de malaxage en phase humide est fixée à quatre minutes : deux minutes de malaxage à vitesse lente, puis un arrêt pour racler les parois et surtout le fond de la cuvette pour homogénéiser le mélange. On reprend ensuite le malaxage pendant deux minutes à vitesse rapide.

A la fin du malaxage, le mortier préparé est versé dans un moule prismatique à 3 alvéoles de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) le serrage de mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 coups à chaque fois.

Le démoulage a lieu 24h après le coulage, par la suite les éprouvettes sont mises directement à la chambre de conservation conditionnés de température de $23 \pm 5^\circ \text{C}$ et une humidité relative de $90 \pm 5\%$.

II.3.2.Mortier à base de fibre de verre

II.3.2.1.Composition choisie

Les pourcentages de déchets laine de verre substitués dans la masse de sable pour obtenir un composite nommé MFA (Mortier de Fibre Adjuvanté) et MFG (Mortier Fibre Gel d'aloevera) sont : (1%, 2.5%, 3%, 3.5% et 4%).

Tableau II. 9: Compositions préparées.

	Témoin	1% de fibre	2,5%	3%	3,5%	4%
C/S	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
E/C	0,55	0,55	0,55	0,55	0,6	0,6
Fibre (g)	0	12	30	36	42	48
Superplastifiant (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Gel d'Aloeverra (%)	-	-	-	-	-	5

II.3.2.2.Malaxage

La phase la plus importante et la plus assommante est le mixage des fibres dans le sable, qui passe par les étapes suivantes :

- ❖ L'extraction des fibres à partir les rouleaux d'isolation



Figure II. 6: La laine de verre à l'état initiale.

Nous indiquons que nous avons essayé le malaxage par le malaxeur de laboratoire, mais ça n'a pas marché vu la grande dispersion des fibres. Les pertes en masse des fibres pendant le malaxage sont arrivées jusqu'à 24%, et on n'a pas l'homogénéité demandée.



Figure II. 7 : Le malaxage automatique de laine de verre avec le sable.

- Alors on a opté pour le malaxage manuel des ingrédients secs,
- Frotter manuellement les fibres seuls, après on les introduit dans le sable et on continue à mélanger jusqu'à nous obtenons un mélange homogène.
- Puis on ajoute graduellement la quantité d'eau nécessaire, au quelle a été ajoutée l'adjuvant superplastifiant ou le gel d'aloé-vera.



Figure II. 8 : Les différents étapes pour élaborer le mortier de fibre de verre.

II.3.2.3.Choix de pourcentage

Plusieurs pourcentages de fibres ont été testés. Le pourcentage des fibres choisis pour le mortier de réparation à préparer est celui qui a donné après écrasement d'éprouvettes au 7^e jour, les meilleurs résultats.

On a opté un pourcentage de 4% de fibres pour continuer le partie experimental.

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de résistance à la traction par flexion et de compression à l'âge de 7 jours.

Tableau II. 10 : Résistance à la traction et à la compression à l'âge de 7j.

Le % des fibres	R _f (Mpa)	R _c (Mpa)
0	4.02	8.08
1	3,23	7,39
2,5	3,56	6,13
3	3,87	7,88
3,5	3,79	8,54
4	4,38	8,66

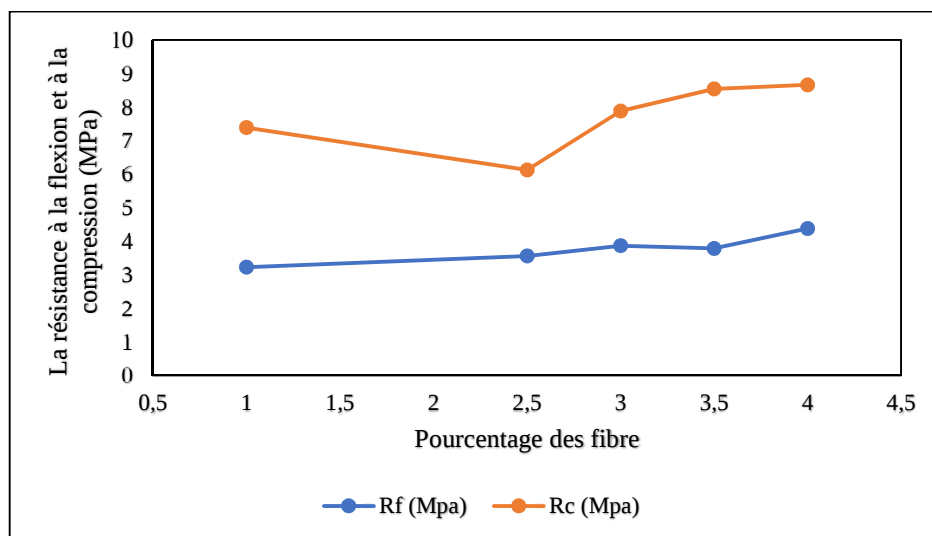


Figure II. 9 : Résistance à la flexion et à la compression à l'âge de 7j.

II.4.Essais réalisés

II.4.1.Essai de traction par flexion (NF P 15-471)

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de 50 N/s, jusqu'à rupture. La résistance en flexion (en MPa) est calculée au moyen de la formule :

$$Rf = \frac{1.5 \times Ff \times l}{b^3} \quad (\text{II.1})$$

Rf : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

Ff : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

l : est la distance entre les appuis, en millimètres.

b : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

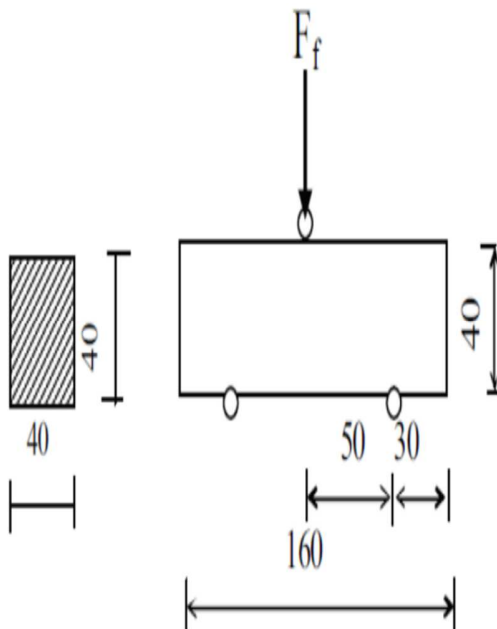


Figure II. 10 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.

II.4.2. Résistance à la compression (NF P 15-471)

Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s. La contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II. 2})$$

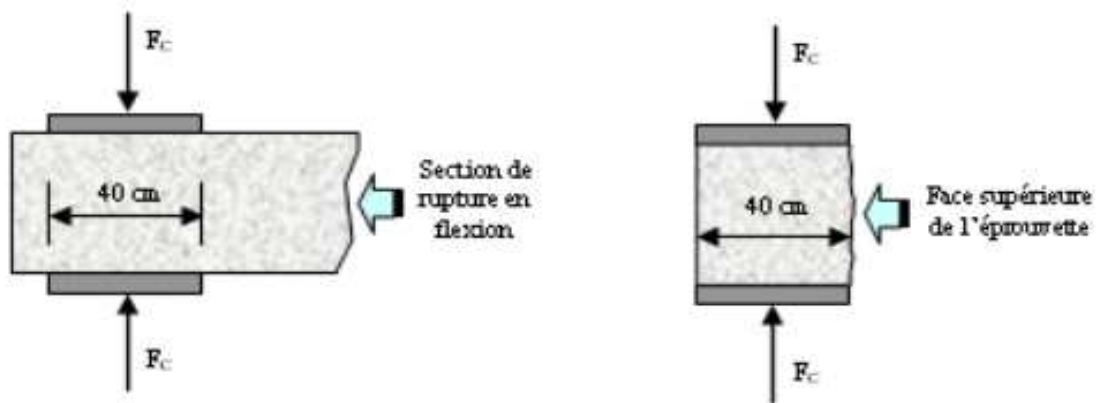


Figure II. 11 : Dispositif de compression

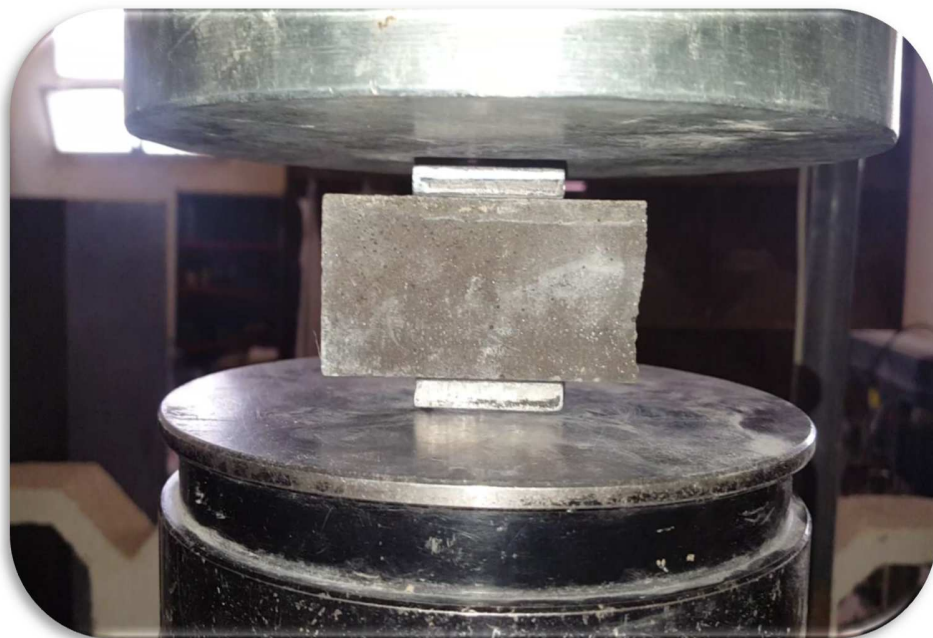


Figure II. 12 : Presse utilisé pour l'essai de compression.

II.4.3.Essai d'arrachement

L'essai consiste à mesurer directement l'adhérence d'un produit de réparation sur son support. Pour ce faire, une portion de surface circulaire de 5 cm de diamètre est isolée en effectuant une incision au moyen d'un trépan dans le produit. Ensuite, une pastille métallique est collée sur cette partie incisée. Une fois la colle suffisamment sèche, un effort perpendiculaire au plan de du produit de réparation est appliqué à l'aide d'un appareil dénommé dynamomètre à soufflet. L'effort de traction exerce sur la pastille est augmenté jusqu'à l'arrachement de la surface incisée. Ainsi la force d'arrachement et le type de rupture sont déterminés.

Vu le manque de moyens, nous avons effectués un essai similaire, nous préparions des éprouvettes cylindriques de 5cm de diamètre et 10cm d'hauteur.



Figure II. 13: les éprouvettes utilisées pour l'essai d'arrachement.

Après le 28^e jours, nous préparions les éprouvettes par le montage des pastilles métalliques, un jour après (le temps nécessaire pour le séchage de la résine) on effectué l'essai d'arrachement à l'aide de presse de laboratoire.

La contrainte d'adhérence vaudra :

$$Ra = \frac{F}{A} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

F : La force à la rupture.

A : L'aire de la section.



Figure II. 14: Des éprouvettes en attente de séchage

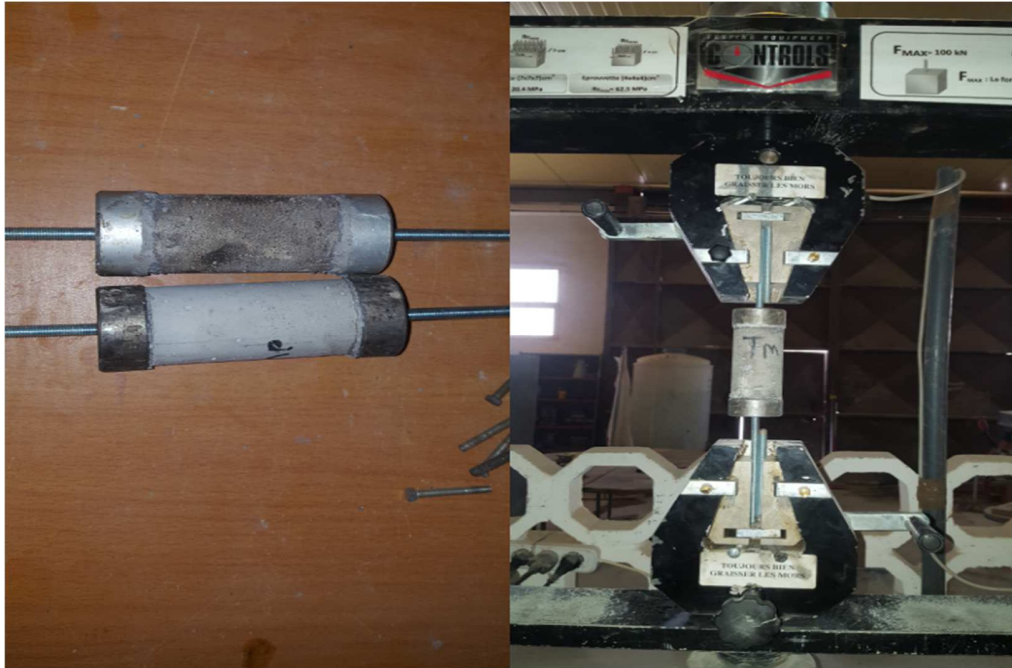


Figure II. 15: Epreuves et la presse utilisée.

II.4.4.Essai au scléromètre (NF P-18 417)

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton, et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique.

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

La formule (II.4) permet d'évaluer approximativement la résistance du béton ausculté. [36]

$$F_c = \frac{I^2}{32} \quad (\text{II. 4})$$

Où :

F_c : la résistance à la compression.

I : L'indice scléromètre.

Ou bien on utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à $\pm 50 \%$.

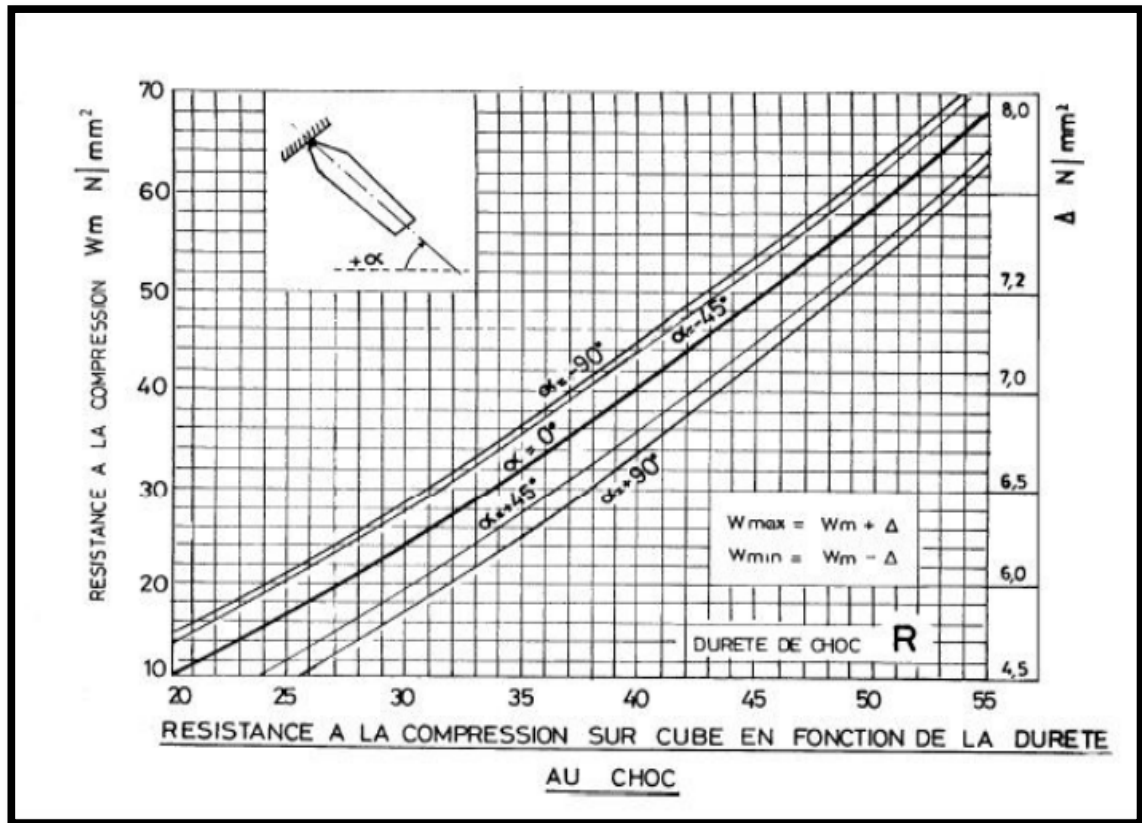


Figure II. 16 : Courbe de transformation unique.

II.4.5.Essai d'auscultation dynamique (NF P-18 418)

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais

il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton.

Beaucoup des interprétations des résultats de mesures aux ultrasons sont données dans la littérature par exemple :

Le chercheur allemand Wesche [37] donne :

$2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,

$3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,

$3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,

$V > 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

Et Solís-Carcano, [38] donne :

Tableau II. 11: Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions (**Solis-Carcano**)

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660-4575
Douteuse	3050-3660
Mauvaise	2135-3050
Très mauvaise	Inférieure à 2135

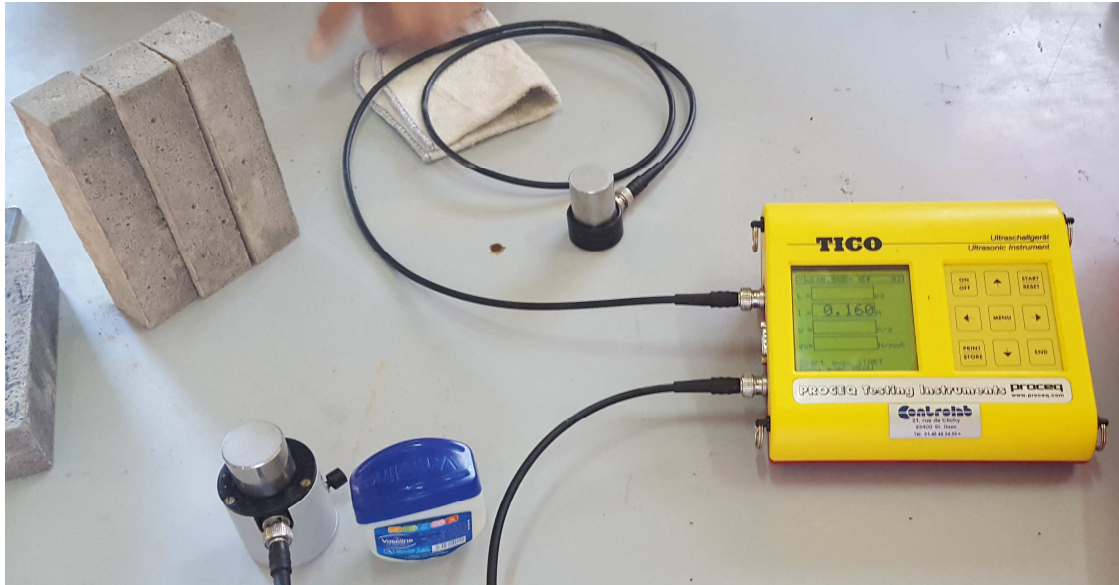


Photo II. 1 : Appareille utilisée pour l'essai d'ultrason.

II.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie.

Ces différentes formulations seront utilisées pour la réalisation de notre campagne expérimentale : études des propriétés physiques et mécaniques.

CHAPTER III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, Les résultats expérimentaux obtenus des différents tests effectués sur le mortier de réparation préparé, seront présentés et interprétés. Au premier lieu, nous allons présenter les résultats des essais mécaniques destructifs (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion et un essai d'arrachement). Ensuite nous représentons les résultats des essais non destructifs (essai d'auscultation dynamique et l'essai de scléromètre).

III.2.Mortier à base de fines des verres

III.2.1.Résistance à la traction par flexion (NF P 15-471)

Les résultats obtenus de l'essai de résistance à la flexion de mortier témoin (**MTSA**) et mortier avec fine de verre (**MFi**) sont enregistrés dans le **tableau III.1** et dans la **figure III.1** qui représente la courbe de la résistance à la traction à 7j, 14j, 28j ,60j et 90 jours.

Tableau III. 1 : Résultats de résistance à la traction par flexion.

Age	Type de Mortier	
	MTSA (MPa)	MFi (MPa)
7	2,07	3,70
14	4,06	4,66
28	5,91	6,11
60	4,74	5,25
90	5,50	7,87

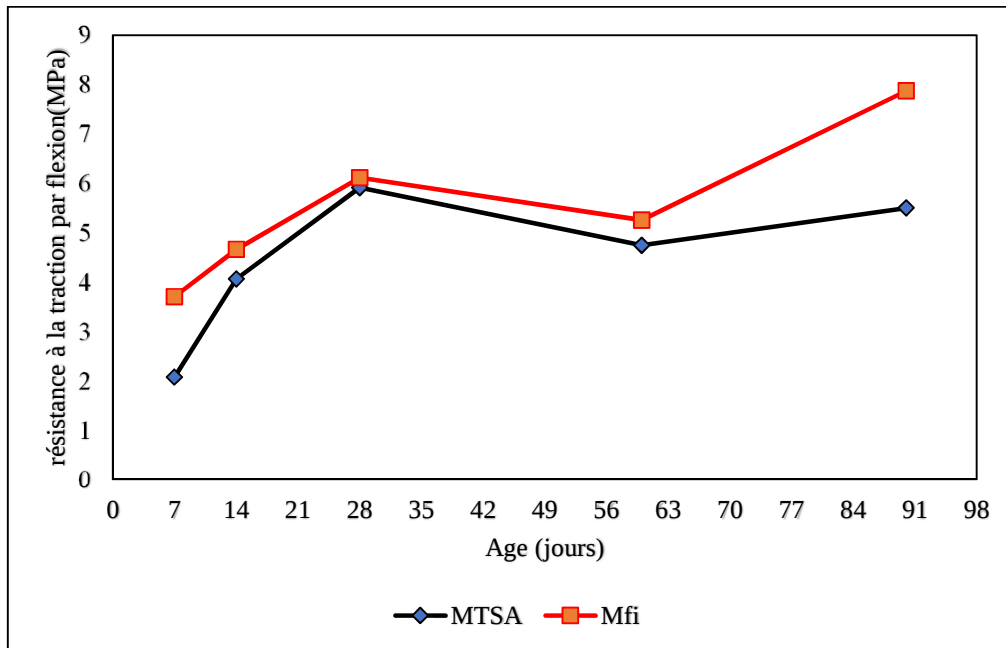


Figure III. 1: l'évolution de la résistance à la traction par flexion

D'après la **figure III. 1**, on constate que La résistance à traction par flexion augmente en fonction du temps pour les deux mortiers.

Ainsi, on observe que la résistance de mortier à base de fine de verre augmente comparativement à celle de mortier témoin.

La diminution de la résistance à la flexion à l'âge de 60 jours est dû au milieu de conservation (**Z. Damene, 2005**)[35] (**A.Ouled Mohamed et E.Ouled Sidi,2017**)[39].

Les maximums de résistance à la flexion enregistrées à l'âge de 90 jours sont 5.50MPa pour le mortier de référence et 7.87MPa pour le mortier à base de fine de verre, on constate un gain de résistance supérieur à 2MPa.



Figure III. 2 : Epreuve fléchée jusqu'à la rupture.

III.2.1.1.L'effet des fines sur la résistance à la traction par flexion

Les valeurs de résistance à la traction par flexion à 28 jours et 90 jours sont choisies pour voir l'effet d'ajout de fine de verre sur la résistance à la traction par flexion à court et long terme. Elles sont regroupées dans le **tableau III.1** et représentées sous forme d'histogramme dans la **figure III. 1**.

Toujours le mortier à base de fine de verre est plus performant à cause de présence des fines qui a une activité pouzzolanique.

L'effet de fine apparaitre depuis jeune âge par un gain de résistance à la flexion estimé à 3% par rapport au mortier témoin, ce gain évolue au cours de temps jusqu'à 43% à l'âge de 90 jours, ceci est confirmé par la littérature, qui montre les bénéfices de fines de verre sur le comportement mécanique à long terme.

III.2.2.Résistance à la compression (NF P 15-471)

Les résultats de la résistance à la compression de nos mélanges sont rassemblés dans le **tableau III. 2** et bien illustrés dans la **figure III.3** qui représente l'évolution de la résistance à la compression de 7j, 14j, 28j, 60 j et 90jours.

Tableau III. 2 : Résultats de résistance à la compression.

Age	Type de Mortier	
	MTSA (MPa)	MFi (MPa)
7	12,75	15,42
14	15,92	25,31
28	21,62	28,72
60	22,10	29,63
90	24,30	37,76

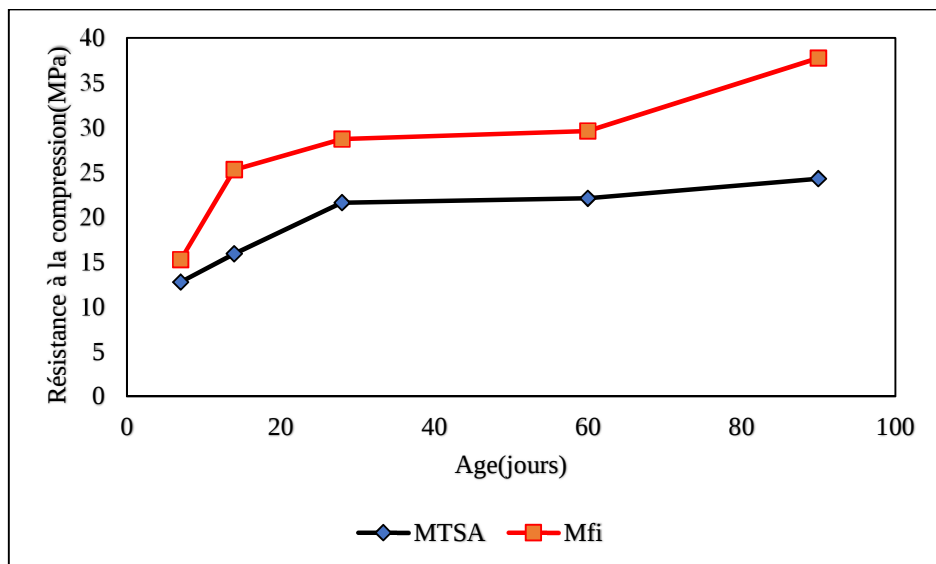


Figure III. 3 : l'évolution de la résistance à la compression.

La figure III. 3 montre que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge des éprouvettes pour les deux types.

L'évolution de la résistance à la compression met en évidence le développement du phénomène d'hydratation au cours du temps.

On peut observer que la vitesse de l'évolution de la résistance à la compression pour les deux mortiers est importante au début puis devient régulière avec le temps, ceci est dû à la vitesse d'hydratation qui est rapide au début et décroît par la suite

Le mortier de fine de verre a une meilleure résistance à la compression tout le temps où il atteint 37.76MPa à l'âge de 90 jours avec 24.30 MPa pour le mortier de référence, ce qui représente un gain de 13 MPa.



Figure III. 4 : Eprouvette écrasé par compression

III.2.2.1.L'effet des fines sur la résistance à la compression

La figures III.3 affirment l'intérêt de la présence des fines de verre dans la composition de mortier. Le gain de résistance à la compression pour le mortier Mfi apparait fortement : 33% par rapport au mortier témoin à l'âge de 28 jours, et 55% par rapport au même mortier à l'âge de 90 jours.

III.2.3.Essai d'arrachement

L'essai d'arrachement est effectué pour estimer la contrainte d'adhérence, les résultats de cet essai sont représentés dans la figure ci-dessous :

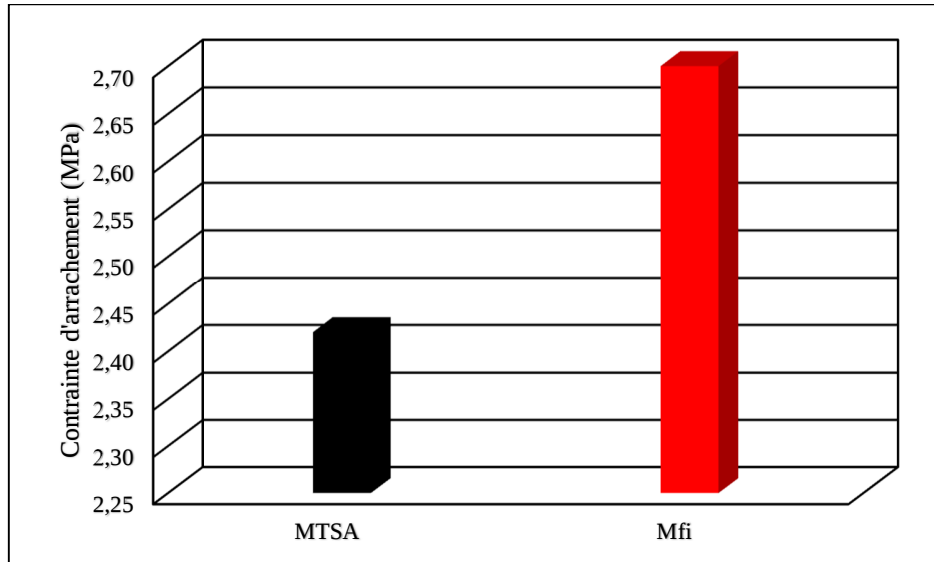


Figure III. 5 : contrainte d'arrachement

Les résultats sont en moyenne égales à 2.70 MPa pour le mortier de fine de verre.

La norme **P 18-840** fixant les caractères normalisés garantis pour les mortiers de réparation préconise une contrainte d'adhérence au moins égale à 2 MPa pour des réparations structurelles et 1.5 MPa pour les réparations non structurelles [40].

Ce résultat affirme les résultats précédents (comportement mécanique) et on peut dire que notre composite a une excellente contrainte d'adhérence ce qui lui permet d'être un mortier de réparation des éléments structuraux.

III.2.4.Scléromètre (NF P-18 417)

Les essais non destructifs effectués sur une couche de mortier à base de fine de verre couler sur une poutre dégradée, comme décrit en détail dans l'annexe.

Les résultats de l'essai de scléromètre effectués sur des couches de mortier coulé sur des poutres dégradées sont illustrés dans l'histogramme de la **figure III. 10**.

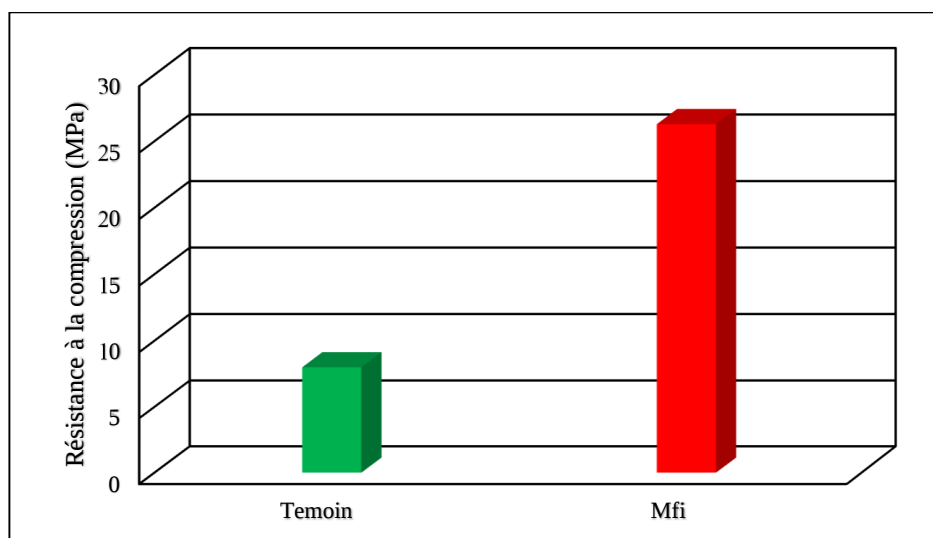


Figure III. 6: Résistance à la compression par scléromètre.

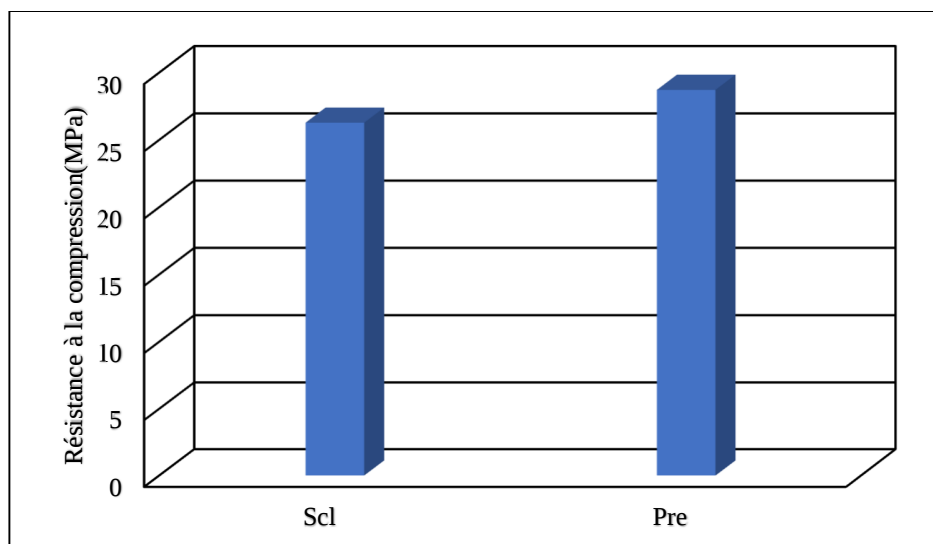


Figure III. 7 : Résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

D'après la **figure III. 6**, on remarque l'importance des fines de verre dans l'apport de dureté qu'elles procurent au mortier de réparation par rapport au témoin.

La **figure III. 7** montre que la résistance à la compression à l'âge de 28 jours obtenue par le scléromètre [NF P18-417] est semblable à celle obtenue par écrasement à la presse [NF P15-471] 26 MPa et 28.72 MPa

III.2.5.Auscultation sonore (NF P-18 418)

Les résultats d'auscultation sonore (ultrason) sont présentés dans la figure ci de-sous :

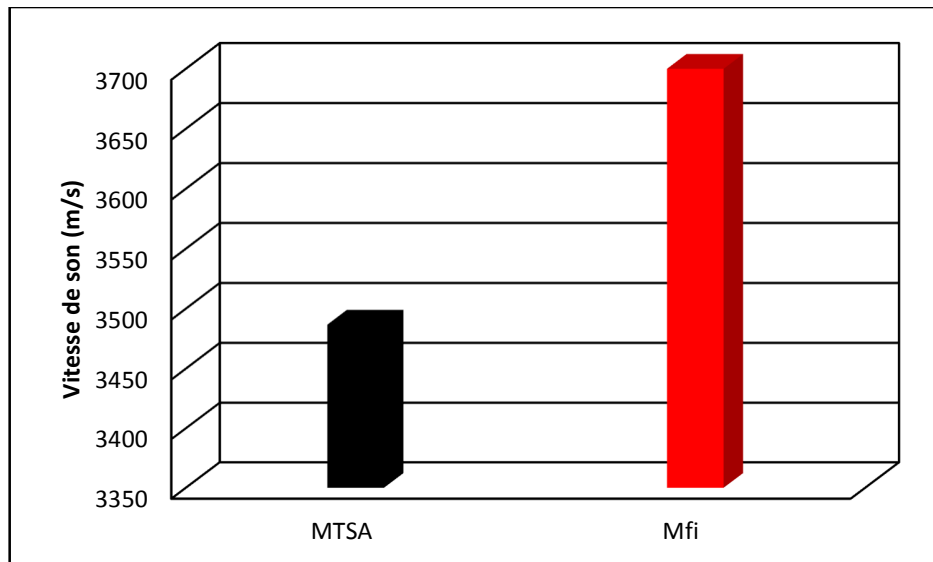


Figure III. 8: Vitesse de son

D'après la **figure III.8**, on constate que le mortier de fine de verre a une vitesse de son plus élevée que le mortier témoin, cela montre qu'il a une bonne compacité et par conséquent une résistance plus élevée.

Donc notre composite a une bonne qualité ($3660 \leq V \leq 4575 \text{ m/s}$) selon (**Solis-Carcano 08**), et a une haute résistance ($3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$) selon (**Weshe**).

III.3.Mortier à base de fibres des verres

Une fois le pourcentage en fibre a été choisi, le mortier préparé est soumis à plusieurs tests dont nous allons discuter les résultats par la suite.

Les résultats obtenus par l'essai de traction par flexion et l'essai de compression sont représentés dans les tableaux (III.3 & III.4), et traduits sous forme de courbes dans les figures III. 9& III.10 pour faciliter la comparaison.

Tableau III. 3: Résistance à la traction par flexion.

	MTA	MFA	MFG
7	4,02	4,38	2,54
14	4,30	3,66	3,66
28	4,96	3,56	4,91
60	4,73	4,38	4,36
90	5,11	4,62	4.10

Tableau III. 4 : Résistance à la compression.

	MTA	MFA	MFG
7	8,08	8,66	9,52
14	18,50	12,57	10,66
28	23,98	13,36	15,10
60	26,88	17,88	16,52
90	29,42	20,97	15.45

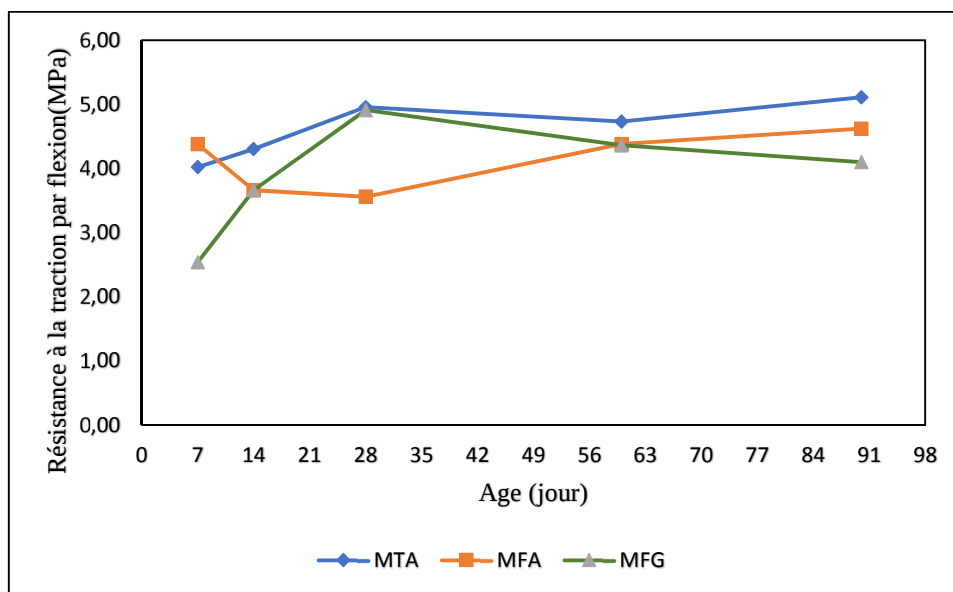


Figure III. 9 : L'évolution de la résistance à traction en fonction de temps.

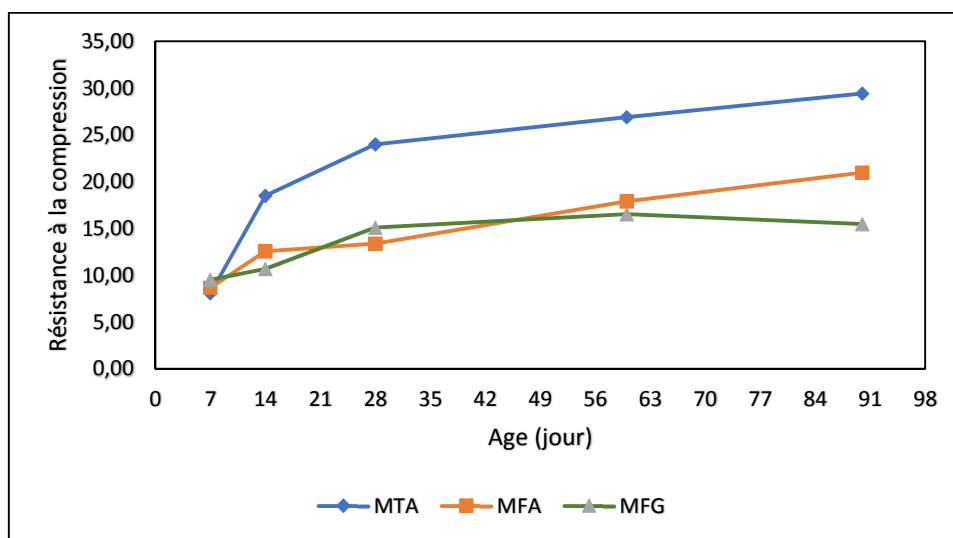


Figure III. 10 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction de temps.

D'après ces résultats, on constate que les mortiers de laine de verre n'apportent aucune amélioration de résistance mécanique (traction et compression) par rapport au mortier témoin. Cela peut être expliqué par l'usure des fibres.

III.4. Analyse comparative

L'introduction des fibres de verre issues des déchets de la laine de verre d'isolation dans les chantiers a été étudiée dans le but d'une valorisation de cette quantité de déchets. Dans ce qui suit, nous allons comparer ses résultats avec ceux du mortier de fines de verre issues des déchets de verre.

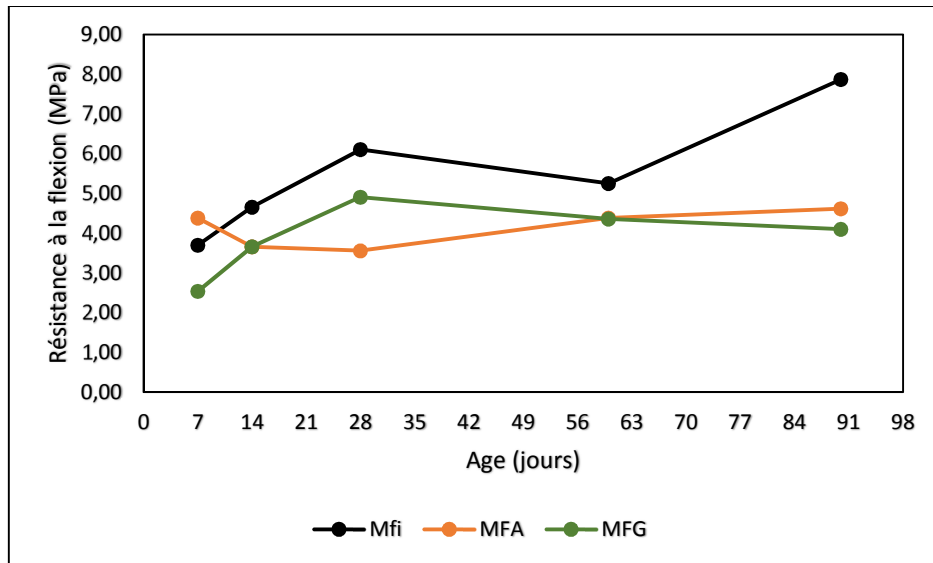


Figure III. 11 : L'évolution de la résistance à la flexion des différents composites.

D'après la **figure III. 11**, on constate que la résistance à la flexion dans le cas de mortier fibre-adjuvant apprête une bonne résistance à jeune âge (7^e j), mais juste après le 14^e jour commence la perte de résistance pour la raison mentionnée ci-dessus.

Le gel d'aloë-verra améliore la résistance à la flexion et cache le défaut des fibres, mais jusqu'à le 60^e jour et après son effet disparaît.

L'effet des fines de verre apparaitre depuis l'âge de 14 jour et garde sa priorité par rapport aux autres composites surtout à long terme.

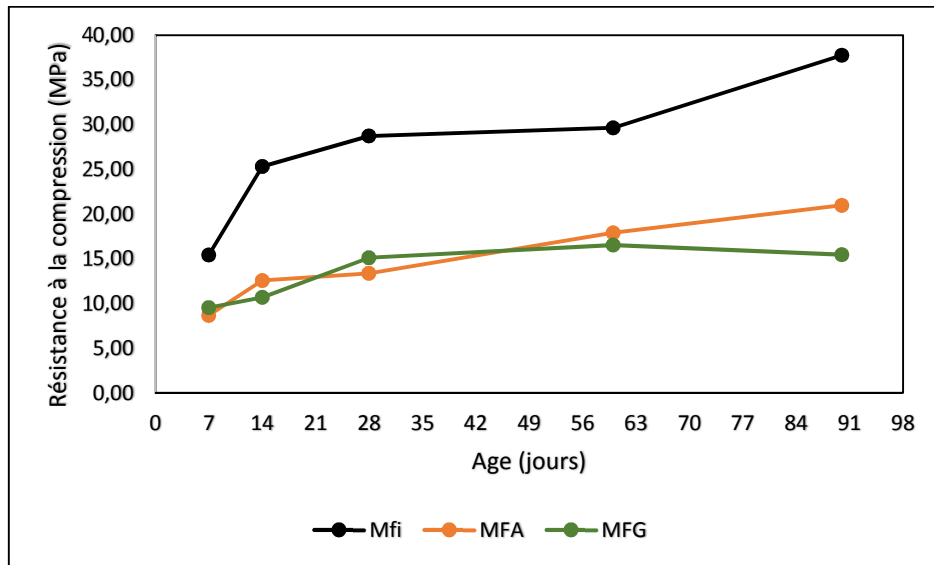


Figure III. 12 : L'évolution de la résistance à la compression des différents composites.

L'ajout de déchet de fibre de verre a toujours un effet négatif sur la résistance à la compression quel que soit avec adjuvant ou bien avec gel d'aloë-vera.

Les fines de verre donnent un bon comportement mécanique vis-à-vis la compression depuis jeune âge, cet avantage développe jusqu'à atteindre un gain de résistance de 17 MPa par rapport à MFA, et plus de 22 MPa par rapport à MFG.

L'effet de gel d'aloë-vera en tant que résine facilite l'adhérence des fibres dans la matrice mais à l'âge de 60 jour il perd son avantage.

III.5.Synthèse du chapitre

L'influence de l'additions de poudre de verre a été étudiée et discutée à partir des nombreux essais sur le mortier.

L'influence de l'addition de laine de verre a été étudiée et discutée à partir des nombreux essais sur le mortier.

L'ajout de fine de verre améliore les performances de mortier au niveau de résistance à la flexion, résistance à la compression, résistance d'arrachement et aussi la compacité et l'homogénéité de mortier.

L'ajout de laine de verre a un effet négatif sur les performances de mortier au niveau de résistance à la flexion, résistance à la compression.

Le tableau III.5 regroupe tous les résultats expérimentaux

Tableau III. 5 : Récapitule des résultats

	Résistance à la flexion (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	28j	90j	28j	90j
MFi	6,11	7,87	28,72	37,76
MFA	3,56	4,62	13,36	20,97
MFG	4,91	4,10	15,10	15,45

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le contexte de valorisation des déchets et de les introduire dans le domaine de matériaux de construction, on a réalisé cette étude pour tester l'influence des déchets des verres fibres et fines sur la résistance mécanique de mortier pour élaborer un mortier de réparation destiné aux réparations des bétons dégradés.

Les résultats expérimentaux de cette étude ont permis de conclure ce qui suit :

- ❖ L'ajout des fines de verre montre une excellente performance mécanique par rapport aux autres composite réalisés.
- ❖ L'ajout de déchets de laine de verre (fibre de verre) a un mauvais impact sur le comportement mécanique des mortiers.
- ❖ Le rapport E/C augmente en fonction de pourcentage des fibres substituées.
- ❖ Le gel d'aloe-vera est non compatible avec la matrice cimentaire, au contraire avec la matrice de terre (**L. Chaoui2017**).
- ❖ L'utilisation de gel d'aloe-vera ne réduit pas la quantité d'eau par rapport à l'utilisation de superplastifiant.
- ❖ L'effet de gel d'aloe-vera sur le comportement mécanique des mortiers est provisoire, il disparaît à l'âge de 60 jours au maximum.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que ce nouveau composite, nous voulons dire ici le mortier de fine de verre avec le gel d'aloe-vera semble offrir une alternative économique, et technologique, il aiderait à résoudre certains problèmes relatifs à la gestion des déchets solides créés par la production des verres et pourrait être un facteur économique générateur de valeurs ajoutés, aussi il peut répondre à la demande de réparation moins coûteuse pour ses propriétés très satisfaisantes.

Recommandations et perspectives de recherches

- Pour les futures recherches, nous recommandons d'utiliser les fines de verre avec la composition $C/S=2/3$ pour une éventuelle comparaison.
- De faire une analyse détaillée des propriétés physiques de mortier à base de fine de verre.
- Etudier le comportement mécanique de mortier fine de verre en présence d'adjuvants.
- Etudier la durabilité et le comportement mécanique de béton à base de fine de verre à long terme.
- Pour assurer la durabilité de composite à base de fine de verre, l'étude de l'attaque sulfatique à long terme et l'étude d'autres altérations du béton ; carbonatation et pénétration des ions chlorures...est nécessaire.
- Eviter l'utilisation des déchets de fibre de verre.
- Eviter l'utilisation de gel d'aloë-vera dans les matrices cimentaires.

Références Bibliographiques

- [1]foam glass concrete. Construction and Building Materials, 28(1), p. 759-768.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.052>
- [2]Idir R . , (2009) . Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat, Institut national des sciences de Toulouse.
- [3]Damene.Z .,(2017), Valorisation des sables de dunes de la région de Laghouat : étude de bétons cellulaires à base de sable de dune, chaux, ciment et poudre d'aluminium,(thèse de doctorat).UATL
- [4]Matos A. M; Sousa Coutinho J., (2012) .Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials, 36, p. 205-215.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>
- [5]Behim M ., Boucetta T. A., (2013) .Valorisation du verre à bouteille comme ad-dition fine dans les bétons autoplaçants, Déchets Sciences et Techniques, 65, p. 20-28.
<https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.932>
- [6]Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A., (2010). Can we massively reuse glass in concrete? Properties of glass concrete. Verre, 16(5), p. 70-77.
- [7]Idir R.,Cyr M., Tagnit-Hamou A., (2011) . Potential pozzolanicity of glass cullet fines and aggregates. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 1, p. 28-34.
- [8]Zeghichi L ., Mezghiche B ., Benghazi Z ., (2012). Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et compos. Communication Science & Technologie, 10.
- [9]Topçu I. B; Canbaz M., (2004). Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research. 34(2), p. 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.ce-mconres.2003.07.003>
- [10]Zidol A., (2014). Durabilité en milieux agressifs des bétons contenant de la poudre de verre. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada,
- [11]Chaoui Lina.,(2017). Réhabilitation durable du patrimoine bâti en terre crue , cas d'étude ksar de tadjmout(Master).UATL
- [12]Bureau de normalisation., NBN ENV 1504-9. Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton. Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.
- [13]Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structures, rencontres scientifique, SOCOTEC-CTC année 2002.
- [14]Mohcene BOUKHEZAR .,(2009). REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POUTRES AU MOYEN DES MATERIAUX COMPOSITES

- [15]SAMAI M. L., Notes des cours de post- graduation. Univ deConstantine. Algérie (2007).
- [16]Abdelhakim BEDDIAR ., RENFORCEMENT DES POUT RES EN BETON ARME A L'AIDE DE MATERIAUX COMPOSITES, Mémoire magistère
- [17]Bureau de normalisation .,NBN ENV 1504-9. Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton. Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité. Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes. Bruxelles, NBN, 1997.
- [18]Bureau de normalisation .,NBN B 06-001. Mesurage dans le bâtiment. Méthodes de mesurage de quantités. Bruxelles.
- [19]Bureau de normalisation., NBN EN 14630. Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Méthodes d'essais. Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphthaléine. Bruxelles, NBN, 2007.
- [20]Guide technique du STR R ES. de Reprise des bétons dégradés
- [21]Guide technique du STRRES Traitement des fissures par calfeutrement ou pontage et protection localisée, et Traitement des fissures par injection
- [22]Guide technique du STRRES Réparation et renforcement de structures par des armatures passives additionnelles
- [23]Guide technique LCPC Décembre 2002 Protection des bétons par application de produits à la surface du parement
- [24]Guide technique du STRRES : Béton projeté.
- [25]AFGC : documents scientifiques et techniques Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites Recommandations provisoires. (02/ 2011) .
- [26]Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research enRegelgeving–BetonverenigingDuurzaamheidenonderhoud van betonconstructies.
- [27]Belgian Construction Certification Association., PTV 563. Prescriptions techniques pour mortiers de réparation du béton. Bruxelles
- [28]Bureau de normalisation .,NBN EN 1504-7. Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton.
- [29] elgian Construction Certification Association .,PTV 562. Prescriptions techniques pour systèmes de protection, d'étanchéité ou d'imperméabilisation de surface pour le béton. Bruxelles,
- [30]ACI Special Publication .,SP-215-9, 2003., « Field Applications of FRP Reinforcement

Case Studies ». Published by the American Concrete Institute.

[31]Hollaway, L. C., (1990). « Polymers and Polymer Composites in Construction », Thomas Telford Ltd., London, UK.

[32]Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats [WWW Document], 2015. . Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats. URL <https://www.lafarge.dz/> (accessed 5.27.19).

[33]Emaneul Morin.(2008)

[34]Fiche technique., « Sikadur®-31 CF », Sika El Djazair.

[35]Damene.Z .,(2005) . COMPORTEMENT PHYSICI-MECANIQUE ET RESISTANCE AUX SULFATES DE MORTIER A BASE DE CIMENT ALGERIENS (Magistère).

[36]Georges Dreux., Jean Festa .,(1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants

[37]Wesch ;Chapitre II : les essais non destructifs

<http://thesis.univ-biskra.dz/2332/4/chapitre%202%20.pdf>

[38]Solís-Carcano, R., et Moreno, E. I. (2008). «Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity». Construction and Building Materials, volume 22, numéro 6, pp. 1225-1231.

[39]A .OULED MOHAMED.,Ethmaneouled Sidi.,(2017).Etude du comportement mécanique des mortiers en climat chaud(Master).UKMO

[40]CNEBRIB :centre National d'Etude et Recherches Intégrées du bâtiment .,(2007). Essai mécanique et essai d'adhérence sur mortier de ciment mélangé avec le produit MEDACIMSTA .

[41]Fibres de verre à usage spécial., Fiche toxicologique n°268 (2007)

[42]Fiche technique : « MEDAPLAST », Granitex, nouveaux produits' Societé Algérienne

Annexe

1.Réparation d'une poutre

La réparation des poutres en béton armé dégradées passe par les étapes suivantes :

1.1Dégagement des armatures

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion.



Photo 1 : Dégagement des armatures.

S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse.



Photo 2 : Pansage des armatures corrodés

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure.

Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation.

1.2Le ragréage

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

1.2.1Mode opératoire

Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant.



Photo 3 : L'humidification de zone à réparer.

Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer.



Photo 4 : L'application du mortier de réparation.

Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge.

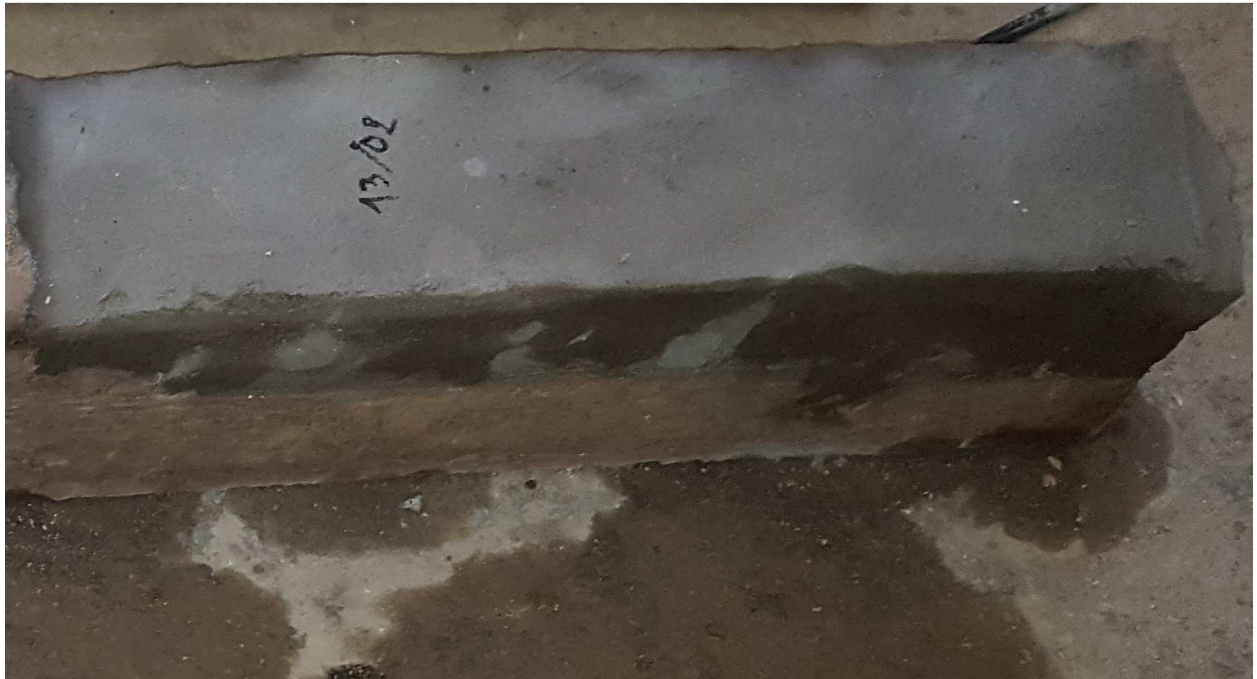


Photo 5 : Fin de réparation.

عنوان المذكرة : دراسة مركب اصلاح باستعمال نفايات الزجاج لتقوية الخرسانة المتدهورة

المؤطر : ضامن زينب

الإسم: عمر & أيوب

اللقب: بوحادة & نور الدين

ملخص تهدف هذه الدراسة إلى تثمين نفايات الزجاج واستعمالها كإضافة لإنتاج ملاط إصلاح عالي الأداء يلبي متطلبات القوة والمتانة. يعد استغلال هلام الصبار كمساعد راتيني في مجال مواد البناء بديلاً قيد الدراسة.

مبدأ العمل هو دراسة إمكانية إنتاج مركب اسمنتي لإصلاح الشقوق والخرسانة المتدهورة. تتكون ملاط الإصلاح هذا من نسبة مئوية من الزجاج الناعم (20٪)، ونسبة من الألياف الزجاجية المهذورة (4٪) المستبدلة جزئياً في الرمال، ويتم إدخال هلام الصبار كراتنج بين المصفوفة والتقوية (الألياف الزجاجية). أظهرت نتائج الدراسة المركبة أن استبدال نفاية الألياف الزجاجية له تأثير سلبي على الخصائص الميكانيكية، في حين أن استبدال نفايات الزجاج المسحوقة يحسن بشكل كبير من أداء المركب، مما يجعل من الممكن اعتباره مركب إصلاح.

كلمات مفتاحية: تثمين، نفايات الزجاج، مسحوق الزجاج، ألياف الزجاج، هلام الصبار.

Memory title : Study of a glass-based repair composite for degraded concrete reinforcement

Name: BOUHADDA& NOUREDDINE **First name:** Omar &Ayoub

Directed by: DAMENE ZINEB

Abstract : This study aims at recovering glass garbage as an addition for the production of a high-performance repair mortar that meets the requirements of strength and durability. The exploitation of gel aloe-vera as resin additive in the field of building materials is an alternative to study.

The principle of the work is to study the possibility of producing a cement composite for the repair of cracks and degraded concrete. These repairs mortars are composed of a percentage of fine glass (20%), a percentage of fiberglass garbage (4%) substituted in sand , the introduction of aloe-vera gel is studied as a resin between the matrix and the reinforcement (fiberglass).The results of composites study showed that the substitution of fiberglass garbage has a negative effect on the mechanical properties, however substitution of fine glass improved considerably the performance of composite, which allows to consider it as a repair composite.

Key words: valuation; glass garbage; Fine glass; fiberglass; aloe vera gel.

Titre du mémoire : ETUDE D'UN COMPOSITE DE REPARATION A BASE DE DECHETS DE VERRE DESTINE AU RENFORT DE BETON DEGRADE

Nom: BOUHADDA& NOUREDDINE **Prénom:** Omar &Ayoub

Encadreur: DAMENE ZINEB

Résumé Cette étude vise la valorisation des déchets de verre comme ajout pour la production d'un mortier de réparation performant qui répond aux exigences de résistance et de durabilité. L'exploitation du gel d'alo-vera comme adjuvant résineux dans le domaine des matériaux de construction est une alternative à étudier.

Le principe du travail est d'étudier la possibilité de production d'un composite cimentaire destiné à la réparation des fissures et du béton dégradé. Ces mortiers de réparations sont composés d'un pourcentage de fine de verre (20%), un pourcentage de déchets de fibre de verre (4%) substitués dans le sable, l'introduction du gel d'alo-vera est étudié comme résine entre la matrice et le renfort (fibre de verre). Les résultats d'étude des composites ont montré que la substitution de déchets de fibre de verre a un effet négatif sur les caractéristiques mécaniques, en revanche la substitution des fines de verre broyé améliore considérablement les performances du composite, ce qui permet de le considérer comme un composite de réparation.

Mots clés : valorisation ; déchets des verres ; Fine de verre ; fibre de verre ; gel d'alo-vera.