



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Thelidji- Laghouat



FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Souilem Khaoula

DOMAINE : Sciences et technologies

FILIERE : Génie civil

OPTION : Matériaux de Génie Civil

Thème

Contribution à l'étude de l'effet de la nature du sable sur la compatibilité d'un mortier de réparation autoplaçant

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Gueddouda Mohamed Kamel	Professeur	Président
Lakhdari Mohamed Fateh	M.A.A	Examineur
Krobba Ben Harzallah	M.C.A	Rapporteur
Ait Mechedele Amira Hanane	Doctorante	Co-rapporteur

Promotion : Juin 2023

تشكرات

الحمد لله رب العالمين، حمدا طيبا مباركاً فيه ملء السماوات والأرض وملء ما بينهما،
وملء ما شاء.

والصلاة والسلام على خير المرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين وبعد...
فله الحمد والمنة أن أعانني على إنجاز هذه الدراسة، والحمد لله الذي قيض لي من
عباده الأخيار وذوي الفضل والعلم والاعتبار لإتمام هذا العمل، وانطلاقاً من قول النبي
صلى الله عليه وسلم " من صنع إليكم معروفاً فكافنوه، فإن لم تجدوا ما تكافنونه،
فادعوا له حتى دعوا أنكم قد كافأتموه "

فالشكر لله أولاً ثم شكري الجزيل لأستاذي الفاضل الدكتور " قربة بن حرز الله "
الذي وجدته نعم المشرف والاساتذ معلما وأخلاقاً أشكر على النصح القيمة
والتوجيهات السديدة التي قدمت لي من أجل إعداد هذه الرسالة جزاك الله عني
خير الجزاء.

شكراً للمشرفة المساعدة ايم مشدال أميرة حنان كنت بمثابة الأخت والصديقة
أتمنى لكى التوفيق والنجاح في حياتك

شكراً ... لأعضاء اللجنة الموقرة ... الأساتذة الأفاضل على قبولهم مناقشة هذا العمل .
كما أتقدم بالشكر والتقدير لكل من أسدى لي مشورة أو قدم لي نصيحة لهم مني
جميعاً خاص الشكر والتقدير فجازاهم الله عني خير الجزاء .
وفي الأخير أسأل الله العلي أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم وآخر دعوانا أن
الحمد لله رب العالمين .

إهداء

إلى من قال فيهم سبحانه وتعالى « وقضى ربك ألا تعبد إلا إياه و بالوالدين
إحسانا » إلى الجد و الجدة إلى الأخوة والأخوات إلى الأخوال و الخالات إلى
أميراتي الصغيرات إلى الأصدقاء و الصديقات أخص منهم من كانوا عوننا
لي في لحظات اليأس و التعب ، إلى كل من شجعني على الاجتهاد و مواصلة
الطريق و التمسك بهدفي ، إلى كل من امن بلمي حتى أصبح اليوم واقع
أعيشه إلى كل من ساندني من قريب أو بعيد في انجاز هذا العمل.

خولة

ملخص

شهدت الجزائر مؤخرا نقصا حادا في الموارد الطبيعية المستخدمة في البناء، ولاسيما الرمال الوديان، مما يؤثر سلبا على التوازن البيئي. لذلك أصبح من الضروري النظر في تطوير موارد أخرى غير مستغلة، مثل رمل الكثبان والرمل الجيري. الهدف من هذا العمل هو دراسة الخصائص الفيزيائية الميكانيكية وكذلك التوافق الخرسانة القديمة مع ملاط الإصلاح ذاتي القوية لمختلف الخلطات ثنائية التركيب (رمل الكثبان و الرمل الجيري).

الخصائص الفيزيائية الميكانيكية التي تمت دراستها هي قوة الانضغاط، وقوة الشد، ومعامل المرونة، وانكماش وامتصاص الماء الشعري. تم تقييم توافق المونة التي تم تطويرها من خلال اختبار السحب واختبار القص المائل واختبار الشد المنقسم. أظهرت النتائج التي تم العثور عليها أنه مقارنة بالمونة الغرينية، يتم الحصول على تحسن في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمونة عن طريق الاستبدال الجزئي لرمل الكثبان الرملية برمال الحجر الجيري. لوحظ تحسن في ضغوط الالتصاق من خلال اختبار الشد والقص المائل والسحب عن طريق الانقسام المونة على أساس الرمال الثنائية.

كلمات مفتاحية: ملاط ذاتي القوية، الانكماش، المقاومة الميكانيكية، معامل المرونة، إجهاد الالتصاق، الإجهاد، رمل الكثبان، رمال الحجر الجيري

Abstract

Algeria has recently experienced a severe shortage of natural resources used in construction, especially alluvial sand, which negatively affects the environmental balance. It has therefore become necessary to consider valuing other untapped resources, such as dune sand and limestone sand. The aim of this work is to study the physic-mechanical properties as well as the compatibility with the concrete substrate of self-compacting repair mortars based on different binary mixtures of sands (dune sand and limestone sand).

The physic-mechanical properties studied are the compressive strength, the flexural strength, the modulus of elasticity, the shrinkage, and the absorption of water by capillarity. The compatibility of the elaborated mortars was evaluated by the Pull-off, Slant shear, and Splitting tensile tests. The obtained results showed that, compared to alluvial sand mortar, there was an improvement in the physic-mechanical properties of mortars when partial substitution of dune sand by limestone sand occurred. An improvement in the adhesion strengths was also noticed for the repair mortars based on binary sand.

Key words: self-compacting repair mortars, Shrinkage, Mechanical strength, Modulus of elasticity, Bond strength, Compatibility, Sorptivity, Dune sand, Limestone sand

Résumé

L'Algérie a récemment connu une grave pénurie de ressources naturelles utilisées dans le domaine de la construction, en particulier le sable alluvionnaire, qui affecte négativement l'équilibre environnemental. Il est donc devenu nécessaire d'envisager à valoriser des autres ressources non exploitées, tels que le sable de dune et le sable calcaire. Le but de ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques, ainsi que la compatibilité avec le béton substrat des mortiers de réparations autoplaçant à base de sable de différents mélanges binaires (sable de dune et sable calcaire).

Les propriétés physico-mécaniques étudiées sont la résistance à la compression, la résistance à la flexion par traction, le module d'élasticité, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité. La compatibilité des mortiers élaborés a été évaluée par l'essai d'arrachement, l'essai de cisaillement oblique et l'essai de traction par fendage. Les résultats trouvés ont montré que par rapport au mortier à base alluvionnaire; une amélioration des propriétés physico-mécaniques des mortiers est obtenue lors de substitution partielle du sable de dune par sable calcaire. Une amélioration des contraintes d'adhérence par arrachement, par cisaillement oblique et par traction par fendage ont été remarquées pour les mortiers de réparation à base de sable binaire.

Mots clés: Mortier de réparation autoplaçant, Retrait, Résistances mécaniques, Module d'élasticité, Contrainte d'adhérence, Sportivité, Sable de dune, Sable calcaire

Table des matières

تشكرات.....	I
إهداء.....	II
ملخص.....	III
Abstract.....	III
Résumé.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VII
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction.....	5
I.2 La compatibilité.....	5
I.2.1 Concept de compatibilité.....	5
I.3 Compatibilité dimensionnelle (stabilité dimensionnelle).....	7
I.3.1 Module d'élasticité.....	7
I.3.2 Retrait.....	8
I.3.2.1 Retrait de séchage.....	9
I.3.2.2 Retrait endogène.....	9
I.3.2.3 Retrait thermique.....	10
I.3.3 Dilatation thermique.....	10
I.3.4 Fluage.....	10
I.4 Adhérence dans le béton.....	11
I.4.1 Définition de la force de l'adhérence.....	11
I.4.1.1 Adhérence mortier de réparation – béton.....	11
I.4.2 Facteurs qui affectent la force d'adhérence.....	13
I.4.3 Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence.....	13
I.4.3.1 Essai d'arrachement.....	14
I.4.3.2 Essai de cisaillement oblique (Slant-shear).....	16
I.5 Les constituants d'un mortier autoplaçant.....	16
I.5.1 Le sable.....	16
I.5.1.1 Sable alluvionnaire.....	17
I.5.1.2 Sable calcaire.....	17
I.5.1.3 Sable de dune.....	18
I.5.2 Ciment.....	18
I.5.3 Eau de gâchage.....	18
I.5.4 Super-plastifiants.....	18
I.6 L'effet de type de sable sur les performances des mortiers.....	20
I.6.1 Résistance à la compression.....	20
I.6.2 Retrait.....	20
I.6.3 Force d'adhérence.....	20

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

II.1 Introduction.....	22
II.2 Matériaux utilisés.....	22
II.2.1 Ciment.....	22
II.2.1.1 Caractéristiques physiques du ciment.....	23
II.2.1.2 Caractéristiques mécaniques du ciment.....	24
II.2.2 Eau de gâchage.....	24
II.2.3 Adjuvant.....	24

II.2.4	Sables.....	25
II.2.4.1	Caractéristiques physiques	25
II.3	Méthodes expérimentales.....	30
II.3.1	Procédure de malaxage.....	30
II.3.2	Essais effectués sur les mortiers à l'état frais.....	31
II.3.2.1	Etalement au mini cône	31
II.3.3	Essai effectués sur les mortiers à l'état durci.....	31
II.3.3.1	Confection et cure des éprouvettes.....	31
II.3.3.2	Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés.....	32
II.3.4	Les essais d'adhérences.....	37
II.3.4.1	Essai de cisaillement oblique (Slant-shear).....	37
II.3.4.2	Essai d'arrachement (Pull-off).....	37
II.3.4.2	Traction par fendage.....	38
Chapitre III : Résultats et interprétation		
III.1	Introduction.....	41
III.2	Formulation d'un mortier de réparation autoplaçant à l'état frais.....	41
III.3	Effet de mélange de sable sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers....	42
III.3.1	Résistances mécaniques	42
III.3.1.1	Résistance à la traction par flexion	42
III.3.1.2	Résistance à la compression	44
III.3.2	Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion	46
III.3.3	Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique	47
III.3.4	Corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique	48
III.3.5	Absorption par capillarité.....	50
III.3.6	Retrait total.....	51
III.4	Adhérence mortier de réparation -béton substrat.....	53
III.4.1	Adhérence par cisaillement oblique (Slant-shear)	53
III.4.2	Adhérence de traction par arrachement (pull-off).....	54
III.4.3	Adhérence de traction par fendage (split tensile)	55
III.4.3	Relation entre la contrainte d'adhérence par arrachement et traction par fendage.....	56
Conclusion générale.....		59
Références bibliographiques.....		61

Liste des tableaux

Tableau II.1. Composition chimique et propriétés physiques de ciment	23
Tableau II.2 présente les caractéristiques physiques du ciment.	24
Tableau II.3. Résistances à la compression et à la flexion du ciment.	24
Tableau II.4. Analyse granulométrique des sables.	26
Tableau II.5. Modules de finesse des sables	26
Tableau II.6. Classement des sables.	27
Tableau II.7. Masses volumiques absolue.	27
Tableau II.8. Masses volumiques apparentes.	28
Tableau II .10 : l'absorption des sables	28
Tableau II .9 : Compacité des sables	29
Tableau II.11 : équivalent des sables	30
Tableau II.12. Classe de propreté d'équivalent de sable.	30
Tableau III.1 récapitule la composition des différents mélanges de MRAP, ainsi la composition du mortier à base de sable alluvionnaire MA	41

Liste des figures

Figure 1.1 : Facteurs affectant la compatibilité dimensionnelle	06
Figure I.2 : Dimensional incompatibility due to shrinkage	08
Figure I.3 : Schematic representation of the attenuation of creep-induced tensile stresses during restrained shrinkage .	11
Figure I.5 : Modèle idéalisé d'un système de réparation.	12
Figure I.6 : Représentation multi-échelle de l'interface entre le béton ancien et le béton de réparation.	12
Figure I.7 : Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence entre le substrat en béton et le matériau de réparation.	14
Figure I.8: Les différents modes de rupture dans le système de réparation.	15
Figure I.9 : Configuration de l'essai de cisaillement oblique.	16
Figure I.10 : (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un Superplastifiant	19
Figure II.1 : Ciment utilisé	22
Figure II.2. Courbes granulométriques de différents types de sable.	26
Figure II.3. Essai d'équivalent de sable.	29
Figure II.4. Malaxeur de capacité de 5 litres.	31
Figure II.5. Essai d'étalement au mini cône.	31
Figure II.6 : l'essai de retrait.	32
Figure II.7. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.	33
Figure II.8 : Essai Auscultation sonique	34
Figure II.9. Dispositif de l'essai de compression.	35
Figure II.10. Essai de compression	36
Figure II.11: Forme de composite béton-mortier de l'essai de cisaillement oblique.	37
Figure II.12. Schéma du test d'arrachement.	38
Figure II.28 Éprouvette de traction par fendage.	39
Figure III.1 : Examen visuel des mortiers à l'état frais	42
Figure III.2 : Résistance à la traction par flexion des différents types de mortiers élaborés	43
Figure III.3 : Evolution de la résistance à la traction par flexion de différents mélanges en fonction de temps	44
Figure III. 4 : Résistance à la compression des différents types de mortiers élaborés.	45
Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps	46
Figure III.6 : Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion	47
Figure III.7 : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique	48
Figure III.8: module d'élasticité dynamique en fonction de la racine carré de la résistance à la compression	49

Figure III.9 : Evolution de la quantité d'eau absorbé par capillarité en fonction de temps	50
Figure III.10: Coefficient l'absorption d'eau de différents types de mortiers en fonction de temps.	51
Figure III.11 : Evolution de retrait en fonction de temps	52
Figure III.12 : Etude comparative de retrait de différents types des mortiers à 28jours.	52
Figure III.13 : Contraintes d'adhérence par cisaillement oblique des différents types de mortiers	54
Figure III.14 : Contraintes d'adhérence par arrachement à 28jours	55
Figure III .15 : Contrainte d'adhérence par fendage à 28jours.	56
Figure III.16 : Relation entre les contraintes d'adhérence par arrachement et le contrainte de traction par fendage.	56

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus courant et le plus utilisé dans le monde de la construction depuis l'Antiquité, en raison de ses propriétés physiques et mécaniques, mais ces propriétés s'estompent progressivement avec le temps en raison des conditions environnementales (les attaques chimiques, carbonatation, séismes, corrosion ...etc.).Après la Seconde Guerre mondiale, de nombreux bâtiments et structures ont perdu leurs propriétés mécaniques, de sorte que les ingénieurs et les chercheurs de l'époque ont utilisé un mortier prêt à l'emploi pour réparation. Mais aujourd'hui, la majorité des structures ont des pathologies, des fissures et sont prêtes à s'effondrer. Cela est dû à l'incompatibilité entre le mortier de réparation et le vieux béton, ce qui conduit à des résultats insatisfaisants avec un coût élevé.

Le mortier est constitué de grande quantité de sable avec un taux qui peut aller jusqu'à 40 % de la masse totale. L'utilisation intensive de ces ressources naturelles soulève des questions quant à la préservation et à la protection d'un environnement qui se dégrade. En raison de leur forte consommation. Mais le problème, c'est que la forte consommation de sable alluvionnaire cause une réduction remarquable de ce matériau duquel elle influe négativement sur l'écosystème. D'autre part, le sable de dune constitue en Algérie un gigantesque gisement, il couvre presque 60% de son Sahara et est pratiquement inexploité, de plus, l'abondance des résidus de concassage des roches calcaires. À cet effet, il est intéressant d'étudier la possibilité de la valorisation du sable de dune ainsi que le sable calcaire dans la composition du béton et mortier.

De ce contexte est née l'idée de lancer des recherches pour valoriser ces matériaux locaux (Sable de dunes et sable calcaire) pour élaborer un mortier de réparation autoplaçant durable et compatible avec un coût moindre.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre contient une recherche bibliographique sur les mortiers de réparation, propriétés, critères de choix, techniques et la description des paramètres pouvant influencer la qualité des réparations, ainsi que l'étude de la compatibilité entre mortier de réparation et construction réparée.

Le deuxième chapitre consacré à la caractérisation des matériaux utilisés, les essais d'adhérence telle qu'essai d'arrachement, essai traction par fendage et essai cisaillement oblique, ainsi que les essais de durabilité telle que la porosité et l'absorption par capillarité.

Le troisième chapitre représente l'interprétation et discussion des résultats obtenus et finalement, une conclusion générale soulignera les résultats les plus marquants de ce travail.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux différentes connaissances générales concernant les définitions des matériaux de réparation 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.

La réparation de la construction de génie civil est un projet qui devient maintenant généralement. Le béton reste un matériau performant et durable, mais la construction à la fin de la Seconde Guerre mondiale était une telle quantité d'infrastructures et les bâtiments dégradés nécessitent aujourd'hui de plus en plus d'interventions. A l'interface de la science et de l'ingénierie des matériaux, des systèmes et des technologies la reprise doit être choisie dans une perspective à court terme, mais aussi dans une perspective à long terme. Parce qu'il s'agit de s'assurer qu'il ait une nouvelle vie.

I.2 La compatibilité

La compatibilité des réparations peut être définie comme un équilibre de propriétés physiques, chimiques, électrochimiques et dimensionnelles entre le matériau de réparation et le substrat existant qui garantit que la réparation résiste à tous les contraintes anticipées induites par les changements de volume, les effets chimiques et électrochimiques au cours de temps [1].

De plus, la compatibilité dans un système de réparation consiste en la combinaison de propriétés entre le matériau de réparation et le substrat de béton existant, garantissant que le système combiné résiste aux contraintes appliquées, conserve son intégrité structurale et ses propriétés protectrices dans un environnement d'exposition donné pendant une durée de vie spécifiée. Les principaux aspects de la compatibilité incluent la stabilité dimensionnelle, les propriétés chimiques et électrochimiques et la perméabilité du matériau de réparation et du substrat en béton [2].

I.2.1 Concept de compatibilité

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support de vieux béton, il se pose alors le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité peut prendre différents aspects, tant chimique que déformation ; elle ou encore être une compatibilité exprimée en termes de perméabilité (figure. I.1). Chaque type de compatibilité est sensible à des facteurs différents [3].

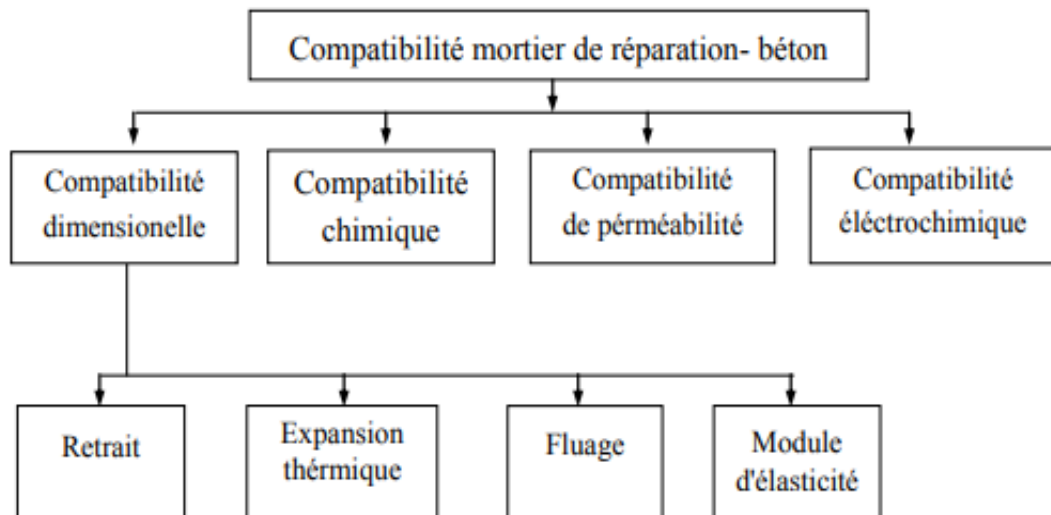


Figure I.1 : Facteurs affectant la compatibilité dimensionnelle [4].

Une bonne compatibilité entre le matériau de réparation et le support garantit une réparation avec un degré de changement limité et prévisible dans le temps, où le matériau de réparation peut résister les contraintes résultant des changements de volume et de charge pour un environnement spécifié sur une période de temps désignée sans éprouver de détresse et de détérioration tout au long de son existence durée de vie et objectif prévus. Cependant, comme il est peu probable qu'un matériau de réparation soit trouvé qui se comporte exactement de la même manière que le support lorsqu'il est soumis à des charges, à la température et les changements d'humidité, le choix d'un matériau de réparation optimal est un travail de compromis. [5] Les principaux paramètres du matériau de réparation à prendre en considération pour décider le que là utiliser pour la réhabilitation d'un ouvrage en béton sont abordés dans les points suivants :

- **Force de liaison à l'interface** : La force de liaison entre les nouveaux et les anciens matériaux est cruciale pour le succès de la réparation.
- **Exigence de durcissement** : Il est souhaitable que le matériau de réparation soit durci dès que possible afin de réduire le temps d'arrêt de la structure. Dans le climat économique actuel, rapide Les matériaux de pose sont très avantageux pour une construction et une réparation accélérées scénarios.
- **Stabilité dimensionnelle** : Des variations importantes du volume du matériau de recouvrement peuvent provoquer des fissures dans le nouveau matériau et augmenter les contraintes de cisaillement à l'interface, augmentant le risque de délaminage et de fissuration.
- **Propriétés mécaniques.** : Le matériau de réparation doit présenter des propriétés mécaniques adéquates pour supporter et transférer les charges.

- **Propriétés de durabilité.** : Les matériaux de recouvrement doivent offrir une protection contre tous les différents processus pouvant détériorer la structure tels que les produits chimiques ou l'eau pénétration, abrasion et détérioration due au gel-dégel. Le succès de la réparation et son la durée de vie finale dépend en grande partie de la performance du matériau de réparation en tant que barrière.
- **Constructibilité** : Il est recommandé d'utiliser des matériaux de réparation avec des méthodes de construction à celle du béton normal afin de réduire le potentiel d'échecs dues à des erreurs dans la phase de construction. Des propriétés telles que le comportement d'auto-consolidation permettent de placer le matériau sans avoir besoin de vibrations, et ils ont souvent une bonne adhérence au substrat sans utiliser les agents de liaison qu'ils ont avéré avantageux.
- **Coût** : Le coût du matériau de réparation a un impact important sur le choix final du matériau utilisé pour la réhabilitation, mais il ne doit pas être mis avant les caractéristiques de performance. Un mauvais choix de matériau de réparation entraînerait l'échec précoce de la réhabilitation.

I.3 Compatibilité dimensionnelle (stabilité dimensionnelle)

Lors de la sélection d'un matériau de réparation approprié, le paramètre le plus important est la compatibilité du matériau de réparation avec le béton du substrat. Selon Morgan, l'une des conditions de compatibilité les plus importantes est la compatibilité dimensionnelle, qui est définie comme la capacité de la zone réparée à supporter les variations dues au changement volumique sans perte d'adhérence et à transférer les charges appliquées[6].

I.3.1 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité est une mesure de la rigidité d'un matériau. Un matériau avec un module d'élasticité plus élevé est plus rigide qu'un matériau de module inférieur, qui est plus flexible. Le module d'élasticité est la constante de proportionnalité entre la contrainte appliquée et la déformation dans le diagramme contrainte-déformation linéaire du matériau. Il correspond à la pente de la partie droite d'un graphique de la contrainte par rapport à la déformation. Le terme élasticité fait référence au caractère réversible du changement dimensionnel [4].

Le module d'élasticité est l'un des facteurs le plus important de compatibilité dimensionnelle entre le substrat et la réparation. Si un matériau de module inférieur au substrat est sélectionné, la réparation est incapable de supporter autant de charge que le béton d'origine. Inversement, si un matériau de module plus élevé que le substrat est sélectionné, la réparation portera plus de charge par rapport au substrat. Pour cette raison, plusieurs chercheurs, recommandent généralement que le nouveau matériau ait un module d'élasticité similaire à celui du substrat en béton pour assurer une répartition uniforme des contraintes et minimiser la rupture probable du nouveau matériau. Une différence significative dans les valeurs de module d'élasticité du matériau de réparation et du béton de base peut entraîner une concentration de contraintes. Par conséquent, lors de la sélection d'un matériau de réparation, le concepteur doit s'assurer que le béton du substrat et le matériau de réparation possèdent des modules élastiques similaires [4].

I.3.2 Retrait

Le retrait correspond aux changements volumétriques des structures en béton [7]. Dans les réparations, différents changements de volume se produisent, avec le plus grand rétrécissement trouvé près de la surface. La figure I.2 montre la répartition des contraintes autour d'un nouveau matériau de réparation qui ne supporte pas sa part de charge [8].

Étant donné que la plupart des matériaux de réparation sont appliqués sur un béton de substrat plus ancien qui est négligeable retrait, les matériaux de réparation à très faible potentiel de retrait doivent être choisis pour minimiser les problèmes de compatibilité entre le matériau de réparation et le support en béton [5].

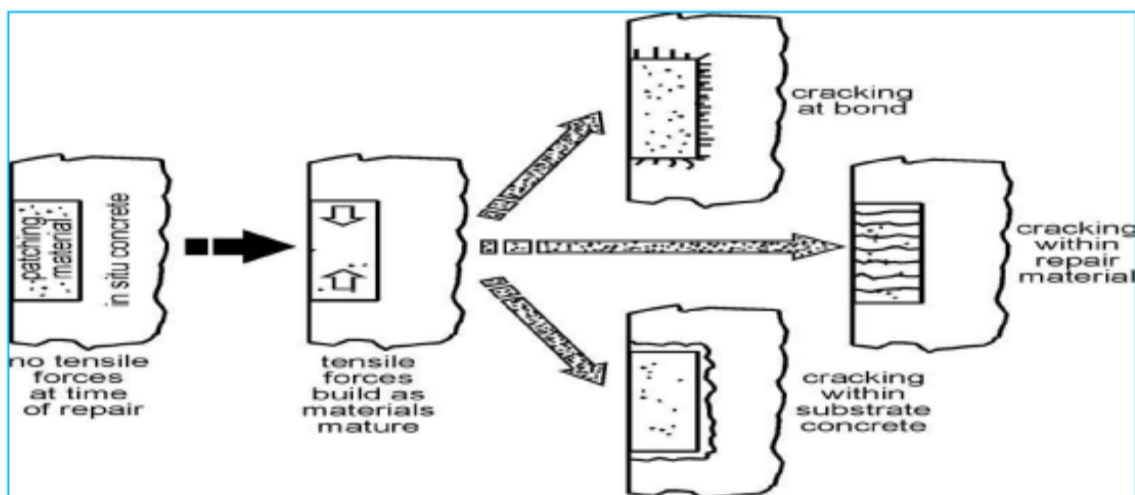


Figure I.2: Dimensional incompatibility due to shrinkage [12].

Il existe 4 types de retrait dans le béton :

I.3.2.1 Retrait plastique :

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

I.3.2.2 Retrait de séchage :

Le retrait de séchage est la réduction de volume causée principalement par la perte d'eau pendant le processus de durcissement. Le retrait de séchage est généralement l'aspect le plus critique à l'égard de la compatibilité déformationnelle d'une réparation. Le retrait de séchage est la contraction que subit le béton lorsque son contenu en eau s'évapore vers l'extérieur ($H.R \text{ béton} > H.R \text{ air}$). Lors du séchage, le déséquilibre thermodynamique engendrée, provoquent un échange de vapeur d'eau de la matrice cimentaire vers le milieu extérieur. La dessiccation du milieu va créer une variation de tensions capillaires, de tensions superficielles et des pressions de disjonction. L'addition de ces mécanismes conduit à un retrait apparent de l'ordre de 200 à 1000 $\mu\text{m/m}$. [9].

I.3.2.3 Retrait endogène :

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

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

Dans la vie d'une réparation, le phénomène initial qui se produit est le retrait endogène, conséquence de la réaction d'hydratation entre le ciment et l'eau. En raison de son apparition précoce, il joue un rôle primordial dans la formation du comportement mécanique d'une réparation au cours de ses premières étapes.

I.3.2.4 Retrait thermique :

Le retrait thermique est lié au retour à la température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition du phénomène de fissuration. Ce type de retrait s'étend de quelques dizaines heures, jusqu'à quelques semaines après la mise en œuvre. Sa durée est dépendante de la nature des éléments en béton considérés. Toutefois, dans le cas des rechargements minces où leur épaisseur est limitée à quelques centimètres, la chaleur peut se dégager vite à l'extérieur pendant que le matériau est encore déformable. L'effet du retrait thermique peut être négligeable dans ce cas [11].

I.3.3 Dilatation thermique :

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

Un écart significatif entre les coefficients de dilatation thermique du matériau de réparation et du béton d'origine engendre, sous sollicitation thermique, des contraintes internes dans la réparation, notamment à l'interface. L'intensité des contraintes dépend de la variation de température et de l'importance de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux. La nature cyclique des sollicitations thermiques et le taux de variation de température sont deux facteurs pouvant accélérer le processus de dégradation [12].

I.3.4 Fluage :

Le fluage est défini comme la déformation dans le temps causée par une charge constante. Selon divers auteurs, le matériau de réparation doit généralement posséder un très faible potentiel de fluage, sauf si le matériau de réparation est sollicité à la traction, le fluage dans ce cas peut être bénéfique, car il peut compenser ou réduire l'effet négatif du retrait dans le matériau de réparation figure (I.3) [4].

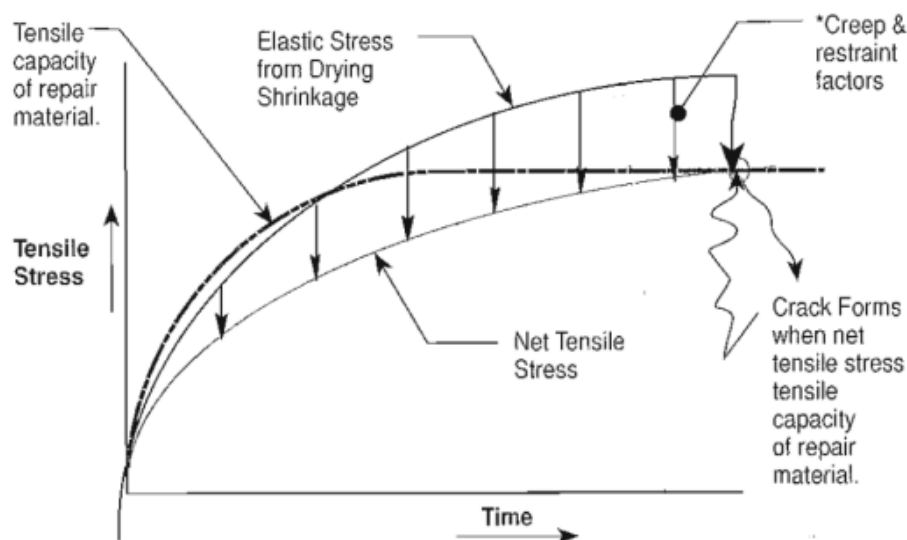


Figure I.3 : Schematic representation of the attenuation of creep-induced tensile stresses during restrained shrinkage [4].

I.4 Adhérence dans le béton

I.4.1 Définition de la force de l'adhérence :

L'un des paramètres les plus importants assurant la durabilité de la réparation du béton est l'adhérence entre le support et le mortier de réparation [13]. Une bonne adhérence est un facteur clé pour avoir un système monolithique [14]. Le terme « adhérence » décrit la connexion dans la couche limite entre deux matériaux avec une interface commune.[15].

I.4.1.1 Adhérence mortier de réparation – béton

Le but d'une réparation de béton est de restaurer la capacité de charge et la rigidité d'une structure ou d'un élément en béton. Par conséquent, l'action monolithique est l'objectif final. Une condition préalable à l'action monolithique est une liaison suffisante entre le vieux béton et le matériau de réparation. Les caractéristiques d'adhésion, ou de liaison, peuvent être perçues sous deux angles différents: premièrement, les conditions et la cinétique de l'assemblage de deux matériaux, en tenant compte des différents mécanismes de liaison; et d'autre part, la mesure quantitative de l'ampleur de l'adhérence, généralement exprimée en contrainte ou en énergie nécessaire pour séparer les deux matériaux. Pour les matériaux de réparation, la résistance de la liaison est généralement définie comme la résistance à la traction perpendiculaire au plan d'interface [4].

Pour expliquer le comportement d'une réparation, nous aimerions présenter un modèle idéalisé d'une réparation de surface en tant que système triphasé (Figure I.5). Les propriétés et les performances à long terme d'un tel système sont régies par les propriétés des trois phases: réparation, substrat et interface (zone de transition) entre elles [26].

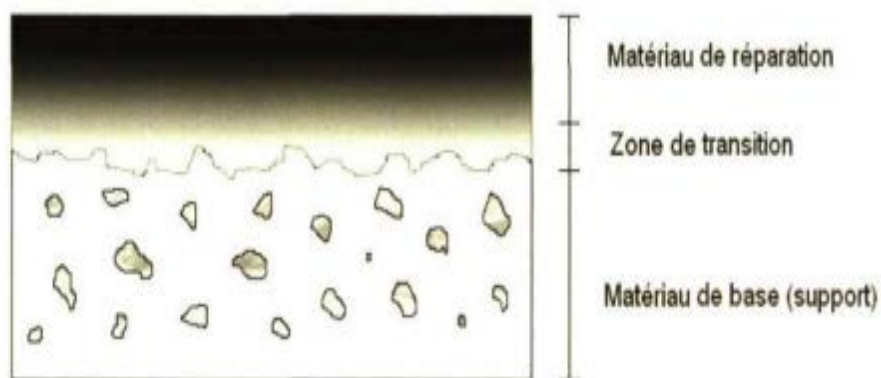


Figure I.5 : Modèle idéalisé d'un système de réparation [4].

Une mauvaise adhérence de la réparation avec le substrat de béton peut empêcher le comportement monolithique et provoquer le décollement de la réparation sous les charges mécaniques. **Espeche et Leon** [4] ont décrit deux mécanismes différents qui assurent la force de liaison entre deux matériaux cimentaires (Figure I.6): mécanisme adhésif (micro-échelle) et mécanisme cohésif (macro-échelle). Le concept d'adhérence adhésif résulte de forces chimiques agissant à l'échelle microscopique. Ces deux mécanismes (adhésif et cohésif) sont étroitement associés. Si la force d'adhérence n'est pas développée, le mécanisme cohésif de l'interface ne sera pas efficace. Certains chercheurs ont décrit l'existence de trois couches différentes pour expliquer l'adhésion entre l'ancien et le nouveau béton.

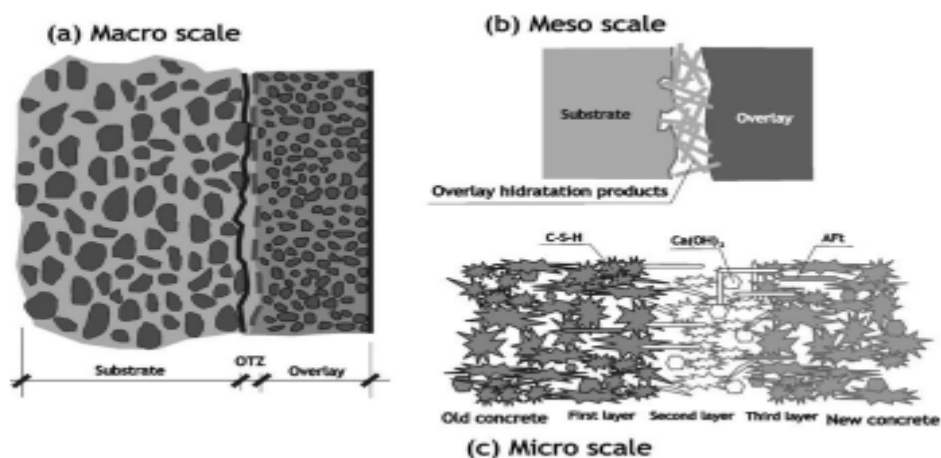


Figure I.6 : Représentation multi-échelle de l'interface entre le béton ancien et le béton de réparation [4].

I.4.2 Facteurs qui affectent la force d'adhérence

L'adhérence entre les matériaux de réparation et les substrats de béton est essentiel pour la performance à long terme et la durabilité de béton réparé. De nombreux facteurs influent sur la force d'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton de réparation tel que la résistance à la compression du vieux béton et du matériau de réparation, la surface du substrat (état d'humidité ou mouillabilité conditions de mouillage, rugosité, présence de microfissures, propreté) et la cure.

Des méthodes telles que le brossage, le sablage, le grenailage, et l'hydro-démolition sont généralement adoptées pour préparer la surface du substrat [4]

Les facteurs suivants ont le plus d'influence sur le développement de la zone de transition et la durabilité de la liaison qui en résulte :

Propriétés physiques et chimiques du substrat en béton;

Caractéristiques et état de la surface préparée;

Propriétés physiques et chimiques du matériau de réparation;

Conditions environnementales (notamment humidité et température) ;

I.4.3 Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence

L'adhérence entre le matériau de réparation et le béton du substrat est un facteur clé qui détermine la durée de vie d'une structure réparée. De nombreuses méthodes d'essai ont été proposées pour évaluer la force de liaison entre deux matériaux de béton différents, mais la plupart peuvent généralement être classées en quatre catégories de base comme montré dans la figure de ci-dessous [4]:

- (1) essai de traction directe (pull-off).
- (2) essai de cisaillement pur.
- (3) essais combiné (cisaillement oblique).
- (4) essai de traction indirecte (flexion)

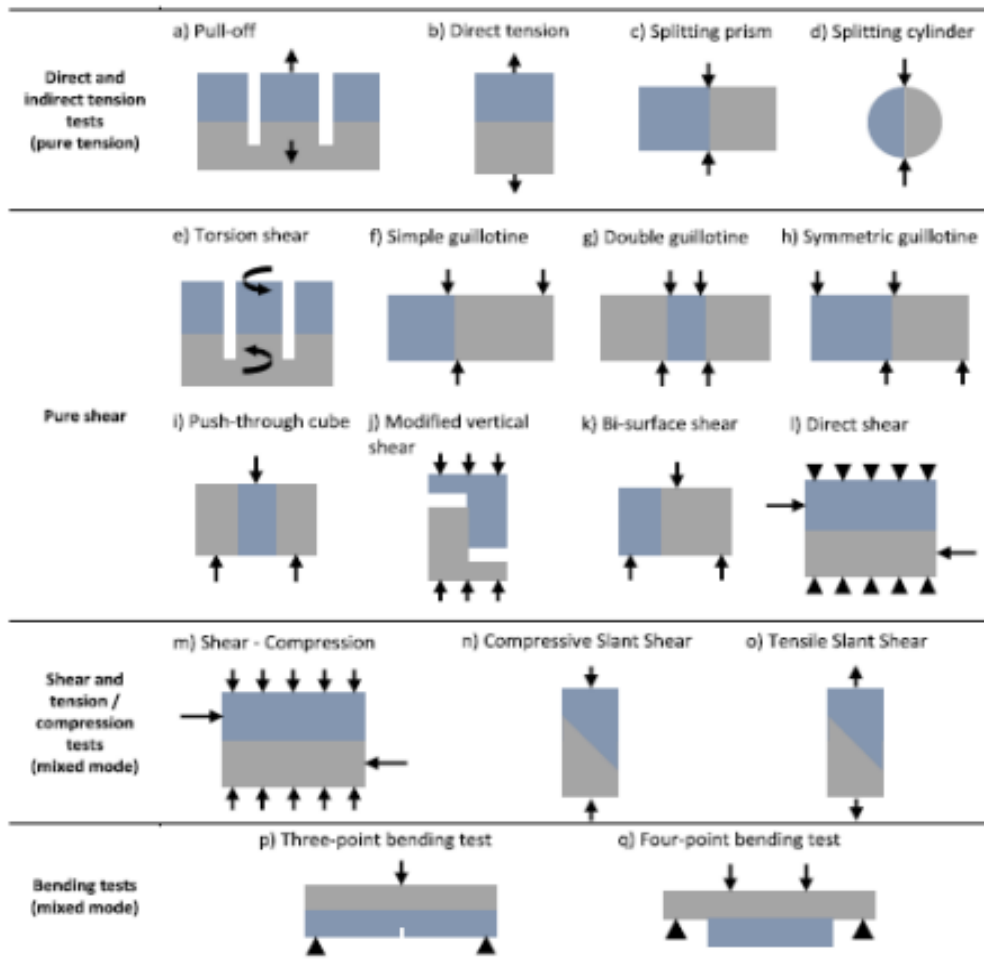


Figure I.7 : Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence entre le substrat en béton et le matériau de réparation [4].

Les deux méthodes "Pull-off" ou "Slant-shear" sont les plus courantes et largement utilisées pour évaluer l'adhérence matériau de réparation-substrat [4].

La plupart des normes et codes recommandent ces deux méthodes d'essai. Moins de problèmes et d'insuffisances, une configuration et une exécution faciles, une large gamme d'applications et la fiabilité des résultats sont les principales raisons pour lesquelles ces deux tests sont plus acceptés [4].

I.4.3.1 Essai d'arrachement (Pull-off)

En pratique la méthode couramment utilisée pour déterminer la contrainte d'adhérence de traction est l'essai pull-off, dans lequel la force de traction s'applique perpendiculairement au revêtement jusqu'à ce que la rupture se produise. Ce dispositif permet de quantifier la résistance et d'identifier le mode de rupture. La contrainte de liaison (adhérence) peut être facilement définie comme la force maximale divisée par la surface de la zone d'interface [4].

L'évaluation de la force de rupture et l'observation de la surface de rupture vont apporter des informations fondamentales sur la qualité et le comportement de la couche rapportée sur son support.

Il existe trois modes de rupture en traction possible :

A : Rupture dans le substrat (rupture cohésive) ;

B : Rupture à l'interface entre le substrat et le matériau de réparation (rupture adhésive) ;

C : Rupture dans le matériau de réparation (rupture cohésive).

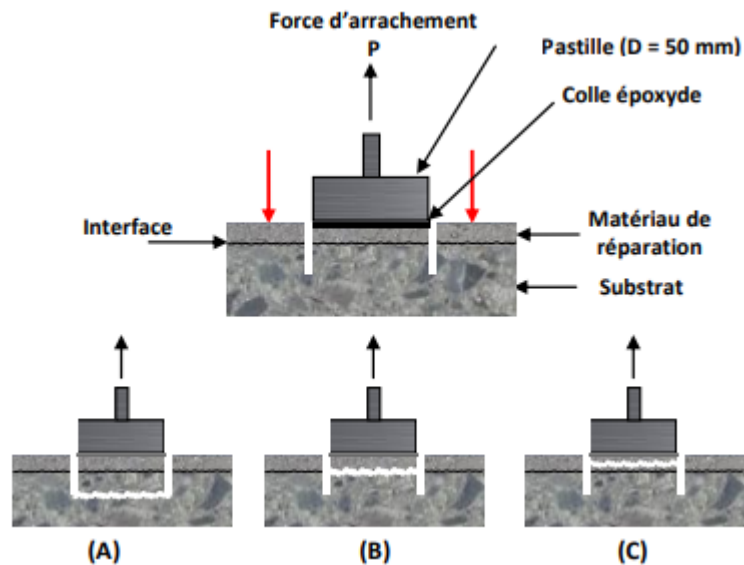


Figure I.8: Les différents modes de rupture dans le système de réparation [4].

Une rupture dans le substrat indique que la force de liaison est supérieure à la résistance à la traction du substrat et une rupture dans le revêtement indique que la force de liaison est supérieure à la résistance à la traction du matériau de réparation. Normalement, dans les travaux de réparation, une rupture dans le substrat est préférable, car elle montre que la réparation a été faite correctement. Les résultats de l'essai sont considérablement influencés par la taille des agrégats, la profondeur de carottage, l'alignement du dispositif sur la surface et le soin apporté à l'exécution du test [4].

La norme européenne 1504-3 exige une contrainte d'adhérence d'au moins 1,0 MPa et 2,0 MPa pour les réparations non structurales et structurales, respectivement. La rugosité de la surface et les conditions d'humidité du substrat ont une influence significative sur la force de liaison (adhérence). La microfissuration due à un retrait différentiel entre le substrat et le matériau de réparation affaiblit la liaison et induit une charge de rupture plus faible [4].

I.4.3.2 Essai de cisaillement oblique (Slant-shear)

L'un des types de essais d'adhérence les plus courants est le "l'essai de cisaillement oblique" dans lequel l'interface est soumise à des contraintes combinées de compression et de cisaillement (Figure I.9). Ce test a d'abord été présenté sous la forme de "Arizona SlantShear Test" et qui après que certains développements ont été standardisés, il a été inclus dans le British Standard (BS 6319: Partie 4) pour tester les matériaux de réparation [4]. ASTM C882-99 présente également la procédure de mesure la force de liaison avec la même méthode d'essai.

L'essai de cisaillement oblique permet de mesurer la force de liaison sous une combinaison des contraintes de cisaillement et de compression.

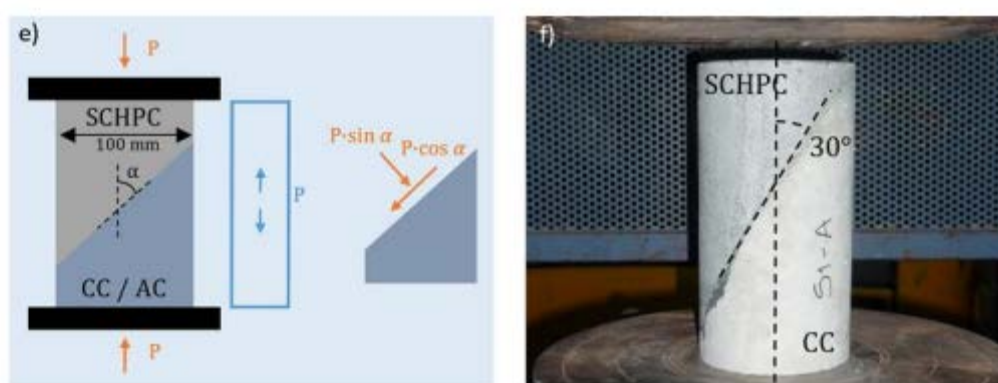


Figure I.9 : Configuration de l'essai de cisaillement oblique [4].

Cette méthode consiste à appliquer une force de compression à un échantillon composite composé de deux matériaux différents collés le long d'une interface disposée selon une certaine inclinaison par rapport à la direction de la charge appliquée [4]. Par conséquent, l'interface entre les deux matériaux est soumise à des contraintes de compression et de cisaillement pendant le chargement. Cette méthode d'essai de liaison donne des résultats cohérents pour les matériaux de réparation cimentaires et non cimentaires [4].

I.5 Les constituants d'un mortier autoplaçant

Le mortier autoplaçant se compose de ciment, de sable, d'eau, ainsi que d'adjuvants (super-plastifiant).

I.5.1 Le sable

Le sable est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables reviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière[16].

I.5.1.1 Sable alluvionnaire

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux. Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée Par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin :

$1,8 \leq MF \leq 2,2$; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisant

$2,2 \leq MF \leq 2,8$; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.

$2,8 \leq MF \leq 3,2$; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations. [17]

I.5.1.2 Sable calcaire

Le sable de calcaire, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires. Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de son taux élevé en fines qui varié de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers et bétons. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sables roulé, ce qui offre plus de résistances au béton. L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux [19].

I.5.1.3 Sable de dune

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine et très serrée. [18]

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

Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer. Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir. [17]

I.5.2 Ciment

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier. [19]

I.5.3 Eau de gâchage

Joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme **NA-442**. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. [19]

I.5.4 Super-plastifiants

La fluidité des bétons autoplaçants est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres type de béton, à savoir des polymères de type poly carboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique.

Les super- plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fillers en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau., ainsi les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

Le niveau élevé de l'ouvrabilité requis par les bétons autoplaçants tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le béton autoplaçant, était impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour les résistances à la compression souhaitées. L'arrivée des super-plastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des bétons autoplaçants. Les super-plastifiants modernes (basés sur les éthers poly carboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange béton. Ces supers plastifiants réalisent ce qui est montré dans la figure I.10, avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique. Le mode d'action des super plastifiants est extrêmement complexe.[20] Il peut être expliqué comme suit :

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les super plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité

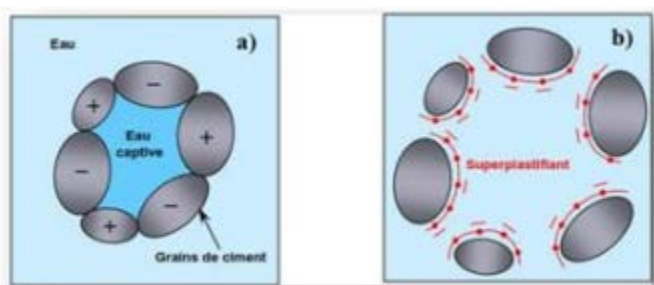


Figure I.10 : (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un Superplastifiant[20]

I.6 L'effet de type de sable sur les performances des mortiers

I.6.1 Résistance à la compression

Lakhdari.M.F et al. [21] ont rapporté que le mortier à base de mélange (60% sable dunaire, 40% sable alluvionnaire) MSDA4 présente une amélioration de 20 % de la résistance à la compression par rapport au mortier de sable dunaire MS.

Benabed.B et al. [22] ont trouvé que le mortier du sable (alluvionnaire- dunaire) présente les meilleures performances mécaniques, que celles des mortiers du sable dunaire avec superplastifiant et sans superplastifiant. On note une résistance en compression à 28 de l'ordre 37 MPa pour le mortier à sable mixte.

Une étude expérimentale a été réalisée par **Bouziati.Tet al.** [23] pour étudier l'effet d'addition de sable dunaire de différentes proportions massique (0, 10,20et 30) % au sable alluvionnaire. Les résultats trouvés montrent que pour une fraction de 10% de sable dunaire, une amélioration de la maniabilité, ainsi que de la résistance à la compression à 28 jours à été remarqué.

I.6.2 Retrait

Grassl et al. [24] mènent une étude sur l'effet de la taille et du volume des agrégats sur la microfissuration induite par le retrait. Les résultats trouvés, montrent que l'augmentation du diamètre des agrégats (à fraction de volumique égal) et fraction de volumique décroissante (à diamètre d'agrégat égal), augmente le taux de fissuration due au retrait.

Dans une étude expérimentale menée par **Zhang et al.** [25] pour clarifier l'effet de diverses caractéristiques d'agrégats sur le retrait au séchage du mortier et du béton. Les résultats trouvés montrent que les caractéristiques des agrégats fins et grossiers jouent un rôle important dans le contrôle de du retrait de séchage. Le sable calcaire et le sable de laitier de haut fourneau peuvent limiter le retrait au séchage du mortier d'environ 22% et 30%, respectivement, par rapport au cas du mortier à base du sable standard.

I.6.3 Force d'adhérence

Les résultats des essais d'adhérence d'un béton autoplaçant à haute performance trouvées par **López-Carreño et al.** [26] indiquent que la rugosité a des impacts différents sur le comportement de réparation, en fonction du type d'essais et du matériau du substrat. Dans le cas des substrats en béton ordinaire, la rugosité a un effet presque négligeable sur la résistance à la traction directe, car elle est liée à la liaison chimique. Au contraire, la rugosité joue le rôle principal dans les tests de cisaillement pur. Dans le cas des essais de cisaillement oblique, les forces de cisaillement ont prédominé sur les forces normales et la rugosité a également un rôle important.

Chapitre II

**Matériaux et méthodes
expérimentales**

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

II.1 Introduction :

L'objet de ce chapitre est d'identifier et de caractériser les matériaux utilisés dans notre étude dans une première partie. Dans la deuxième partie, toutes les méthodes et les procédures qui ont été suivies pour investiguer le sujet de recherche ont été présentées en détail. A l'état frais la caractérisation s'effectue par des essais d'étalement au mini cône, à l'état durci il est caractérisé par des essais physico-mécaniques (retrait, résistance à la compression et à la flexion, absorption d'eau par capillarité et auscultation sonore) et enfin les essais d'adhérences entre les mortiers élaborés et le béton substrat (cisaillement oblique, arrachement et de traction par fendage).

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude expérimentale est un ciment de type CEM I 42,5 R (Beskria) de l'usine de Biskra, conditionné en sacs de 50 kg (Fig. II.1).

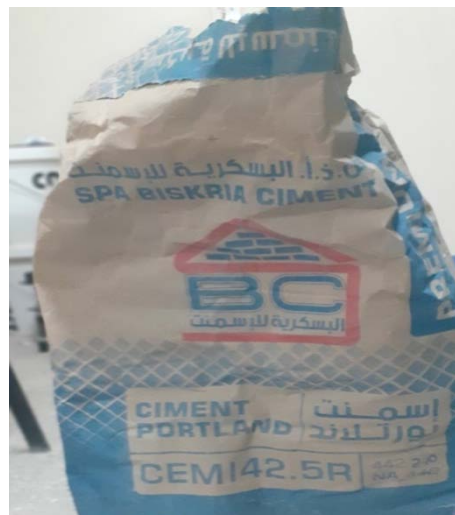


Figure II.1 : Ciment utilisé

Tableau II.1. Composition chimique et propriétés physiques de ciment [23].

Composition chimique (%)	Ciment
CaO	65.9
SiO ₂	21.9
Al ₂ O ₃	4.8
Fe ₂ O ₃	3.5
MgO	1.6
K ₂ O	0.5
SO ₃	0.48
CaCO ₃	-
Na ₂ O	-
Cl	0.1
Perte au feu	1.2

II.2.1.1 Caractéristiques physiques du ciment

- i. Finesse de ciment:** La finesse d'un ciment se caractérise par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m² / kg de poudre ou (cm² /g). Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou « perméabilité de Blaine » selon la norme **NF EN 196-6**[28].

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

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

Sp : Surface spécifique.

K : Constante de l'appareil.

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

t : Temps mesuré en seconde.

e : Porosité.

ρ : Masse volumique absolue (kg/m³).

- ii. Consistance normale** : L'essai de consistance consiste à déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante, cette consistance mesurée est appelée « consistance Vicat » selon la norme **NF EN 196- 3**[28].

- iii. **Temps de prise** : L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée, l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat. Il varie en fonction de la nature de ciment, de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et de la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise. Il est mesuré suivant la norme NF EN 196-3[28].

Le **tableau II.2** présente les caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Masse volumique apparente (kg/m^3)	Masse volumique absolue (kg/m^3)	Surface spécifique (cm^2/g)	Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
Moyenne	1400	3040	4100	25,8-26,4	170-190	230-280

II.2.1.2 Caractéristiques mécaniques du ciment

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

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

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

II.2.2 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée c'est l'eau potable (eau de robinet) du réseau publique de la ville de Laghouat.

II.2.3 Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans notre travail est un superplastifiant haut réducteur d'eau « SikaViscorete Tempo 12 », produit par « Sika El djazair » conforme à la norme EN 934-2 [29]. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,6 % à 2,5 % du poids de ciment. Ses caractéristiques sont :

Aspect / Couleur : Liquide brun clair

Densité : $1,060 \pm 0,020$

Valeur pH : $5,5 \pm 1,0$

Extrait Sec : $29,5 \pm 1,4\%$

Teneur Totale en Ions Chlorure : $\leq 0,1 \%$

Equivalent Oxyde de Sodium : $\leq 1 \%$

II.2.4 Sables :

Dans cette étude, nous avons utilisés trois types de sables :

- un sable d'alluvionnaire (SA) de granulométrie 0/5 provenant de la rivière de Oued M'zi de Laghouat
- un sable calcaire (SC) issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires dite Station d'Ouezzane située au nord de la commune de Laghouat près du pont d'Oued M'Z
- un sable de dune (SD) provenant de la région nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord) .En vue de son utilisation dans la confection des mortiers et bétons, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire tels que l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable, l'absorption et les masses volumiques.

II.2.3.1 Caractéristiques physiques

i. Analyse granulométrique NF EN 933-1[30] :

L'analyse granulométrique consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres. Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Elle s'applique à tous les granulats de dimension supérieure ou égale à 80 mm Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

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

Tableau II.4. Analyse granulométrique des sables.

SD		SA		SC	
Tamis(mm)	tamisât %	tamis(mm)	tamisât%	tamis(mm)	tamisât%
4	100.00	4	98.90	4	100.00
2	100.00	2	94.87	2	82.07
1	100.00	1	87.40	1	54.90
0.5	99.20	0.5	65.20	0.5	36.77
0.25	15.03	0.25	22.77	0.25	26.03
0.125	3.03	0.125	6.10	0.125	1.30
0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13

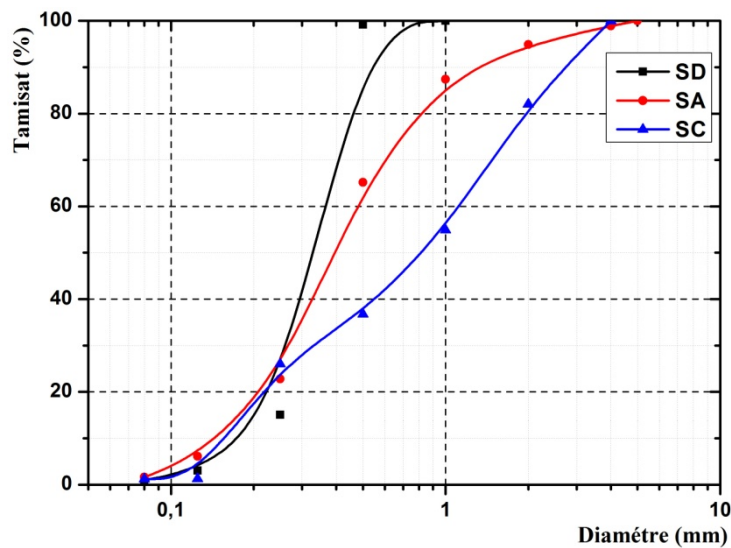


Figure II.2. Courbes granulométriques de différents types de sable.

ii. Module de finesse NF EN 933-1[30]

Le module de finesse d'un sable est défini comme étant le centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : (0.125 – 0.25 – 0.5 – 1 – 2 – 4)mm

$$M_F = \frac{\Sigma \text{ des refus cumulés en \% des tamis (0.125; 0.25; 0.5; 1; 2; 4)}}{100}$$

M_F : module de finesse

Tableau II.5. Modules de finesse des sables

Type de sable	SD	SC	SA
Module de finesse	1.8	2.98	2.25

Tableau II.6. Classement des sables.

Qualité de sable	Module de finesse
Sable grossier	$2.8 < Mf < 3.2$
Sable préférentiel	$2.2 < Mf < 2.8$
Sable fin	$Mf < 2.2$

D'après les courbes d'analyse granulométrique et le tableau II.4 on peut conclure que :

- Le sable alluvionnaire est un sable préférentiel.
- Le sable de dune présente une granulométrie serrée et uniforme. Il est constitué essentiellement de grains fins.
- Le sable calcaire est un sable grossier de granulométrie étalée.

iii. Masses volumiques

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

- **Masse volumique absolue (Méthode du pycnomètre) NF P 94-054 [31]**

Les étapes d'essai sont comme suit :

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

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_1}{M_0 + M_1 + M_2} \rho_e$$

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (kg/m^3).

M_0 : Volume d'eau (kg).

M_1 : Masse du pycnomètre + sable

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

Tableau II.7. Masses volumiques absolue.

Type de sable	SA	SC	SD
$\rho_{\text{abs}} (\text{kg/m}^3)$	2658,03	2716 ,7	2715 ,9

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

- **Masse volumique apparente EN 1097-3 [32] :**

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (tous vides inclus). Elle est donnée selon la norme par la formule suivante :

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

ρ_{app} : Masse volumique apparente (kg/m³)

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

M_2 : Masse du récipient vide (kg).

V_{ap} : Volume du récipient égale à 1 litre.

Tableau II.8. Masses volumiques apparentes.

Type de sable	SA	SC	SD
ρ_{app} (kg/m ³)	1543	1612	1518

iv. **Compacité**

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

$$c_p = \frac{Y_{app}}{Y_{abs}} * 100$$

C_p : Compacité (%).

ρ_{app} : Masse volumique apparente (kg/m³) .

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (kg/m³)

Tableau II .9 : Compacité des sables

Type de sable	SA	SC	SD
C_p (%)	58.05	59.33	55.89

v. **Absorption d'eau EN 1097-6 [33] :**

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme:

Tableau II .10 : l'absorption des sables

Type de sable	SA	SC	SD
Absorption (%)	0,45	3,15	0,40

vi. **Equivalent de sable NF P 18-540[34]**

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du flocculat et de la partie sédimentée. Ces hauteurs sont déterminées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins. L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés).

Cet essai est défini selon la norme Calculer « ES » en remplaçant H_1 et H_2 dans la formule suivante :

$$ES_V = \frac{H_2}{H_1} \times 100$$

$$ES_P = \frac{H'_2}{H_1} \times 100$$



ES_V



ES_P

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

ES_V : Equivalent de sable visuel (%).

ES_P : Equivalent de sable au piston (%).

H_2 Ou H'_2 : Hauteur des grains solides sableux.

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

Tableau II.11 : équivalent des sables

Type de sable	SA	SD	SC
ES _v (%)	83.90	87.71	81.03
ES _p (%)	80.45	86.95	79.83

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

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

D'après les résultats trouvés dans les tableaux II.11 et II.12, on distingue que :

- le sable dunaire est un sable très propre
- le sable d'alluvionnaire et le sable calcaire sont des sables propres.

II.3 Méthodes expérimentales

Les mortiers ont été confectionnés conformément à la norme ASTM C 305[35], avec un malaxeur de 5 litres de capacité (figure II.4)

II.3.1 Procédure de malaxage

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

Le début du malaxage se fait par un malaxage des constituants sec (ciment + sables) pendant 60 secondes tout en malaxant à une vitesse définie comme une vitesse lente pour bien homogénéiser

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

le mélange, ensuite 70% de l'eau de gâchage est ajoutée pendant 30 secondes. Après une minute et 30s, le super plastifiant et l'eau restante mélangés sont introduit régulièrement. Boukendakdji O. [36] a apporté que l'efficacité du SP est autant plus grande lorsqu'il est rajouté avec 30% d'eau. Le malaxage continu encore 90 seconds à grande vitesse, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules, le mélange doit reposer 90 secondes puis une autre 90 secondes à vitesse rapide. Ce qui fait en totale 6 minutes et 30 secondes de malaxage.



Figure II.4. Malaxeur de capacité de 5 litres.

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

II.3.2.1 Étalement au mini cône

Les caractéristiques à l'état frais du mortier après malaxage ont été évaluées par un test d'ouvrabilité. On utilise un mini cône de dimensions ($D=100\text{ mm}$, $d=70\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$) pour déterminer l'étalement de mortier autoplaçant comme le montre la figure ci-dessous.



Figure II.5. Essai d'étalement au mini cône.

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

II.3.3.1 Confection et cure des éprouvettes

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

Immédiatement après confection, les mortiers ont été coulés dans des moules prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Les moules contenant l'échantillon a été emballé dans un film plastique et stocké au laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été minutieusement démoulés et stockés jusqu'à la fin de la période de l'essai dans l'environnement suivant:

- Test de retrait à température $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et humidité relative $(60 \pm 10) \%$.
- Pour les autres essais (flexion et compression, module d'élasticité, absorption d'eau) dans la chambre de conservation à $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et humidité relative $(90 \pm 5) \%$.

II.3.3.2 Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés

i. Variations dimensionnelles (retrait) EN 12617-4[37]

L'essai de retrait est réalisé sur des éprouvettes prismatiques $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ selon la norme. Le retrait est mesuré à l'aide d'un réfractomètre avec un comparateur numérique 10^{-3} . Après démoulage, initialiser le comparateur à la valeur zéro à l'aide d'une tige étalon et placer l'échantillon avec la molette à l'extrémité en position verticale sur le réfractomètre pour déterminer la valeur L_0 . Les mesures sont ensuite enregistrées au fil du temps. Le changement de longueur doit être calculé par rapport à la première lecture (L_0) après 24 heures. La contrainte de déplacement est exprimée comme la variation de longueur (ΔL) sur la longueur entre repères (L), exprimée en mm/m avec une précision de 0,001 mm/m. (Figure II.6)



Figure II.6 : l'essai de retrait.

Conduite de l'essai

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

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

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

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

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

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

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et c'est le retrait. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif alors c'est le gonflement.

ii. Absorption d'eau par capillarité EN 1015-18[38]

L'essai d'absorption d'eau capillaire est utilisé pour caractériser la capacité des mortiers à absorber et à imprégner l'eau par capillarité. Dans cette étude, les essais ont été réalisés selon la norme sur des échantillons prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, préalablement séchés en étuve à environ 80°C jusqu'à poids constant. Ensuite, placez-les dans un plat de manière à ce que leur dessous soit en contact avec de l'eau jusqu'à 5 mm. Le joint latéral est scotché pour obtenir un écoulement unidirectionnel. Les poids des échantillons sont mesurés à différents moments : 0 ; 15 ; 30 ; 60 ; 120 ; 240 ; 360 min. La seule précaution est d'utiliser un mouchoir pour enlever tout film d'eau restant sur le dessous de l'échantillon avant chaque pesée. Des tests d'absorption d'eau capillaire ont été effectués après 28 jours de temps de durcissement.



Figure II.7. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

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

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

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

M : Quantité d'eau absorbé (g).

S : Surface d'éprouvette qui est en contact avec l'eau (16 cm^2).

t : Durée d'absorption (min).

iii. Auscultation sonore BS EN 12504-4 [39] :

L'essai non destructif par ultrasons est une technique couramment utilisée pour évaluer la qualité et le module d'élasticité dynamique du béton ou du mortier conformément à la norme. La méthode est basée sur des mesures de formes d'onde de vitesse de propagation qui sont liées à des propriétés mécaniques, plus directement à des modules élastiques dynamiques.

Le module d'élasticité dynamique E_d peut être déterminé en fonction de la vitesse de propagation des ondes à partir de :

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

Avec :

E_d : Module d'élasticité dynamique (GPa).

ρ : Masse volumique (kg/m^3).

ν : Coefficient de poisson.

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



Figure II.8 : Essai Auscultation sonore

iv. Résistances mécaniques :

Les essais mécaniques sont effectués pour caractériser les mortiers à différents âges 7, 28, 90 jours :

- ❖ Résistance à la traction par flexion sur trois éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³.
- ❖ Résistance à la compression sur six demi prismes issues des essais de traction par flexion.

a. Résistance à la traction par flexion NFEN 196-1[40]

L'essai est réalisé selon la norme par un dispositif de flexion trois points. La résistance à la rupture en traction par flexion est déterminée à partir des essais destructifs de flexion trois points effectués sur trois éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³. La machine utilisée est une presse hydraulique de charge maximale 100 KN. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite les résultats. La vitesse de chargement a été réglée à 50N/s jusqu'à la rupture. La charge à la rupture F_f est lue sur le cadran de la presse et la résistance à la traction par flexion est calculée par la relation suivante :

$$R_f = \frac{1,5F_fL}{b^3}$$

Avec :

R_f est la résistance à la flexion, en MPa;

b est le côté de la section droite du prisme en mm ;

F_f est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en Newtons; L est la distance entre les appuis, en millimètres.

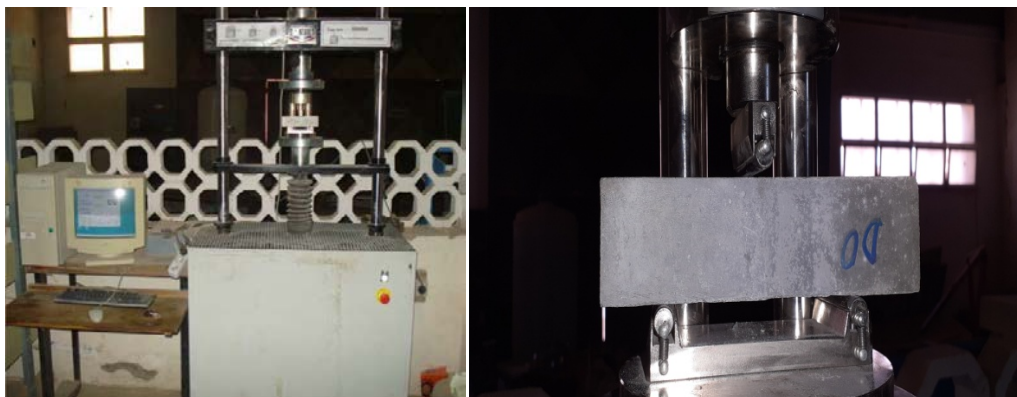


Figure II.9. Dispositif de l'essai de compression.

b. Résistance à la compression :

La résistance à la rupture en compression est déterminée à partir des essais de compression uniaxiale effectués sur six demi-prismes issus des essais précédents vitesse de chargement a été réglée à 2400 N/s jusqu'à la rupture.

La section de l'éprouvette étant introduite, l'appareil affiche automatiquement la charge de rupture F_c (N).

La résistance à la compression est calculée par relation :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Avec :

R_c est la résistance à la compression, en MPa;

F_c est la charge maximale à la rupture, en N;

1600 est la surface des plaques (40 mm × 40 mm), en mm².



Figure II.10. Essai de compression

II.3.4 Les essais d'adhérences

II.3.4.1 Essai de cisaillement oblique (Slant-shear) ASTM C882[41]

L'essai de cisaillement oblique ou cisaillement avec compression « Slant-shear » est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour évaluer la contrainte d'adhérence entre les mortiers de réparation et l'ancien béton (substrat) selon la norme ASTM C882. Dans cet essai, le matériau de réparation est collé à un échantillon de béton de substrat sur un plan elliptique incliné d'un angle de 30° par rapport à l'axe de chargement pour former un cylindre composite de 75 x 150 mm comme le montre la figure II.11



Figure II.11: Forme de composite béton-mortier de l'essai de cisaillement oblique.

La contrainte d'adhérence par cisaillement oblique est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_{aco} = \frac{4F_{rc}}{\pi D^2} \sin 30$$

où;

σ_{aco} : Contrainte d'adhérence par cisaillement oblique (MPa) ;

F_{rc} : Force de rupture (kN) ;

D : Diamètre du cylindre (mm).

II.3.4.2 Essai d'arrachement (Pull-off) EN 1542 [42]

Dans le domaine de la réparation, l'essai d'adhérence-traction (pull-off test) est le plus largement répandu. L'essai pull-off comme décrit dans la norme, permet de déterminer la contrainte d'adhérence en traction des réparations, et d'identifier le mode de rupture. L'évaluation de la force de rupture et l'observation de la surface de rupture vont apporter des informations fondamentales sur la qualité et le comportement de la couche rapportée sur son support. Les tests

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

d'arrachement ont été effectués à l'aide d'un équipement d'arrachement, la charge a été appliquée à une vitesse de 0,05MPa/s .

La force de liaison à l'arrachement (σ_p) a été calculée en divisant la force de traction (arrachement) à la rupture (F) par la force de la surface de rupture (A), comme indiqué dans l'équation :

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A}$$

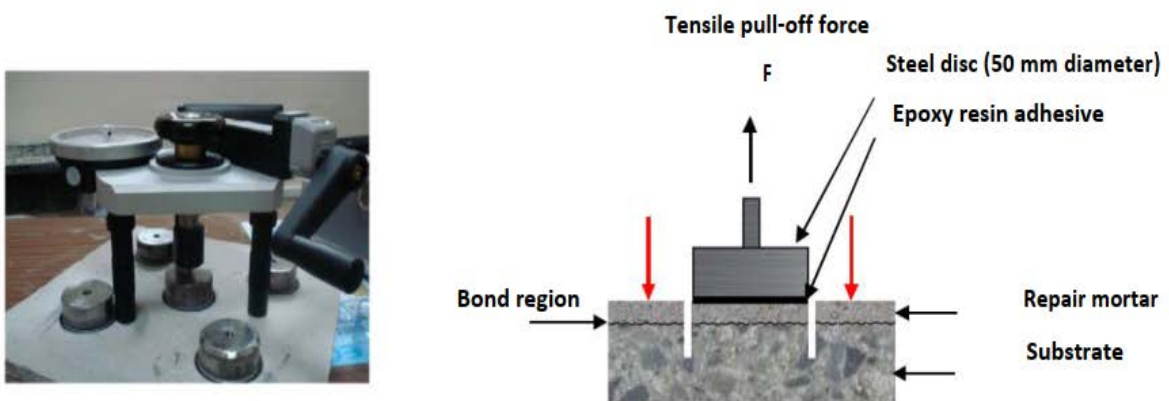


Figure II.12. Schéma du test d'arrachement.

II.3.4.3 Traction par fendage EN 12390-6 [43]

L'essai de traction par fendage est réalisé sur les cubes $10 \times 10 \times 10$ cm³ selon la norme 12390-6 pour déterminer la contrainte d'adhérence entre le demi cube ($5 \times 10 \times 10$) cm³ en mortier de réparation et le deuxième demi cube ($5 \times 10 \times 10$) cm³ de béton substrat, comme montre la figure II.28. Le composite (mortier de réparation+béton substrat) est soumis à une force de compression à l'interface mortier-béton avec une vitesse de chargement égale à 0,05 MPa/s. La résistance de traction par fendage σ_{tf} est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_{tf} = \frac{2F_t}{A\pi}$$

où :

σ_{tf} est la résistance à la traction par fendage (MPa)

F_t est la force appliquée (N).

A est l'aire de surface de la section droite (bx π) mm².

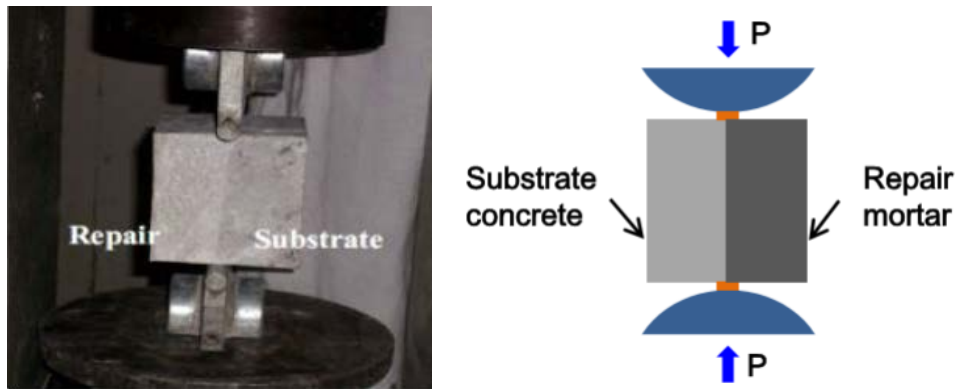


Figure II.28 : Essai de traction par fendage.[19]

Chapitre III

Résultats et interprétation

Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir de différents tests de l'influence des paramètres de formulation (proportions des : sable dunaire, sable calcaire), et l'interprétation de ceux-ci. Toutes les méthodes d'essais d'évaluation de la compatibilité dimensionnelle des différents mortiers ont été analysées concernant le retrait total et le module d'élasticité. Les propriétés des mortiers de réparation à l'état durci ont été également analysées pour les résistances à la compression, à la flexion, l'absorption d'eau capillaire et la porosité totale. Une présentation des résultats des tests de la force de liaison entre les mortiers de réparation et le béton de substrat déterminée par les tests d'arrachement, de cisaillement oblique et de traction par fendage est donnée. Dans ce cadre 12 mélanges ont été réalisés comme le montre tableau III.1

III.2 Formulation d'un mortier de réparation autoplaçant à l'état frais

Le but de la formulation du mortier autoplaçant est d'optimiser le dosage en superplastifiant en utilisant la méthode japonaise développée par **Okamura** à l'université de Kochi. Il s'agit de maintenir les rapports V_s/V_m et E/C constants ($V_s/V_m = 0,50$ et $E/C = 0,40$) et de modifier le pourcentage de superplastifiant afin d'atteindre un étalement de 28 ± 2 cm. Un programme Excel a été utilisé pour calculer les quantités des composants du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant).

Le **tableau III.1** récapitule de la composition des différents mélanges de MRAP/L

N°	Désignation	SD (%)	SC (%)	SA (%)	SD (g)	SC (g)	SA (g)	Ciment (g)	SP (%)	Eau (g)
1	MD0	0	100	0	0,0	1343,9	0	698,22	0,5 à 1,25	305,0
2	MD10	10	90	0	134,4	1209,5	0			301,3
3	MD20	20	80	0	268,9	1075,1	0			297,7
4	MD30	30	70	0	403,3	940,7	0			294,1
5	MD40	40	60	0	537,8	806,4	0			290,5
6	MD50	50	50	0	672,2	672,0	0			286,8
7	MD60	60	40	0	806,7	537,6	0			283,2
8	MD70	70	30	0	941,1	403,2	0			279,6
9	MD80	80	20	0	1075,5	268,8	0			275,9
10	MD90	90	10	0	1210,0	134,4	0			272,3
11	MD100	100	0	0	1344,4	0,0	0			268,7
12	MA	0	0	100	0	0	1317,7			267,9

Les résultats des tests de diffusion rhéologique montrent que toutes les formulations sont liquides et homogènes et ne montrent aucun signe de ressuage, sauf pour la formulation MD80, qui

montre un léger ressuage de l'ordre de 1 cm qui entoure la galette. Alors que, pour les mortiers MD90 et MD100, un important ressuage a été observé.

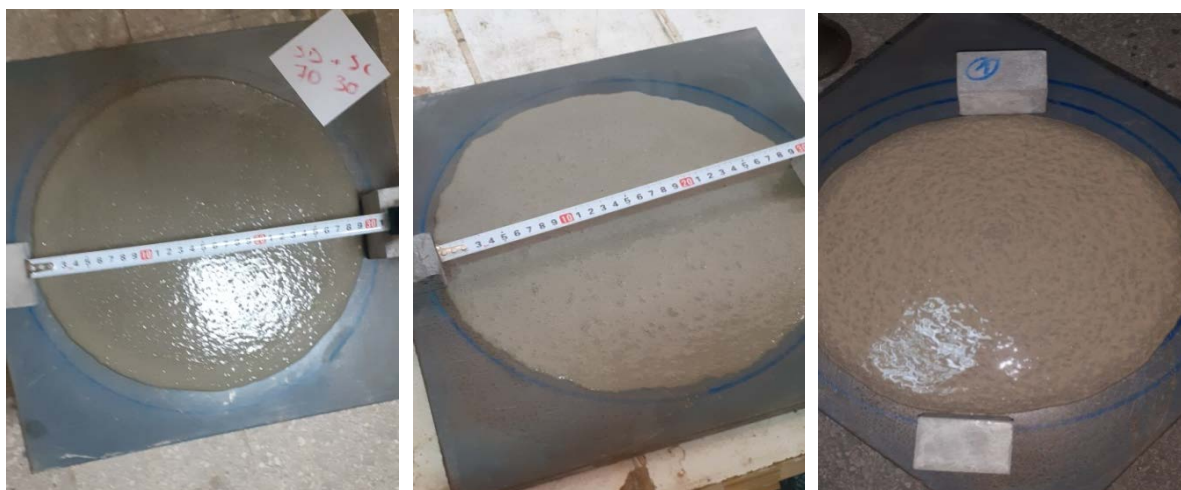


Figure III.1 : Examen visuel des mortiers à l'état frais

III.3 Effet de mélange de sable sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers:

III.3.1 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques à 7,28 et 90 jours en flexion trois points des mortiers obtenus sur trois éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ et en compression obtenues sur six demi prismes issues des essais précédents sont présentées ci-dessous :

III.3.1.1 Résistance à la traction par flexion

L'histogramme illustré dans la figure III.2 représente la variation de la résistance à la traction par flexion des différents mélanges de mortier à base de différents pourcentages de sable de dune et de sable de calcaire et du mortier témoin à base de sable alluvionnaire à 7,28 et 90 jours. La résistance à la flexion varie entre 5,09 à 6,1MPa à 7 jours ; 5,76 à 7,11 MPa à 28 jours et 6,89 à 9,04 MPa à 90 jours. Les meilleures résistances qui ont été enregistrées à 7, 28 et 90 jours sont pour les mortiers MD70, MD50 et MD30 respectivement. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues avec les mélanges, MD0 et MD100 à 7, 28 et 90 jours respectivement. On remarque que le mélange MD30 présente une valeur de résistance similaire à celle du mortier à base de sable alluvionnaire à 90 jours. Cependant, la résistance à la traction par flexion des autres mélanges est plus faible par rapport au mélange MA. Cette performance peut être expliquée par l'effet physique des particules de calcaire sur le développement de la résistance des mortiers de ciment. De plus, l'activité chimique des fillers de calcaire du sable de concassage peut accélérer

l'hydratation du ciment. Cependant, une augmentation excessive du pourcentage de sable calcaire peut entraîner une diminution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en raison d'une mauvaise distribution granulométrique.

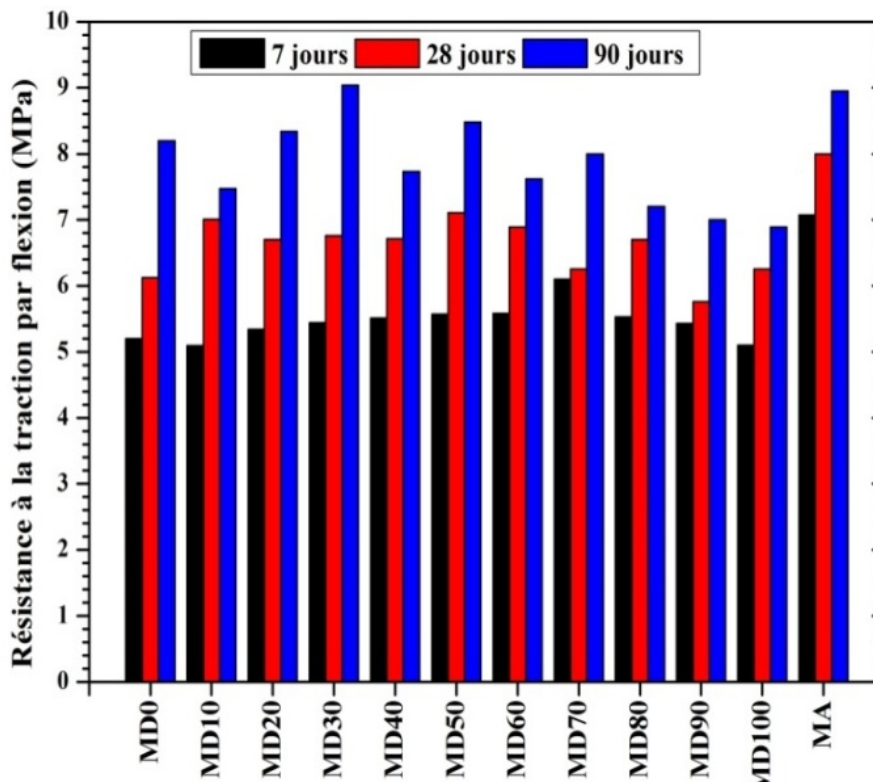


Figure III.2 : Résistance à la traction par flexion des différents types de mortiers élaborés

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés en fonction de l'âge et du pourcentage de sable de calcaire substitué dans le sable des dunes est représentée par la figure III.3. A 7 jours, le développement de la résistance à la traction est plus rapide pour tous les mortiers. Cette augmentation par rapport à la résistance à 28 jours, est variée entre 78,34% et 95%. Cette augmentation rapide à jeune âge peut être due au type de ciment utilisée dans cette étude qui est un ciment CEMI 42.5/R. En général, au delà de 28 jours une légère augmentation a été remarquée à 90 jours.

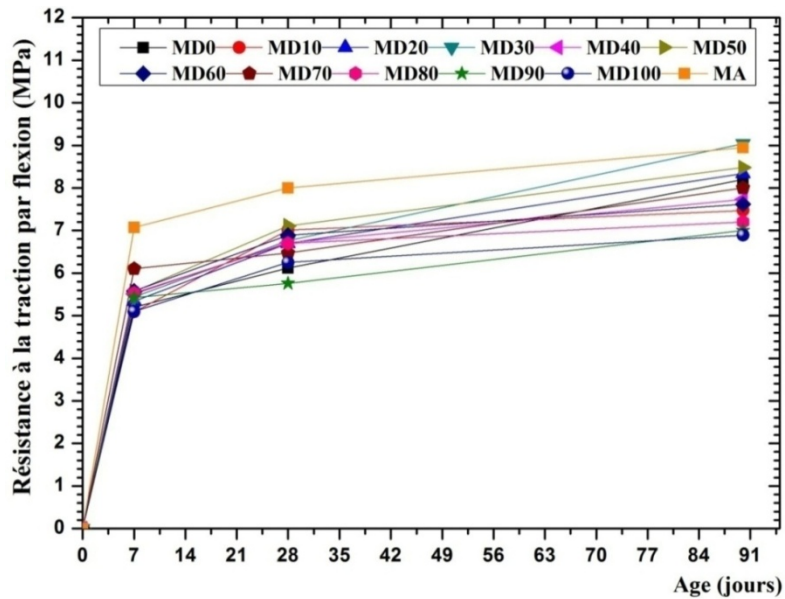


Figure III.3 : Evolution de la résistance à la traction par flexion de différents mélanges en fonction de temps

BEDRINA et al. [23] montre que l'amélioration de la résistance mécanique avec l'ajout de sable calcaire par substitution est claire et nette.

III.3.1.2 La résistance à la compression

La résistance à la compression est l'un des propriétés principales qui contrôle la qualité du mortier à l'état durci. La figure III.4 montre la variation de la résistance à la compression des différents mélanges de mortier à base de différents pourcentages de sable de dune et de sable calcaire ainsi que du mortier témoin à base de sable alluvionnaire à 7,28 et 90 jours.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons une augmentation de la résistance à la compression de 0,36 % à 15,4 % à 7 jours par rapport au mortier MA. Il est à noter que le mortier témoin MA est celui qui présente la résistance à la compression la plus faible par rapport aux mortiers à base de sable binaire. On peut noter aussi que le mortier MD80 (20% SC+80% SD) présente une meilleure résistance à la compression par rapport aux autres mélanges de l'ordre de 62 MPa. À l'âge de 28 jours, comme montre la figure III.4, tous les mélanges présentent une résistance supérieure à celle du mortier MA, avec une résistance maximale de 87,70 notée pour le mortier MD70. De plus, quel que soit le mélange de mortier, la résistance à la compression mesurée est supérieure à la valeur minimale de 45 MPa, requise par la norme EN1504-3 pour une réparation structurelle de classe R4. À 90 jours, la tendance de comparaison pratiquement reste la même où on a remarqué que les mortiers MD70 et MD80 présentent les meilleures résistances de l'ordre de 91 MPa. MAZA .M [44] montre que l'utilisation du sable de

carrière (sable concassé) améliore la résistance en compression du béton. Selon cet auteur, la substitution de sable naturelle par de 50% de sable concassé permet d'obtenir une amélioration appréciable de la résistance en compression du béton.

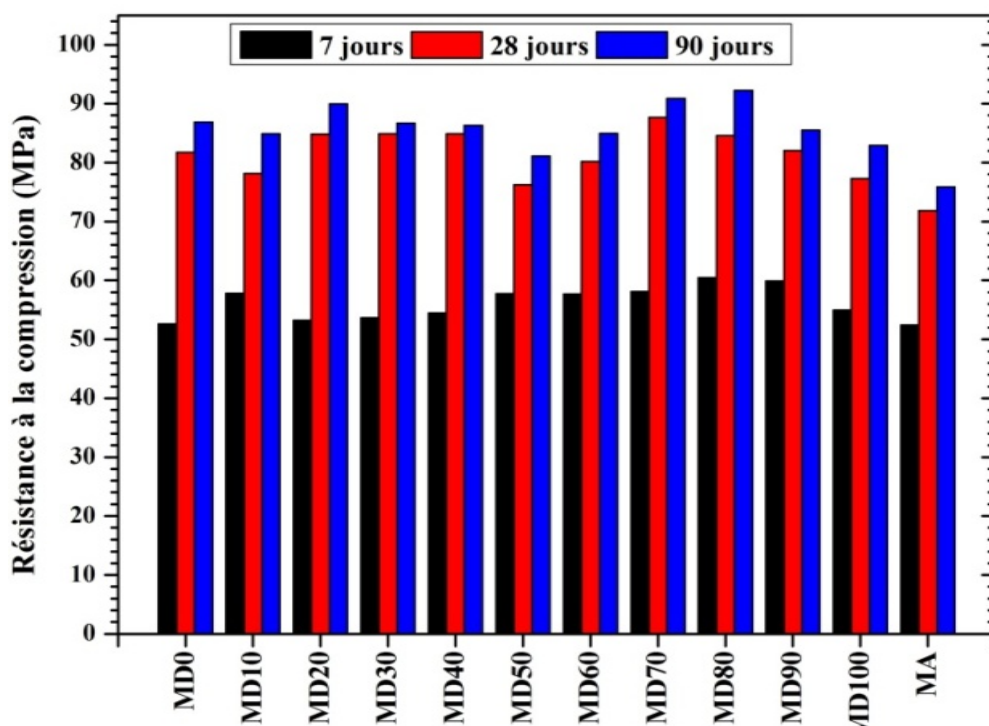


Figure III. 4 : Résistance à la compression des différents types de mortiers élaborés.

L'évolution de résistance à la compression en fonction du temps de tous les mélanges est illustrée sur la figure III.5.

Au jeune âge, le développement de la résistance à la compression est plus rapide pour tous les mortiers. Cette augmentation par rapport à la résistance à 28 jours, est variée entre 62,75% et 75,76%.

En général, au-delà de 28 jours la résistance à la compression de tous les mortiers élaborés augmente d'une manière très faible.

On observe que le mélange qui présente la résistance à la compression maximale diffère de celui correspondant à la résistance à la traction par flexion. Cela pourrait être attribué à la différence de mécanisme d'essai, car le mécanisme de compression tient davantage compte de la dureté des matériaux et de la répartition des contraintes sur l'ensemble de la matrice, tandis que pour le mécanisme de flexion, la résistance à la rupture des matériaux dépend de la résistance à la traction, de la liaison des grains avec la matrice, et de la morphologie des granulats qui sont d'une importance capitale pour améliorer le comportement à la flexion du mortier. Le sable calcaire a davantage une forme anguleuse, ce qui rend la propagation de la fissure dans le mortier

plus difficile. En fait, la fissure se propage en suivant les points faibles, tels que les zones d'interfaces pâte de ciment-granulats, et puisque les granulats calcaires présentent une bonne angularité qui aboutit à un bon enchevêtrement de la structure granulaire.

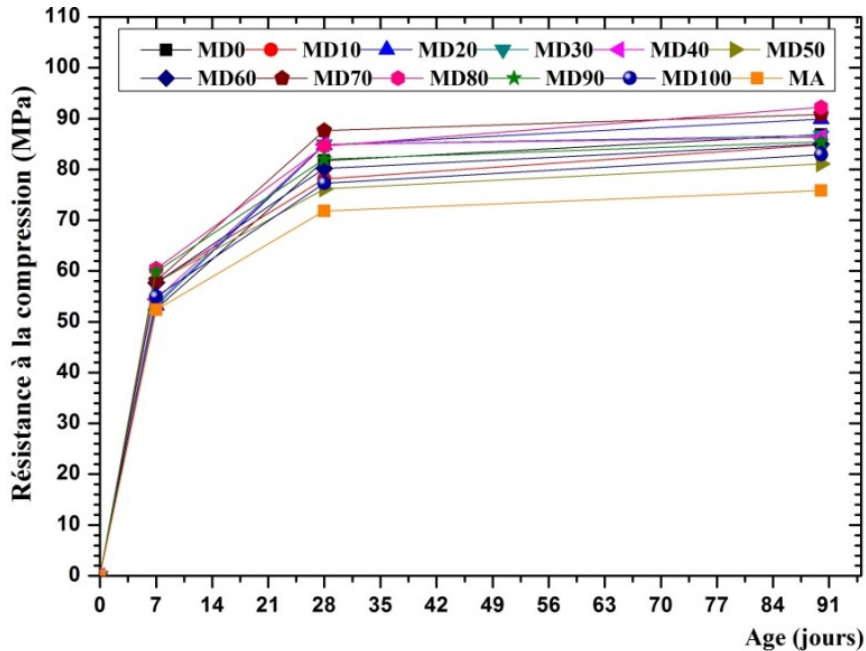


Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps

III.3.2 Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion

La figure III.6 présente la courbe de corrélation établie entre la résistance à la traction par flexion et la résistance correspondantes. Nous constatons d'après cette figure que la résistance à la traction par flexion est liée à la résistance en compression selon une loi linéaire comme le montre l'équation III.1, avec un bon coefficient de coloration R^2 qui est égal à 0,837

$$f_t = 1,74 + 0,065 f_c \dots \dots \dots (III.1)$$

Nous remarquons aussi que cette relation est presque similaire à celle donnée par le règlement BAEL pour les bétons ordinaires, avec une différence de constante de l'équation qui est de 0,6 dans l'équation donnée par le BAEL.

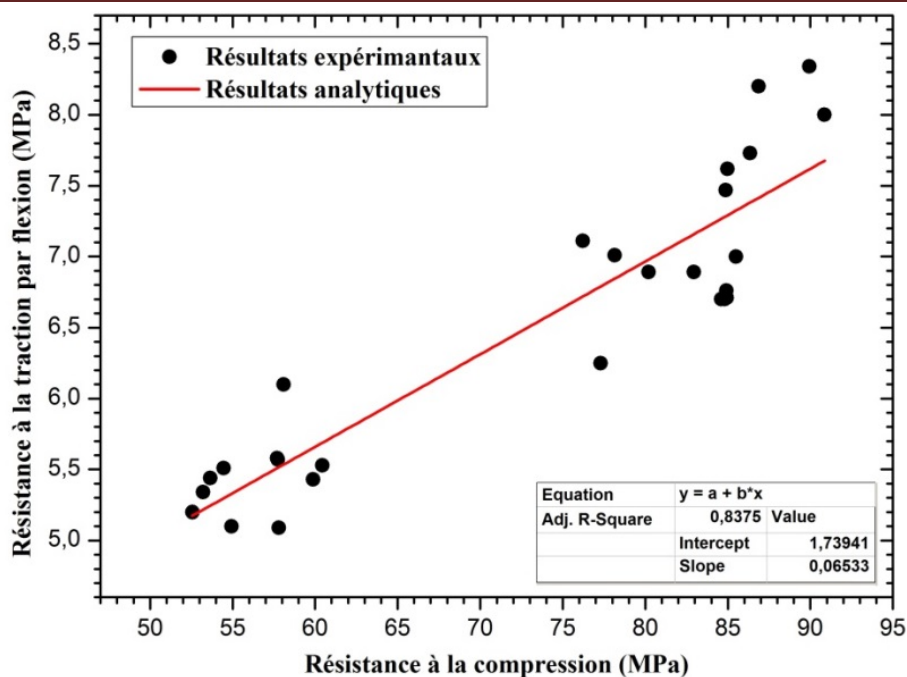


Figure III.6 : Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion

III.3.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour la prédiction des relations entre la vitesse de l'impulsion et les propriétés physico-mécaniques, telles que le module d'élasticité, la résistance à la compression, la densité, la porosité et la perméabilité. Ils s'intéressent également à la corrélation entre les vitesses d'impulsion et les caractéristiques du ciment, telles que le rapport eau / ciment, la granulométrie, le processus d'hydratation et les effets de la cure. Le module d'élasticité dynamique (E_d) est l'un des facteurs essentiels pour évaluer la qualité et la performance structurelle du béton. Plusieurs relations entre la vitesse d'auscultation sonique et la résistance à la compression du béton ont été proposées par différents chercheurs. [4]

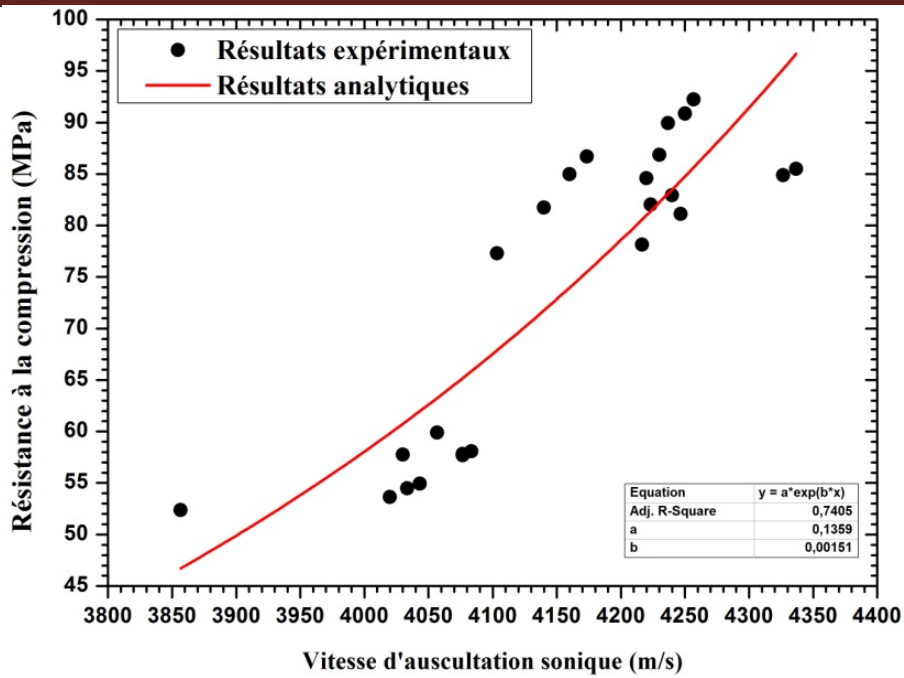


Figure III.7 : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse d’auscultation sonore

La figure III.7 illustre la relation entre la résistance à la compression et la valeur la vitesse d’auscultation sonore des différents mélanges. L’expression proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l’équation (III.2) avec un coefficient de corrélation de 0,872. L’analyse de régression montre une bonne corrélation entre les valeurs de résistance à la compression et de vitesse d’auscultation sonore.

$$RC = ae^{bV_{as}} \dots\dots\dots(III.2)$$

Avec:

R_c : Résistance à la compression du mortier MPa

V_{as} : Vitesse d’auscultation sonore

a et b : constantes empirique avec a = 0,136 et b = 0,0015

III.3.4 Corrélation entre la résistance à la compression et le module d’élasticité dynamique

Le module d’élasticité E (Module d’Young) représente l’une des caractéristiques mécaniques les plus importantes des matériaux de réparation. Cette propriété intrinsèque est considérée comme l’un des paramètres le plus important de la compatibilité dimensionnelle pour la réparation des éléments des structures en béton armé. Dans la pratique, on cherche souvent à trouver la relation entre le module d’élasticité et la résistance à la compression, pour n’avoir à estimer que l’une des deux caractéristiques. En général, on cherche à prédire le module d’élasticité à partir de la résistance à la compression et non le contraire. Il existe des modèles empiriques permettant d’estimer le module d’élasticité en fonction de la résistance à la compression. [4]

Chapitre III : Résultats et interprétation

Le module d'élasticité dynamique E_d peut être déterminé à partir de l'équation suivante en fonction de la vitesse de propagation d'onde :

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \dots\dots\dots III.3$$

Avec :

E_d : Module d'élasticité dynamique (GPa)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

ν : Coefficient de poisson

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

Nous constatons d'après la Figure III.8 que le module d'élasticité dynamique des mortiers de réparation étudiés est lié à la racine carrée de la résistance à la compression selon une loi linéaire comme le montre l'équation III.4.

$$E_d = 4,03f_c^{0,5} \dots\dots\dots (III.4)$$

On observe une très bonne corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,996

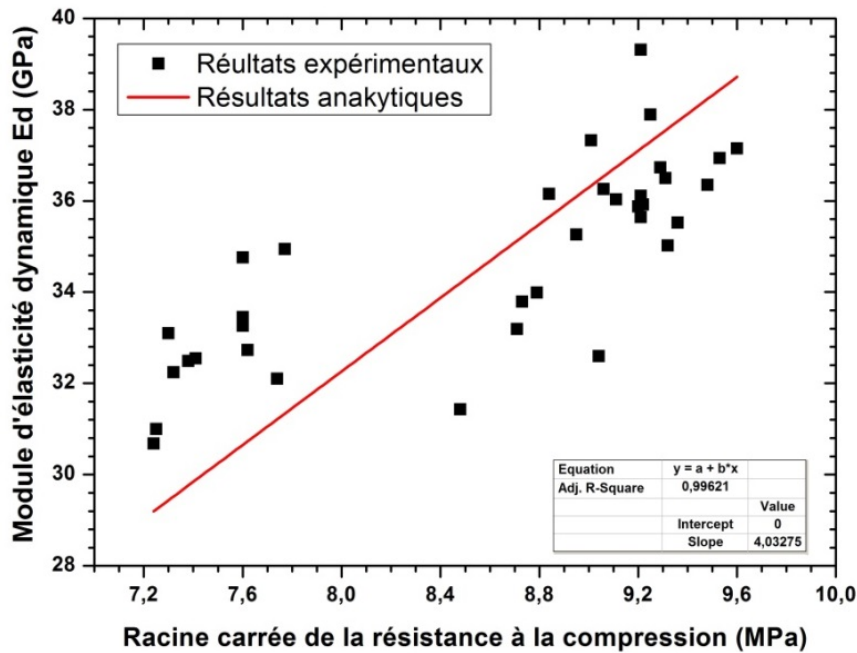


Figure III.8: module d'élasticité dynamique en fonction de la racine carré de la résistance à la compression

Ces résultats sont en accord avec ceux de Krobba B, qui a trouvé une corrélation linéaire entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des mortiers de réparations, donnée par la relation suivante :

$$E = 3,28fc^{0,5} \dots\dots\dots(III.5)$$

III.3.5 Absorption par capillarité

L'absorption capillaire caractérise l'aptitude d'un matériau poreux à absorber l'eau lorsqu'il est exposé à une source d'eau. Les figures III.9 et III.10 illustrent la cinétique d'absorption d'eau cumulée par unité de surface, en fonction de la racine carrée du temps à 28 jours et les valeurs de sportivité C_c obtenues à partir de la figure III.9.

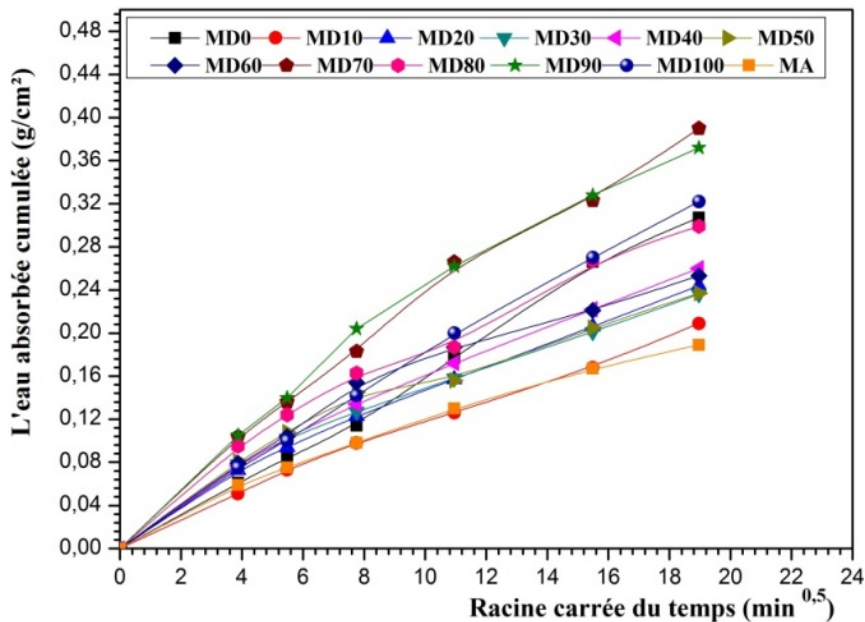


Figure III.9 : Evolution de la quantité d'eau absorbé par capillarité en fonction de temps

La figure III.9 montre que la quantité cumulée de l'eau absorbée par unité de surface augmente avec la racine carrée du temps pour les différents types de mortiers de réparation. Des tendances similaires ont été observées pour tous les types de mortiers.

Les valeurs trouvées et représentées dans la figure III.10 indiquent une variation de coefficient d'absorption d'eau par capillarité C_c de 0,00969 à 0,02011 g/cm².min^{0,5} à 28 jours. On peut clairement voir sur la même figure que le mortier à base de sable alluvionnaire MA offre un coefficient d'absorption plus faible que les autres mortiers, et les coefficients d'absorption des mortiers MD70, MD80, MD90 et MD100 sont nettement supérieurs par rapport aux autres formulations. On remarque aussi que le faible coefficient d'absorption des mortiers à base de sable binaire est enregistré pour les mélanges MD10, MD20, MD30, MD40, MD50 et MD60

avec une valeur moyenne de l'ordre de $0,012\text{g/cm}^2\cdot\text{min}^{0,5}$. Cela peut être dû à la correction granulométrique du sable, qui conduit à une amélioration de compacité de la matrice.

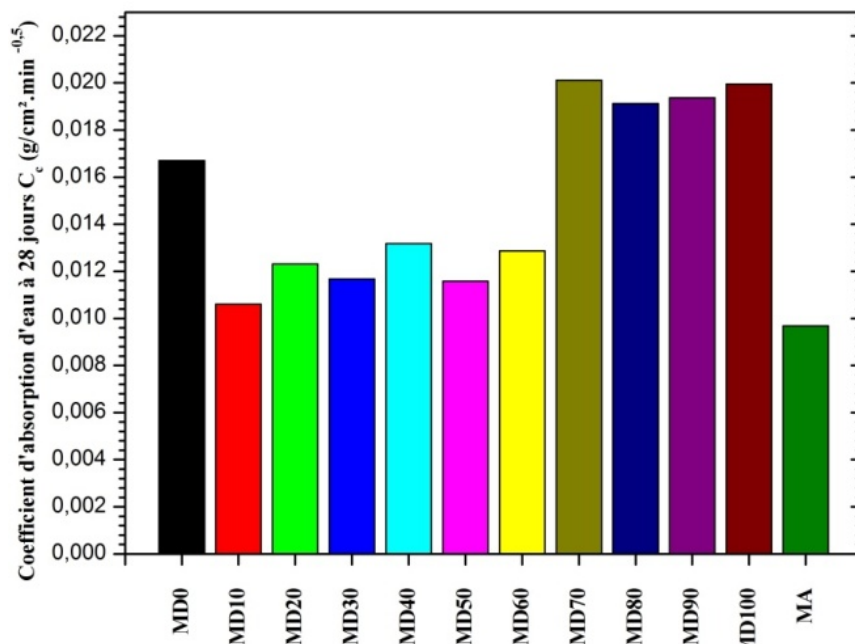


Figure III.10: Coefficient l'absorption d'eau de différents types de mortiers en fonction de temps.

III.3.6 Le retrait total

La réparation et la réhabilitation des structures en béton armé ne peuvent réussir que si le nouveau matériau (matériau de réparation) est compatible avec le vieux béton (substrat).

Le retrait du béton est souvent à l'origine de la fissuration, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage. La réparation et la réhabilitation des structures en béton armé ne peuvent réussir que si le nouveau matériau (matériau de réparation) est compatible avec le vieux béton (substrat). Le retrait est l'un de facteurs essentiels qui affectent la compatibilité dimensionnelle. La variation dimensionnelle due au retrait dépend de plusieurs paramètres tels que la composition de mortier, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de cure. [4]

L'évolution du retrait en fonction de temps des différents mélanges est présentée sur la figure III.11 qui montre des courbes convexes ont la même allure. Cette allure confirme la tendance trouvée dans la plupart des matériaux cimentaires. De plus, on constate que la majorité du retrait des mortiers confectionnés se développe dans les premiers sept jours.

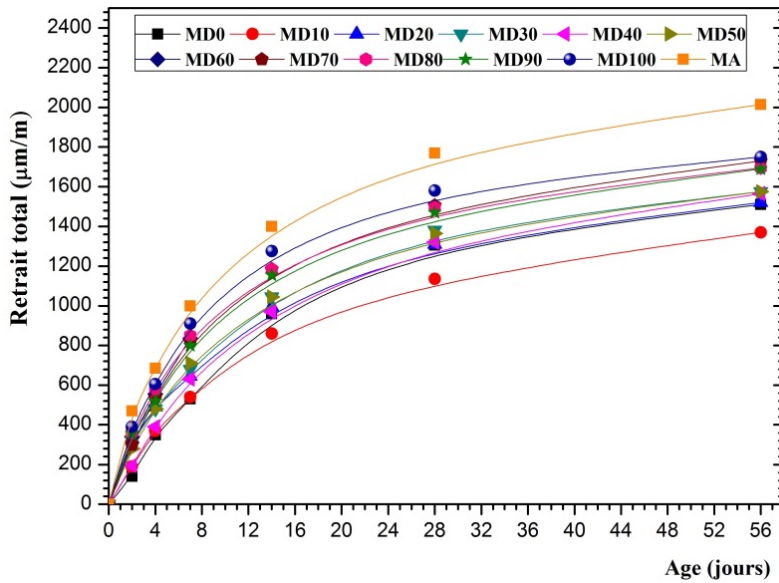


Figure III.11 : Evolution de retrait en fonction de temps

L’histogramme illustré dans la figure III.12 représente les valeurs de retrait à 7, 28, et 56 jours de différents mortiers élaborés. D’après cette figure, on remarque que le retrait le plus élevé a été enregistré par le mortier à base de sable alluvionnaire MA avec des valeurs de 1000; 1770 et 2015 $\mu\text{m/m}$ à 7,28 et 56 jours respectivement. A 7 jours, le mortier MD0 présente la valeur la plus faible qui est de l’ordre de 530 $\mu\text{m/m}$, mais à long terme (56 jours) le mélange MD10 ceux qui présente la valeur la plus faible. Cela peut être dû à la correction granulométrique du sable qui conduit à une amélioration de la compacité du squelette granulaire et par conséquent à une diminution de porosité.

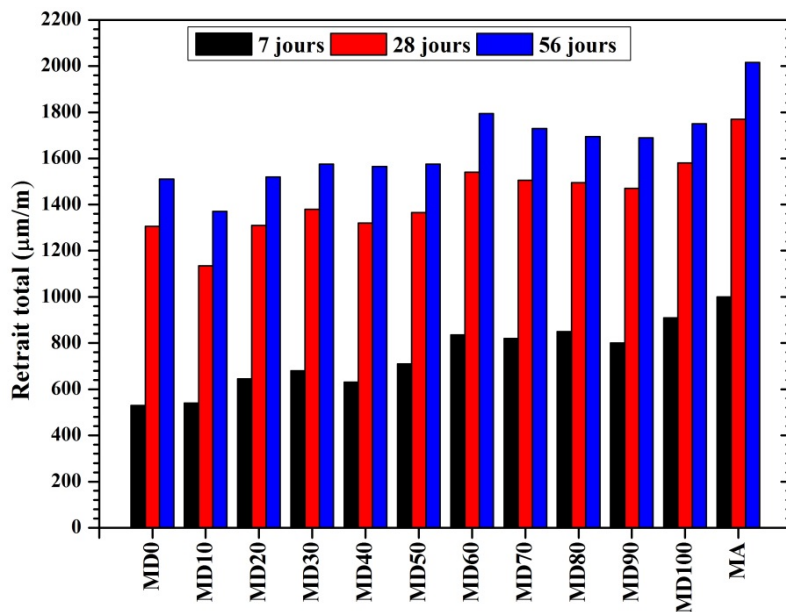


Figure III.12 : Etude comparative de retrait de différents types des mortiers à 28 jours.

III.4 Adhérence mortier de réparation -béton substrat

La force d'adhérence du mortier de réparation au support béton est l'une (sinon la première) des caractéristiques techniques les plus importantes des matériaux de réparation. Une mauvaise adhérence du mortier de réparation au vieux béton peut empêcher un comportement monolithique et provoquer le décollement de la réparation sous des charges mécaniques. Une liaison de bonne qualité entre les deux matériaux est une exigence importante pour évaluer l'efficacité de la réparation. [4]

Le béton substrat utilisé pour étudier l'adhérence des mortiers élaborés par les différents types d'essai (Cisaillement oblique, traction par arrachement et traction par fendage) est un béton normal de classe C35/45. Ce béton est constitué de granulats de différentes tailles, d'un liant hydraulique et d'eau. Il est couramment utilisé dans la construction de bâtiments et d'ouvrages d'art.

III.4.1 Adhérence par cisaillement oblique (Slant-shear) :

Les contraintes d'adhérences obtenues par l'essai de cisaillement oblique pour les différents mortiers étudiés sont représentées dans la figure III.13. A partir de cette figure, on constate que les valeurs des contraintes variant de 11.6 MPa pour MD70 jusqu'à 25.6 MPa pour le mortier MD90. On voit sur la même figure que les valeurs des contraintes d'adhérence par cisaillement des mélanges MD0, MD40, MD50, MD60, MD80, MD90 et MD100 développent des contraintes d'adhérence supérieures à la valeur minimale de 14 MPa requise par l'ACI 546,3R, ceci exprime une excellente adhérence et cohésion entre mortier de réparation et le béton de substrat, alors que celles développées par les mortiers MD10, MD20, MD30, MD70 et MA sont au-dessous du seuil de la norme suscitée. **Krobba [4]** trouve que la correction granulométrique de sable dunaire par du sable calcaire, l'ajout d'un Superplastifiant et l'incorporation des fibres sont très bénéfiques en termes d'adhérence. Cependant, il est à noter que tous les mortiers à base de sable dunaire-calcaire présentent des contraintes d'adhérence supérieures à celles enregistrées pour le mortier à base de sable alluvionnaire MA.

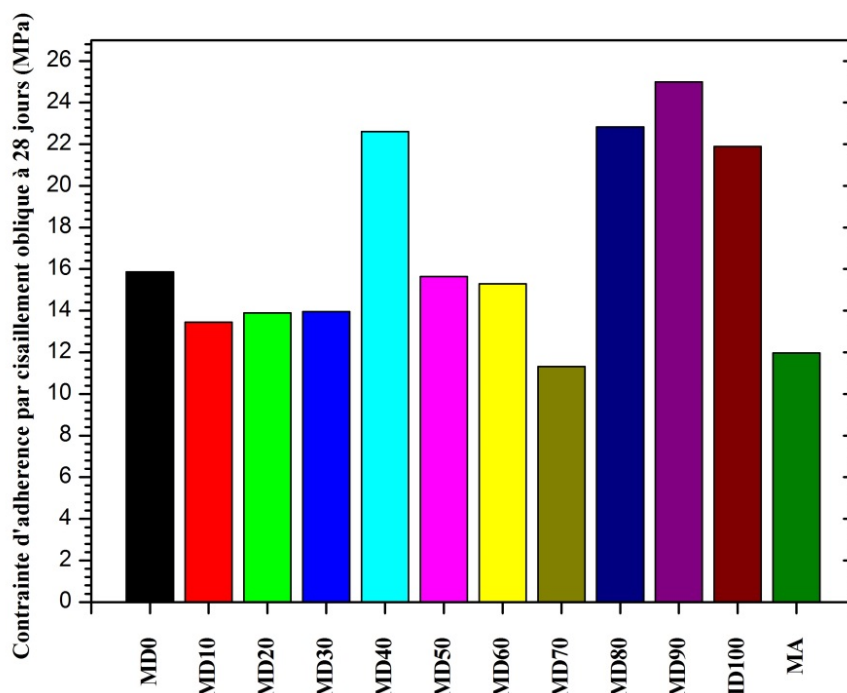


Figure III.13 : Contraintes d'adhérence par cisaillement oblique des différents types de mortiers

III.4.2 Adhérence de traction par arrachement (pull-off)

Dans le domaine de la réparation, l'essai d'adhérence par arrachement (pull-off test) est le plus largement répandu. L'essai pull-off comme décrit dans la norme EN 1542, permet de déterminer la contrainte d'adhérence en traction des réparations. Cette contrainte est une mesure importante pour garantir la qualité et la durabilité des travaux de réparation. Cette contrainte est généralement définie comme la force nécessaire pour arracher un échantillon de mortier de réparation d'une surface de béton substrat.

Les résultats présentés dans la figure III.14, montrent que la contrainte d'adhérence par arrachement à 28 jours varie de 1,5 MPa pour le mortier MD0 à 2,65 MPa pour le mortier MD90. Les contraintes enregistrées pour les mortiers MD10, MD20, MD30 et MD40 présentes des valeurs similaires à celle trouvée pour le mortier à base de sable alluvionnaire MA. De manière générale, l'augmentation du taux de substitution de sable dune entraîne une augmentation de la contrainte d'adhérence. Les mortiers MA, MD0, MD10, MD20, MD30, MD40, MD50 et MD60 présentent des contraintes d'adhérences varient entre 1,5 MPa et 2 MPa, qui sont supérieures à la valeur minimale (1,5 MPa) fixée par la norme EN 1504-3 pour les mortiers de réparation de classe R3. Quant, aux mortiers MD70, MD80, MD90, MD100 les contraintes d'adhérences sont supérieures à la valeur minimale (2 MPa) requise par la même norme pour les mortiers de réparation structurale de classe R4.

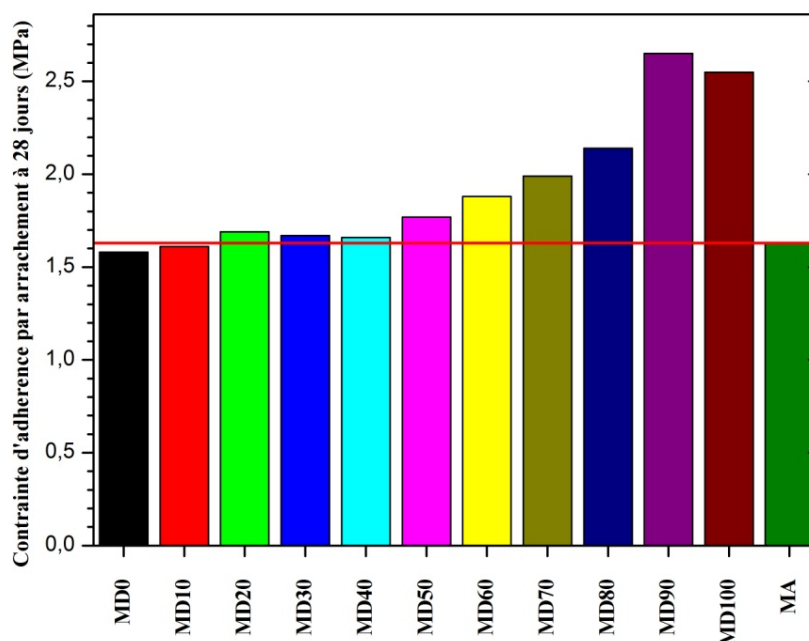


Figure III.14 : Contraintes d'adhérence par arrachement à 28 jours

III.4.3 Adhérence de traction par fendage (split tensile) :

L'essai de traction par fendage est une méthode couramment utilisée pour déterminer la contrainte d'adhérence indirecte à la rupture entre le matériau de réparation et le béton. Cette méthode permet d'évaluer l'efficacité des matériaux de réparation dans des conditions similaires à celles rencontrées sur le terrain. Cependant, il convient de noter que les résultats peuvent varier en fonction des propriétés du matériau de réparation et du béton, ainsi que des conditions environnementales.

Les résultats expérimentaux de l'essai de traction par fendage à 28 jours sont présentés dans la figure III.15. Nous remarquons que la contrainte d'adhérence variant de 1,2 MPa pour le mortier MD0 à 2,7 MPa pour le mortier MD90. La même figure montre également que tous les mortiers de réparation élaborés à l'exception des mortiers MD0, MD10 et MD20 présentent des valeurs des contraintes d'adhérence supérieures à celle de mortier MA. Il est intéressant de noter que les mortiers de réparation MD60, MD70, MD80, MD90 et MD100 présentent des valeurs des contraintes d'adhérence supérieures à la valeur minimale de 2 MPa donnée par la classification de Sprinkel and Ozyildirin. Comme on peut observer sur cette figure III.15, la variation dans la contrainte d'adhérence par fendage présente à peu près la même tendance pour la variation dans la contrainte d'adhérence par arrachement (figure III.14), c'est-à-dire elle augmente avec l'augmentation de taux du substitution de sable calcaire par le sable dunaire.

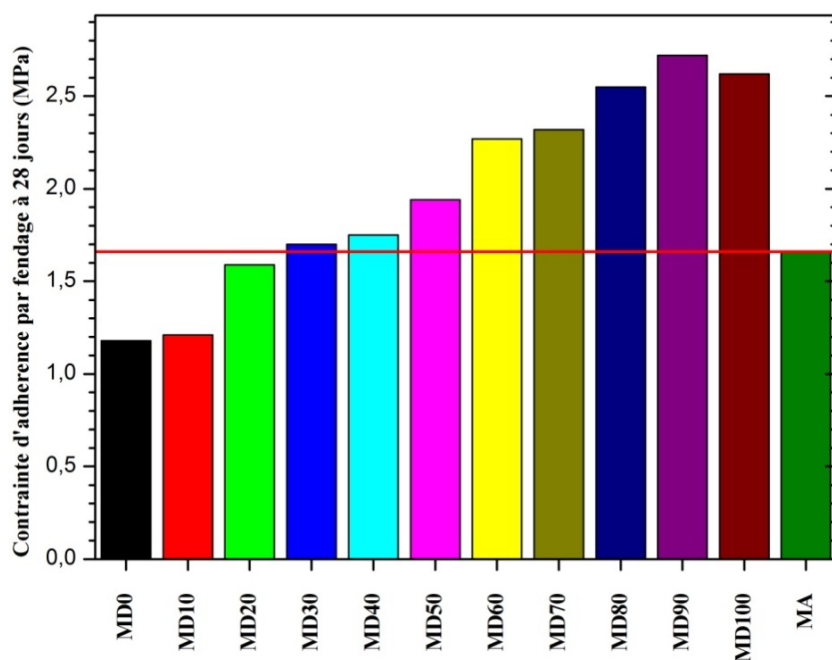


Figure III.15 : Contrainte d'adhérence par fendage à 28 jours.

III.4.4 Relation entre la contrainte d'adhérence par arrachement et traction par fendage

Les résultats obtenus à partir de l'essai de cisaillement oblique indiquent qu'une relation étroite existe entre la contrainte d'adhérence fendage et la résistance à la traction par arrachement.

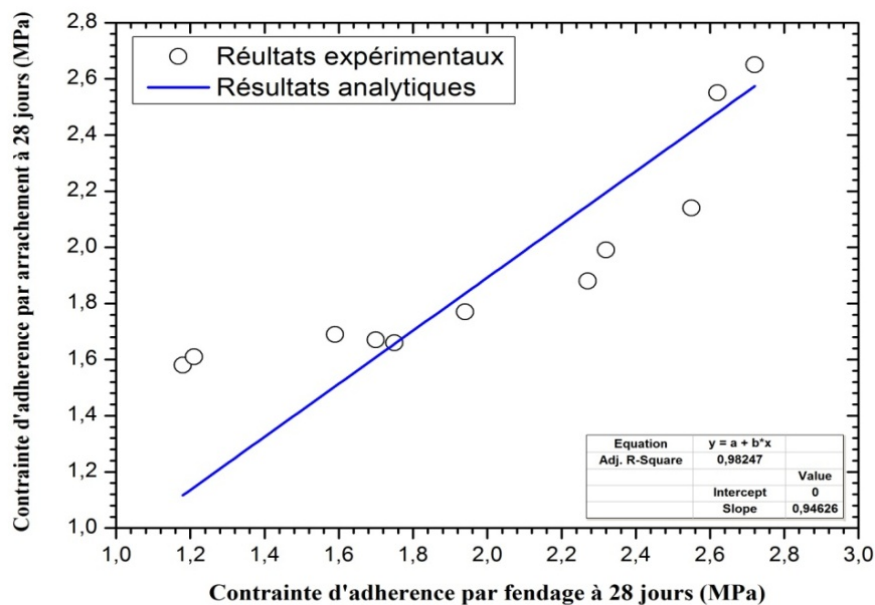


Figure III.16 : Relation entre les contraintes d'adhérence par arrachement et le contrainte de traction par fendage.

Chapitre III : Résultats et interprétation

La contrainte d'adhérence par arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance de traction par fendage. La figure 16 présente la relation entre ces deux contraintes d'adhérence. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme linéaire présentée par l'équation (III.6) avec un très bon coefficient de corrélation de 0,983.

$$\sigma_{aar} = 0,94 \sigma_{atf} \dots\dots\dots (III.6)$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail du mémoire s'est déroulé sur une période de six mois, et s'est intégré à l'activité générale de l'équipe de recherche « réhabilitation des structures et matériaux composites (SRACM)» du laboratoire de réhabilitation des structures et matériaux (SREML) de l'université de Laghouat.

Cette recherche nous a permis de mettre en valeur l'utilisation des sables locaux (sable de dune et sable calcaire) dans la formulation des mortiers de réparation autoplaçant qui sont plus utilisés dans le domaine de la construction.

Les résultats trouvés après l'élaboration de différentes formulations réalisées par la correction des sables locaux, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Une augmentation rapide de la résistance à la traction par flexion pour tout les types de mortiers de taux 78, 34% et 95%.
- ✓ Le mortier MA présente une faible résistance à la compression par rapport les autres types de mortier.
- ✓ Une très bonne corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation $R^2=0,996$, cette propriété considéré comme l'un des paramètres le plus important de la compatibilité démentielle pour la réparation structurelle en béton armé.
- ✓ La variation de coefficient d'absorption d'eau par capillarité C_c de 0,00969 à 0,02011 (g/cm^2)^{0,5} à 28jours.
- ✓ Une augmentation de retrait remarquable enregistré par le mortier à base de sable d'alluvionnaire MA avec les valeurs de 1000 ; 1770 et 2015 $\mu\text{m/m}$ à 7, 28 et 56jours.
- ✓ Une excellente adhérence et cohésion entre mortiers de réparation et le béton du substrat dans l'essai de cisaillement oblique représenté par les mélanges MD0, MD40, MD50, MD60 MD80, MD90et MD100 .
- ✓ les mortiers MA, MD0,MD10, MD20, MD30, MD40 ,MD50 et MD60 présentent des contraintes d'adhérence traction par arrachement des valeurs supérieure à la valeur minimale (1,5MPa) fixées par la norme EN1504-03 pour les mortiers des réparation classe R3 , et pour les mortiers MD70, MD80, MD90et MD100 les valeurs des contraintes sont supérieure à la valeur minimale (2MPa) requise par la même norme pour les mortiers de réparation structurelle de R4.
- ✓ Le mode de rupture dans l'essai d'arrachement de quelque soit types de mortier est l'interface.
- ✓ La variation dans la contrainte d'adhérence traction far fendage présente à peu près la même tendance pour la variation dans la contrainte d'adhérence pour arrachement.

References bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bissonnette, B.; Courard, L. and Garbacz, A.: "Concrete surface engineering", CRC Press, 2015.
- [2] Parhizkar, T.; Ramezani-pour, A.A.; Hillemeier, B.; Ghasemi, A.R. and Mozafari, N.: "Compatibility of repair concretes in the aggressive environment of the South of Iran", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 31 (2006), no. 1, p. 139.
- [3] Emmons, P.H. and Vaysburd, A.M.: "System concept in design and construction of durable concrete repairs", *Construction and Building Materials*, 10 (1996), no. 1, pp. 69–75.
- [4] Krobba, B.: "Formulation et performance d'un mortier de réparation à base de sable dunaire", *Thèse de doctorat*, Université de Blida, 2020, p. 183.
- [5] Pattnaik, R.: "Investigation into compatibility between repair material and substrate concrete using experimental and finite element method", *Phd thesis* Clemson University, (2006), p. 168.
- [6] Muñoz, M.Á.C.: "Compatibility of ultra high performance concrete as repair material : bond characterization with concrete under different loading scenarios", *Master Theses*, Michigan technological university, (2012), p. 168.
- [7] Qin, R.; Hao, H.; Rousakis, T. and Lau, D.: "Effect of shrinkage reducing admixture on new-to-old concrete interface", *Composites Part B: Engineering*, 167 (2019), pp. 346–355.
- [8] Vaysburd, A.M.; Bissonnette, B. and von Fay, K.F.: "Compatibility issues in design and implementation of concrete repairs and overlays", *Research project ed.*, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service, 2014.
- [9] Ahmad .Z, Ibrahim .A, and Tahir .P, "Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, p. 10, 2010.
- [10] Parmentier .P, Pollet .V, and Zarmat .G, "Le retrait empêché du béton. Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution," vol. 2, p. 12, 2009.
- [11] T.-H. Nguyen, "Durabilité des réparations à base matériaux cimentaire: analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation," *Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier*, 2010.
- [12] Courard.L and Bissonnette.B, "Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 2: Compatibilité et performances," *Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation*, 2016.
- [13] Yazdi, M.A.; Dejager, E.; Debraekeleer, M.; Gruyaert, E.; Van Tittelboom, K. and De Belie, N.: "Bond strength between concrete and repair mortar and its relation with concrete removal techniques and substrate composition", *Construction and Building Materials*, 230 (2020), p. 116900.

Références bibliographiques

- [14] Bakhsh, K.N.: "Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs", *diva-portal.org*, (2010), p. 71
- [15] Beushausen, H. and Alexander, M.G.: "Bond strength development between concretes of different ages", *Magazine of Concrete Research*, 60 (2008), no. 1, pp. 65–74.
- [16] Dupain.R, Lanchon.R, J-C.Saint-Arroman«Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.
- [17] Yahoui, K. and Sadki, M.: Propriétés de mortier autoplaçant à base de différents types de sables. Mémoire de Master, Université de Djelfa, (2017), P 83.
- [18] Mekhermeche, A.; Hatia, M.; Kriker, A. and Abbani, S.: Contribution à L'étude des Propriétés Thermiques des Briques en Terre, 5 ,2013 (التكنولوجيا و العلوم حوليات), no. 1, pp. 81–89.
- [19] Hamiane, M. and Benmounah, M.: Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, (2014), p. 109.
- [20] Baalbaki.M, "Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants", Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [21] Lakhdari .M.F, Zaidi.A, Bouhicha.M, and Krobb.B , "Formulation of Mortar Based on Mixture of Dune Sand and Alluvial Sand. *Energy Procedia*, Elsevier, 2017.
- [22] B. Benabed, L. Azzouz, E. Kadri, S. E. Belaidi, and H. Soualhi, "Propriétés physicomécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes," p. 11, 2012 .
- [23] T. Bouziani, A. Benmounah, Z. Makhoulfi, M. Bédérina, and M. QueneudecT'kint, "Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 28, no. 18, Art.no. 18, Sep. 2014.
- [24] P. Grassl, H. S. Wong, and N. R. Buenfeld, "Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar," *Cement and concrete research*, vol. 40, no. 1, pp. 85–93, 2010.
- [25] W. Zhang, M. Zakaria, and Y. Hama, "Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 500–510, Dec. 2013.
- [26] N. EN, "196-6," *Methods of testing cement-Part*, vol. 6, 2010.
- [27] N. EN, "196-3: Méthodes d'essais des ciments–Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité (March)," Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris, France, 2006.

Références bibliographiques

- [28] T. EN, “934-2 ‘Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: concrete admixtures; definitions, requirements, conformity, marking and labelling,’” british standards Institution, 2009.
- [29] BS EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution. Sieving method, British Standards Institution.London, 2012.
- [30] N. P 94-054, *Sols: Reconnaissances et essais, détermination de la masse volumique des particules solides des sols, méthode du pycnomètre à eau*. Association Française de Normalisation France.
- [31] BS EN 1097-3, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates: Part 3: Determination of loose bulk density and voids*, British Standards Institution.London, 1998.
- [32] BS EN 1097-6, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption*, British Standards Institution.2013.
- [33] N. P 18-540, Granulats: Définitions, conformités et spécifications. Afnor Paris, 1997.
- [34] C. ASTM, “305-99. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency,” 1999.
- [35] O. Boukendakdji, S. Kenai, E. H. Kadri, and F. Rouis, “Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2593–2598, Jul. 2009.
- [37]BS EN 12617-4: "Products and systems for the protection and repair of concrete structures-test methods-Part 4: Determination of shrinkage and expansion", British European Standard, UK, (2000).
- [38] BS EN 1015-18: "Methods of test for mortar for masonry: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar", British European Standard, UK, (2002).
- [39] ASTM, “ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” 2001.
- [40] BS EN 1542: "Products and systems for the protection and repair of concrete structures-Test methods-Measurement of bond strength by pull-off", British European Standard, UK, (1999).
- [41] NF. EN, “196-1, Méthodes d’essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques,” *French Standard*, 2006.
- [42] ASTM C882: "Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear", Annual book of ASTM standards, (1999).

Références bibliographiques

- [43] BS EN 1542: "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off.", British Standards Institution ed., 1999.
- [44] BS EN 12390-6: "Testing hardened concrete. Part 6: tensile splitting strength of test specimens", British Standards Institution ed., BSI, 2009.
- [45] Maza, M.: "Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à base de sable mixte (sable de dune et sable concassé)", thèse de doctorat Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2016).