



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 : MERDJANI FATIMA ZOHRA
BOUAKKAZ TALHA YACINE

DOMAINE : Sciences et technologie
FILIERE : Génie civil
OPTION : Matériaux de Génie Civil

Thème

**Etude de l'effet du type de sable sur les performances d'un
mortier de réparation**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Lakhdari Mohamed Fateh	M.A.A	Président
Ziregue Ahmed	M.C.B	Examineur
krobba Ben Harzallah	M.C.B	Rapporteur
Kouidri Zohra	M.A.A	Co-rapporteur

Promotion : Septembre 2020

REMERCIEMENT

Je dois remercier tout d'abord « ALLAH » le tout puissant, qui m'a donné la puissance, la volonté et la patience pour élaborer ce travail.

*Mes remerciements les plus sincères à mon encadreur de mémoire **Mr KROBBA benharzallah**, pour sa patience ; disponibilité, son encouragement et surtout son aide et ses judicieux conseil, qui ont contribué & alimenter nos réflexion.*

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

*Nous tenons également à remercier vivement messieurs les membres de jury, **Mr LAKHDARI Mohamed Fatah** et **Mr ZIREGUE Ahmed**, d'accepter examiner et évaluer ce travail.*

Nos grands remerciements vont également & l'ensemble du personnel du laboratoire de Génie civil de Laghouat, Ainsi qu'à l'ensemble du personelles de la bibliothèque de l'université de Laghouat, pour leurs aides et leur disponibilité.

Enfin que toutes les personnes qui, d'une façon ou d'une autre m'ont apporté leurs aides, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

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

DÉDICACE

Grace à Dieu le tout puissant, le jour attendu arrive.

À vous je dédie ce modeste travail.

*À la femme parfaite, celle que je respecte et que j'aime énormément à toi **ma mère**.*

*À l'âme de l'homme de ma vie, mon exemple éternel, « **mon père** ».
qu'Allah le accueille en son vaste paradis.*

*À Mes **soeurs Khadidja, Khaira** pour avoir supporté une soeur stressée
durant toutes ces années*

*À **mon frère badro dine**, pour son amour, j'espère que la vie lui réserve le
meilleur.*

*À mes chères amis **Ryma, Amel, Anfel, Fatima, Ahme Yacine** pour leur
écoute et leurs soutiens moraux.*

FATIMA ZOHRA

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce travail :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père pour ses encouragements son soutien et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes frères et mes sœurs particulièrement Hadjer qui m'a toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études

A ma très chère mimi, l'amour de mon enfance pour l'amour et affection qui nous unissent.

Et tout qui m'aide et compulse ce travail.

En fin je remercie mon binôme Mourdjani Fatima qui a contribué à la réalisation de ce travail.



Yacine

ملخص

من أجل تلبية الطلب المتزايد على مواد البناء والحفاظ على البيئة في إطار التنمية المستدامة ، أصبح تثمين المواد المحلية اليوم أحد التحديات الرئيسية التي تواجه كل من مجال البحث وقطاع البناء. في هذا السياق ، الهدف من هذا العمل هو من دراسة السلوك في الحالة الطازجة والصلبة لملاط الإصلاح القائمة على عدة توليفات من الرمال (الكثبان الرملية ، والرمل الجيري ورمال الوديان) الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية المدروسة هي قوة الانضغاط ، قوة الانحناء ، الانكماش ، معامل المرونة. بالنسبة لديمومة مختلف أنواع ملاط الترميم المنتجة فقد تم تقييمها بواسطة اختبار المسامية واختبار امتصاص الماء الشعري. أظهرت النتائج أنه بالمقارنة مع الملاط القائم على رمال الوديان و الملاط القائم على الرمل المعياري ، فقد تحسنت الخواص الفيزيائية الميكانيكية للملاط القائم على الخلائط الثلاثية من الرمال.

كلمات مفتاحية : ملاط إصلاح ، مقاومة ميكانيكية ، توافق ، إنكماش ، معامل المرونة ، ديمومة .

Abstract

In order to meet the rising demand of construction materials and preserve the environment within the framework of sustainable development, valorizing local materials has become nowadays one of the main challenges facing both the research community and the construction industry. In this context, this work consists in studying the behavior in the fresh and hardened state of repair mortars based on several combinations of sands (dune sand, limestone sand and alluvial sand). The physical and mechanical properties investigated are compressive strength, flexural strength, shrinkage, elastic modulus. The durability of mortar was evaluated through porosity and capillary water absorption tests. The found results showed that compared to mortars based on alluvial sand and based on standardized sand, an improvement in the physico-mechanical properties of the mortars based in a ternary mixtures sands.

Key words : *Repair mortar, Mechanical strength, compatibility, , Shrinkage, Elastic modulus, Durability.*

Résumé

Afin de répondre à la demande croissante de matériaux de construction et de préserver l'environnement dans le cadre du développement durable, la valorisation des matériaux locaux est devenue aujourd'hui l'un des principaux défis auxquels sont confrontés à la fois le domaine de la recherche et le secteur de la construction. Dans ce cadre, ce travail consiste à étudier le comportement à l'état frais et durci des mortiers de réparation à base de plusieurs combinaisons des sables (sable dune, sable calcaire et sable alluvionnaire). Les propriétés physico-mécaniques étudiées sont la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le retrait, le module d'élasticité. La durabilité des mortiers élaborés ont été évaluée par l'essai de la porosité et l'essai d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats trouvés ont montré que par rapport aux mortiers à base de sable alluvionnaire et à base de sable normalisé, une amélioration des propriétés physico-mécaniques des mortiers à base des mélanges ternaires de sables.

Mots clés : Mortier de réparation, Résistances mécaniques, Compatibilité, Retrait, Module d'élasticité, Durabilité.

Table de matière

Remerciements
Dédicaces
Table de matière
Résumé
ملخص

Abstract

Liste des figures
Liste des tableaux
Introduction générale

Chapitre I Synthèse bibliographique

I.1 Introduction.....	4
I.2. Principes fondamentaux.....	4
I.2.1. Compatibilité.....	5
I.2.2. Concept de compatibilité	5
I.3.Facteurs influençant la compatibilité dimensionnelle d'une réparation en béton	6
I.3.1. Module d'élasticité	6
I.3.2. Retrait.....	7
I.3.3. Fluage.....	10
I.3.4. Dilatation thermique	10
I.4. Les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle.....	10
I.5. Exigences de performance pour les réparations structurales et non structurales.....	11
I.6 Les constituants d'un mortier de sable	12
I.6.1. Ciment.....	12
I.6.2.Le sable	13
I.6.3.Eau de gâchage	14
I.7. L'effet de type de sable sur les performances des mortiers	15

I.7.1 Résistance à la compression.....	15
I.2.2 Retrait.....	16
I.8. Conclusion	17

Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentale

II.1 INTRODUCTION.....	19
II.2 Matériaux utilisés	19
II.2.1 Sables.....	19
a) Caractéristiques physiques.....	19
II.2.2 Ciment	26
a) Caractéristiques physiques du ciment.....	26
b) Caractéristiques mécaniques du ciment	28
II.2.3 Eau de gâchage	28
II.2.4 Adjuvant :	28
II.3 Méthodes expérimentales	29
II.3.1 Procédure de malaxage	29
II.3.2 Essais effectués sur les mortiers a l'état frais	30
a) Etalement au mini cône.....	30
II.3.3 Essais effectués sur les mortiers a l'état durci	31
a) Confection et cure des éprouvettes	31
b) Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés	31

Chapitre III Résultats et discussion

III.1 Introduction	41
III.2. Formulation des mortiers de réparation autoplaçant.....	41

III.3. Effet de mélange de sable sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers.....	43
III.3.1.Résistances mécaniques	43
III.3.1.1. Résistance à la traction par flexion	43
III.3.1.2. La résistance à la compression	45
III.3.2. Le module d'élasticité dynamique(E_d)	47
III.4. Durabilité des mortiers élaborés.....	49
III.4.1.Porosité totale	50
III.4.2. Absorption par capillarité.....	51
III.5.Le retrait total	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 :	Exigences de performance pour les réparations structurelles et non structurelles.....	11
Tableau I.2 :	Exigences générales de compatibilité entre les matériaux de réparation et le vieux béton (substrat).....	12
Tableau II.1 :	Analyse granulométrique des sables.....	20
Tableau II.2 :	Modules de finesse des sables.....	21
Tableau II.3 :	Classement des sables.....	21
Tableau II.4 :	Masses volumiques absolues.....	24
Tableau II.5 :	Masses volumiques apparentes.....	25
Tableau II.6 :	Compacité des sables.....	25
Tableau II.7 :	Absorption d'eau des sables.....	26
Tableau II.8 :	Valeurs d'équivalent de sable.....	27
Tableau II.9 :	Classe de propreté d'équivalent de sable.....	27
Tableau II.10 :	Composition chimique et propriétés physiques de ciment et MP.....	28
Tableau II.11 :	Caractéristiques physiques du ciment.....	30
Tableau II.12 :	Classe vraie du ciment.....	30
Tableau III.1 :	Composition des différents mélanges.....	34
Tableau III.2 :	Résultats des valeurs de sorptivité Cc.....	55

Liste des figures

Figure I.1	: Facteurs influençant la compatibilité d'une réparation en béton.....	6
Figure I.2	: Effets d'une inadéquation des modules élastiques.....	7
Figure I.3	: Phénomène de retrait.....	8
Figure I.4	: Effet des types de sables sur la résistance à 28 jours des MAP.....	15
Figure II.1	: Courbes granulométriques des trois types de sable.....	20
Figure II.2	: Essai d'équivalent de sable.....	24
Figure II.3	: Malaxeur de capacité de 5 litres.....	29
Figure II.4	: Séquence de malaxage.....	30
Figure II.5	: Essai d'étalement au mini cône.....	30
Figure II.6	: Appareil d'auscultation dynamique (ultra sonique).....	32
Figure II.7	: Dispositif de l'essai de flexion trois points.....	33
Figure II.8	: Schémas de l'essai de traction par flexion.....	33
Figure II.9	: Schémas de l'essai de compression.....	34
Figure II.10	: Dispositif de l'essai de compression.....	34
Figure II.11	: Appareillage pour la mesure du retrait.....	35
Figure II.12	: Schémas de l'essai de retrait.....	35
Figure II.13	: Schéma d'essai d'absorption d'eau par capillarité.....	37
Figure II.14	: Protection des éprouvettes par un film plastique adhésif.....	37
Figure II.15	: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.....	38
Figure II.16	: Saturation et séchage des éprouvettes cubiques pour l'essai de la porosité totale.....	39
Figure III.1	: Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 7 jours....	44
Figure III.2	: Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 28 jours...	44
Figure III.3	: Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 90 jours...	45
Figure III.4	: Résistance à la compression de différents types des mortiers à 7 jours.....	46
Figure III.5	: Résistance à la compression de différents types des mortiers à 28 jours.....	46

Figure III.6 : Résistance à la compression de différents types des mortiers à 90 jours.....	47
Figure III.7 : Module d'élasticité dynamique(E_d) de différents types des mortiers à 7 jours.....	48
Figure III.8 : Module d'élasticité dynamique(E_d) de différents types des mortiers à 28 jours.....	48
Figure III.9 : Module d'élasticité dynamique(E_d) de différents types des mortiers à 90 jours.....	49
Figure III.10 : Etude comparative de la porosité totale de différents types de mortiers à 7 jours.....	50
Figure III.11 : Etude comparative de la porosité totale de différents types de mortiers à 28 jours.....	51
Figure III.12 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps à 28 jours.....	52
Figure III.13 : Les coefficients d'absorption d'eau de différents types des mortiers à 28 jours.....	52
Figure III.14 : Evolution du retrait en fonction de temps de différents types des mortiers.....	54
Figure III.15 : Etude comparative de retrait de différents types des mortiers à 28 jours.....	55

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans la construction, mais sa durabilité dans les conditions de service auxquelles il est programmé et vis à vis des sources de dégradation auxquelles il est exposé (séisme, corrosion, attaques chimiques, réaction alcali-silica) constitue un problème majeur compte tenu de la diversité des facteurs d'influence conditionnant les caractéristiques mécaniques et physiques. Ce fait nous amène à évoquer logiquement le problème de la réparation et de son impact financier sur l'exploitation des ouvrages.

Les chiffres alarmants rapportés par différentes structures impliquées dans le secteur de la construction surtout concernant l'état de dégradation constaté sur de nombreuses constructions avec toutes les retombées socio-économique que cela implique dictent une prise en charge urgente du problème de la réparation et de la réhabilitation.

La détérioration des ouvrages en maçonneries et en béton armé tels que les monuments historiques, les quais des ports, ponts etc. commence à attirer l'attention des collectivités locales de notre pays que ce soit sur le plan économique ou socioculturel. L'Algérie possède un patrimoine de plus de 8000 d'ouvrages d'art, dont 55% routiers, avec plus du quart de ce nombre nécessitant des interventions de réparation ou de renforcement.[1] En conséquence, leur réhabilitation devient une force majeure de point de vue économique afin de les maintenir en service et d'éviter leur démolition. La réhabilitation des structures impose au premier lieu de trouver des matériaux de réparation résistants et de vérifier leur compatibilité et leur durabilité à long terme. Ceux-ci conduisent à penser à un nouveau mortier à base de matériaux locaux, pour l'utiliser dans la réparation de ces structures endommagées.

L'utilisation des sables de dune et ceux obtenus par concassage de roches calcaires pour la confection de mortiers ou de bétons offre une opportunité pour la préservation des sables alluvionnaires dont l'exploitation effrénée nuit de façon très sensible à l'environnement.

Dans cette optique est née l'idée d'entamé des recherches dans le but de valoriser ces matériaux susmentionnés et par conséquent on doit réfléchir à la confection d'un matériau pour le renforcement et réparation des structures.

Le thème que nous proposons" Etude de l'effet du type de sable sur les performances d'un mortier de réparation "s'inscrit dans cette optique et vise à mettre au point un moyen d'exploiter le sable dunaire et le sable calcaire pour la confection d'un mortier de réparation susceptible d'améliorer les performances en matière de durabilité du béton. Ce choix se justifie par le double souci de contribuer à combler cette lacune et à rentabiliser une source pratiquement intarissable de matériaux locaux constituée par les sables de dunes et le sable calcaire.

Le travail expérimental présenté dans ce document fait partie du programme global de développement de matériaux locaux mené par le Laboratoire de réhabilitation et de matériaux de structure.

Il est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre contient un état de l'art sur les mortiers de réparation, propriétés , critères de choix , techniques et la description des paramètres pouvant influencer la qualité des réparations.

Les matériaux utilisés ainsi que les méthodes expérimentales utilisées dans le cadre de cette étude sont présentés dans le deuxième chapitre.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'effet du type de sable (sable alluvionnaire, sable de dune et sable calcaire) sur les différentes caractéristiques des mortiers de réparation et particulièrement leurs propriétés à l'état frais et durci.

Enfin, dans la conclusion générale, nous ferons un bilan des acquis de ce travail et quelques perspectives seront présentées.

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

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

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

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

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

Renforcement : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique [2].

I.2. Principes fondamentaux

La technique de mise en œuvre doit permettre la mise en place du matériau de réparation sélectionné sur le support de béton préparé avec des résultats prévisibles, en conformité avec les exigences du cahier des charges. Les propriétés des matériaux de réparation généralement spécifiées sont la résistance en compression, la résistance en traction, l'adhérence en traction et les caractéristiques relatives aux changements de volume, soit le module d'élasticité, le retrait de séchage et le coefficient de dilatation thermique. D'autres propriétés telles que la perméabilité, la résistance aux cycles de gel et dégel ou la résistance aux sulfates. [3]

I.2.1. Compatibilité

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support d'ancien béton (vieux béton) il se pose le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité se définit comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.

La réparation des bétons nécessite non seulement une bonne connaissance du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils vont être mis en œuvre, mais aussi une compréhension des mécanismes à la base de l'adhésion.

Les compatibilités dimensionnelle, électrochimique, chimique et porosimétrique (perméabilité) sont les clés de la réussite et de la durabilité de la réparation[4].

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

Dans ce but, les caractéristiques suivantes sont demandées :

- Adhérer à la surface du béton, de manière à pouvoir participer à la transmission des efforts à l'ensemble de la structure de l'ouvrage;
- Présenter des résistances mécaniques (compression, traction, flexion) suffisantes, comparables ou supérieures à celles du béton ;
- Présenter un module d'élasticité similaire à celui du béton; ceci est impératif si le mortier de réparation doit contribuer activement à la stabilité mécanique de l'ensemble (cas de réparations effectuées sur des éléments dont la section a été fortement réduite); au cas où le ragréage est moins sollicité mécaniquement, on peut s'accommoder de valeurs de module d'Young (E) inférieures, ce qui accroît leur déformabilité et contribue à un meilleur comportement sous d'éventuels mouvements du support[3]

I.2.2. Concept de compatibilité

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support de vieux béton, il se pose alors le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité peut prendre différents aspects, tant chimique que 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 [5]

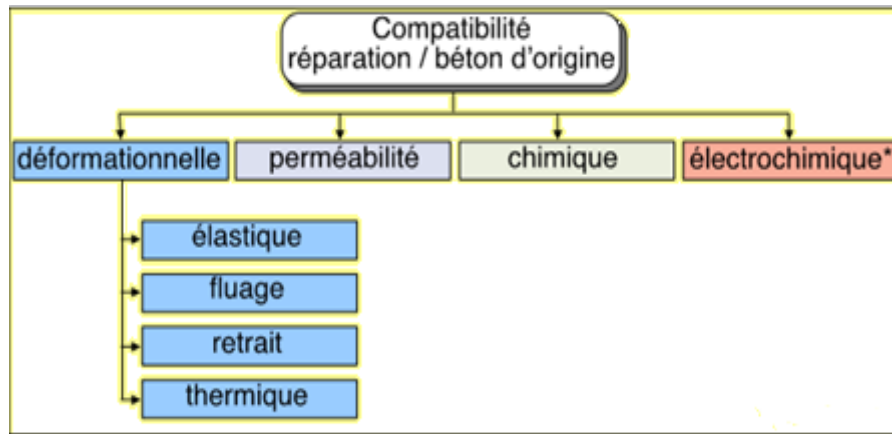


Figure I.1. Facteurs influençant la compatibilité d'une réparation en béton[3]

1.2.2.1. Compatibilité déformationnelle

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

Dès sa mise en place, le matériau de réparation est le siège de variations volumiques causées aussi bien par la réaction d'hydratation du ciment (retrait endogène, retrait thermique) que par le séchage (retrait de dessiccation). Dans la mesure où le béton du support est stable hydriquement et que l'hydratation est inactive, les variations volumiques du matériau de réparation seront restreintes par la présence du support. Le matériau qui constitue le support de la réparation est de plus un matériau dont l'hydratation est terminée et donc dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées comparativement au matériau de réparation[5]

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

I.3.1. Module d'élasticité

Le module d'élasticité est une mesure de la rigidité d'un matériau. Un matériau avec un module d'élasticité plus élevé est plus rigide qu'un matériau de module inférieur, qui est plus flexible. Le module d'élasticité est la constante de proportionnalité entre la contrainte appliquée et la déformation dans la gamme contrainte déformation linéaire du matériau. Il

Chapitre I Synthés bibliographie

correspond à la pente de la partie droite d'un graphique de la contrainte par rapport à la déformation. Le terme élasticité fait référence au caractère réversible du changement dimensionnel (comme un ressort se ressaisirait s'il était comprimé ou étiré) [6].

Les matériaux à faible module d'élasticité se déforment plus que ceux à un module élevé sous une charge donnée. Lorsque la charge (compression ou traction) est appliquée parallèlement à l'interface (béton-matériau de réparation) figure. I.2.a, les matériaux ayant des modules élastiques différents transfèrent les contraintes du matériau à faible module (efficacité portante inférieure) au matériau à module élevé. Lorsque la charge est appliquée perpendiculairement à la l'interface (béton-matériau de réparation) Figure I.2.b, la différence de rigidité entre les deux matériaux est moins critique si la charge appliquée est une charge de compression [7]

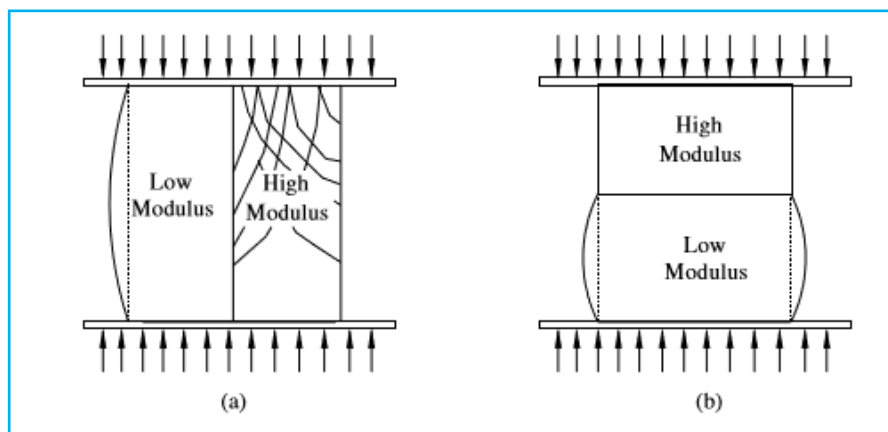


Figure I.2. Effets d'une inadéquation des modules élastiques. (a) Charge parallèle à l'interface (b) Charge perpendiculaire à l'interface[7].

I.3.2. Retrait

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

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

endogène. Ces cinq composantes du retrait total d'une matrice cimentaire sont cumulatives avec des cinétiques très différentes[8]

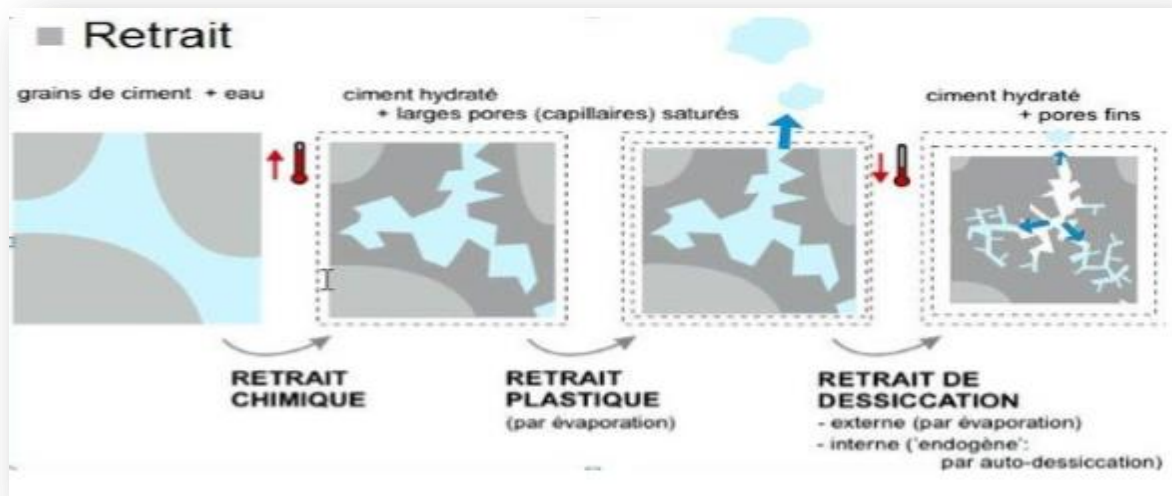


Figure I.3. Phénomène de retrait[9].

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[10].

I.3.2.2 Le retrait de séchage

Le retrait de séchage est la réduction de volume causée principalement par la perte d'eau pendant le processus de durcissement. Le retrait de séchage est généralement l'aspect le plus critique à l'égard de la compatibilité déformationnelle d'une réparation. Le retrait de séchage est cette contraction que subit le béton lorsque son contenu en eau s'évapore vers l'extérieur

Chapitre I Synthés bibliographie

(H.R béton > H.R 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 $\mu\text{m/m}$. [10].

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 [11]

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

I.3.2.4 Le retrait thermique

Le retrait thermique est lié au retour à la température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition du phénomène de fissuration. Ce type de retrait s'étend de quelques dizaines heures, jusqu'à quelques semaines après la mise en œuvre. Sa durée est dépendante de la nature des éléments en béton considérés. Toutefois, dans le cas des rechargements minces où leur épaisseur est limitée à quelques centimètres, la chaleur peut se dégager vite à l'extérieur pendant que le matériau est encore déformable. L'effet du retrait thermique peut être négligeable dans ce cas [12].

I.3.3. Fluage

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

Le fluage est défini comme la déformation dans le temps causé par une charge constante. Selon divers auteurs, le matériau de réparation doit généralement posséder un très faible potentiel de fluage, sauf si le matériau de réparation est sollicité à la traction, le fluage dans ce cas peut être bénéfique, car il peut compenser ou réduire l'effet négatif du retrait dans le matériau de réparation[14].

I.3.4. Dilatation thermique

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

Un écart significatif entre les coefficients de dilatation thermique du matériau de réparation et du béton d'origine engendre, sous sollicitation thermique, des contraintes internes dans la réparation, notamment à l'interface. L'intensité des contraintes dépend de la variation de température et de l'importance de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux. La nature cyclique des sollicitations thermiques et le taux de variation de température sont deux facteurs pouvant accélérer le processus de dégradation[15].

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

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

Chapitre I Synthés bibliographie

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

Dans le second cas, l'expansion causée par la cristallisation contrôlée d'étrangéité va compenser la déformation de retrait. Bien sûr, minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dont la porosité est très fine. Mais cela n'est possible qu'avec des bétons de faible rapport eau/ciment et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition. Or ce sont des matériaux susceptibles de développer une auto -dessiccation très importante et conséquemment un retrait endogène important. Le retrait total (endogène plus séchage) ne serait donc probablement pas beaucoup plus faible et des problèmes de fissuration au jeune âge pourraient être créés[16].

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation. Cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction.[16].

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

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

Tableau I.1. Exigences de performance pour les réparations structurelles et non structurelles[17].

Caractéristique de performance	Exigence			
	Structurale		Non structurale	
	Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
Résistance à la compression	≥45Mpa	≥25Mpa	≥15Mpa	≥10Mpa
Retrait/expansion empêchés	Contrainte d'adhérence après essai			Aucune exigence
	≥2.0 Mpa	≥1.5Mpa	≥0.8Mpa	

Chapitre I Synthés bibliographie

Module d'élasticité	≥ 20 Gpa	≥ 15 Gpa	Aucune exigence	
Absorption capillaire	$\leq 0.5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-0.5}$		$\leq 0.5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-0.5}$	Aucune exigence

Le **tableau I.2** indique les exigences générales relatives au matériau de réparation afin d'éviter une inadéquation des propriétés lors de la réparation du béton structural. En conclusion, accorder une priorité élevée à la compatibilité entre le matériau de réparation et le substrat conduira à de bonnes décisions en matière de sélection du matériau [13], [18].

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

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

I.6 Les constituants d'un mortier de sable

Le mortier à base de mélange de sable se compose de ciment, de sable, de poudre de marbre ainsi que d'adjuvants.

I.6.1. 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.6.2.Le sable

Le sable C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables reviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière[20].

I.6.2.1.Sable alluvionnaire

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

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

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

- $1.8 \leq MF \leq 2.2$; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2.2 \leq MF \leq 2.8$; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2.8 \leq MF \leq 3.2$; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations[21].

I.6.2.2. Sable calcaire

Le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement

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

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux [22].

I.6.2.3. Sable de dune

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine et très serrée[22].

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[23] .

I.6.3.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[23].

I.7. L'effet de type de sable sur les performances des mortiers

I.7.1 Résistance à la compression

Brahim NÉCIRA [21] à étudier l'influence de différents types de sables (sable alluvionnaire, sable calcaire et sable de dune) sur les propriétés de la pâte et du mortier autoplaçant. Les résultats trouvés montrent que la combinaison granulaire de 60%SA + 40%SC donne la meilleure compacité, puis celle de 80%SA + 20%SD et 80%SA + 20%SC. D'autre part, les résultats de l'effet de type de sable sur la résistance après 28 jours présentés dans la figure I.4 montrent que le mortier à base de mélange 80%SC + 20%SA présente une résistance à la compression maximale de l'ordre de 47 MPa comparativement aux autres mélanges.

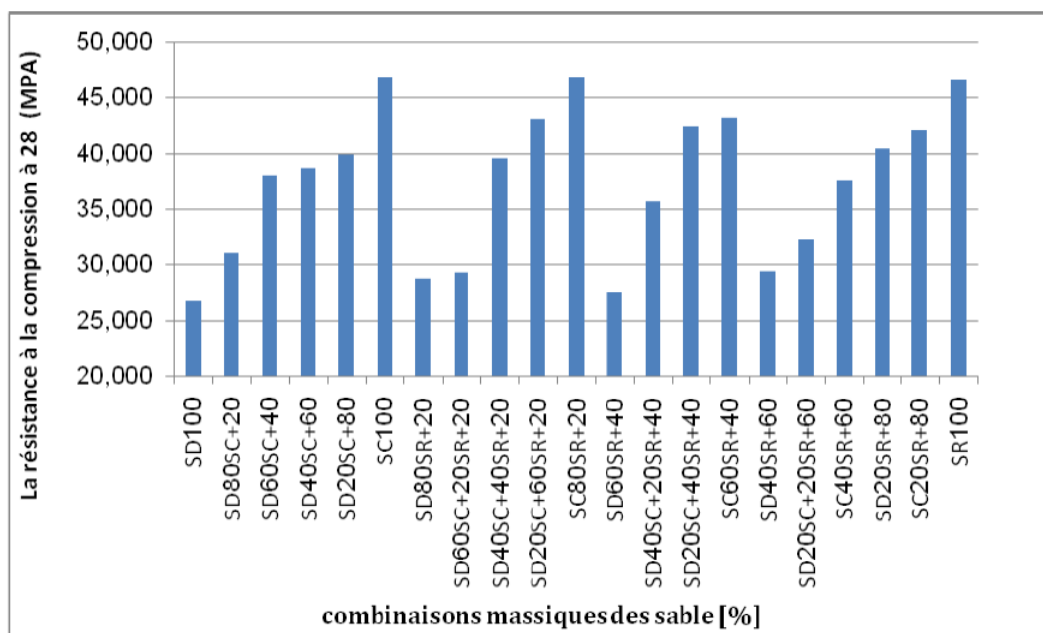


Figure I.4 : Effet des types de sables sur la résistance à 28 jours des MAP

Yamina et al. [24] ont montré que l'ajout de 40% à 50% de sable concassé au sable de dune a donné lieu à une augmentation de la résistance mécanique du mortier et du béton.

Douara Taha-Hocine et al [25] ont conclu que la substitution partielle de SA par SC et SD ne doit pas dépasser 20% et 10% respectivement avec la nécessité de corriger la quantité d'eau de gâchage et/ou la quantité du superplastifiant afin d'obtenir un MAP.

Chapitre I Synthés bibliographie

M.F. Lakhdari, et al [26] 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.

B.Benabed et al[27] 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 **T. Bouziani et al**[28] 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.2.2 Retrait

Grassl et al [29] 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**[30] 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.8. Conclusion

La synthèse bibliographique a montré que pour réussir une réparation, on doit bien comprendre l'origine et les causes des désordres, réaliser une bonne préparation de la surface et appliquer un produit de réparation qui doit satisfaire les conditions de compatibilité avec le béton existant. Les principaux aspects de la compatibilité incluent la stabilité dimensionnelle, les propriétés chimiques, électrochimiques et de perméabilité du matériau de réparation et du substrat en béton. Le paramètre le plus important est la compatibilité dimensionnelle du matériau de réparation avec le béton du substrat qui dépend de la composition du matériau de réparation. Le sable est l'un des composants qui influe sur les performances des mortiers tel que les résistances mécaniques, le module d'élasticité, la porosité, le retrait,

Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentales

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons exposer tous les essais de caractérisation effectués pour l'identification des matériaux utilisés dans notre étude (ciment, poudre de marbre, sable alluvionnaire, sable de dune, sable de calcaire). Par la suite les différents essais expérimentaux. A l'état frais la caractérisation est effectuée par des essais d'étalement au mini-cône, et à l'état durci des essais physico-mécaniques (auscultation sonore, résistance à la compression par flexion, retrait, absorption d'eau par capillarité et porosité totale).

Notons que tous les essais ont été effectués au laboratoire de génie civil.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Sables

Dans notre travail, sont utilisés trois types de sables : un sable de dune dénoté par SD, un sable d'alluvionnaire dénoté par SA et un sable calcaire dénoté par SC. Le sable de dune utilisé est un sable de dunes provenant de la région nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord). C'est un sable fin d'origine éolienne. Le Sable alluvionnaire est un sable de granulométrie 0/5 provenant de la rivière de Oued M'zi de Laghouat.

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

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

a) Caractéristiques physiques

i. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF EN 933-1[31], qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension supérieure ou égale à 80 mm, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

Les résultats d'analyse granulométrique des sables utilisés sont donnés dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Analyse granulométrique des sables.

SA		SD		SC	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Tamis (mm)	Tamisât (%)	Tamis (mm)	Tamisât (%)
4	96.97	1	99.92	4	99.98
2	88.05	0,8	99.65	2	89.87
1	78.18	0,5	92.75	1	67.68
0,5	49.68	0,315	63.71	0,5	48.68
0,25	5.31	0,25	42.37	0,25	32.25
0,125	0.85	0,2	30.41	0,125	21.34
Fond	0.37	0,16	18.54	Fond	0.46
		0,125	12.06		
		Fond	2.5		

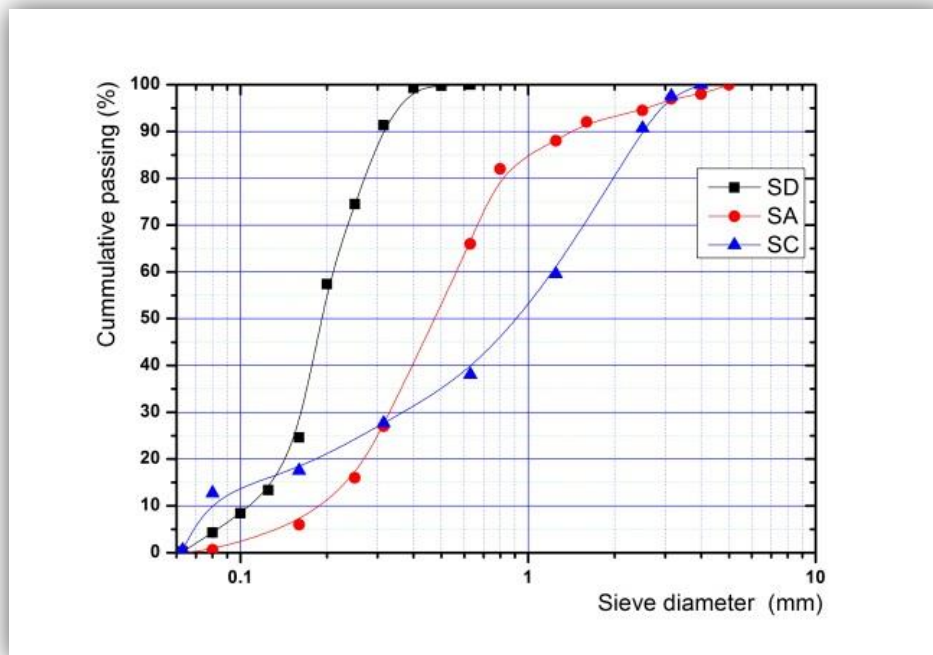


Figure II.1. Courbes granulométriques des trois types de sable.

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

- **Module de finesse**

Le module de finesse d'un sable selon la norme NF EN 933-1[31] 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)

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

M_f : Module de finesse.

Tableau II.2. Modules de finesse des sables

Type de sable	SA	SD	SC
Module de finesse M_f	2.81	1.53	2.4

Tableau II.3. Classement des sables.

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

D'après les courbes d'analyse granulométrique et le tableau II.2 on peut conclure que :

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

ii. Masses volumiques

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

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

La méthode de pycnomètre est définie selon la norme NF P 94-054 [32]. Les étapes d'essai sont comme suit :

Poser le pycnomètre sur une balance en ajustant la tare.

- Remplir le pycnomètre de l'eau jusqu'au repère, puis le peser soit (M_0), Par la suite vider le pycnomètre.
- Introduire la matière à tester (sable) dans le pycnomètre puis le peser (M_1).
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau. Et à la fin peser l'ensemble eau + matière (M_2).

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

γ_{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.4. Masses volumiques absolues.

Type de sable	SA	SD	SC
γ_{abs} (kg/m^3)	2607,4	2614,9	2627,3

- **Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (tous vides inclus). Elle est donnée selon la norme EN 1097-3 [33] par la formule suivante :

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

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

γ_{app} : Masse volumique apparente (kg/m^3).

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.5. Masses volumiques apparentes.

Type de sable	SA	SD	SC
γ_{app} (kg/m^3)	1648	1521	1538

iii. Compacité

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

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

C_p : Compacité (%).

γ_{app} : Masse volumique apparente (kg/m^3).

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

Tableau II.6. Compacité des sables

Type de sable	SA	SD	SC
C_p (%)	63,20	58,17	58,54

iv. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme EN 1097-6 [34]

Tableau II.7. Absorption d'eau des sables.

Type de sable	SA	SD	SC
Absorption (%)	0.49	1	4

v. **Equivalent de sable**

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). Cette essai est définie selon la norme NF P 18-540[35] Calculer « ES » en remplaçant H_1 et H_2 dans la formule suivante :

$$ES_v = \frac{H_2}{H_1} * 100\%$$

$$ES_p = \frac{H'_2}{H_1} * 100\%$$

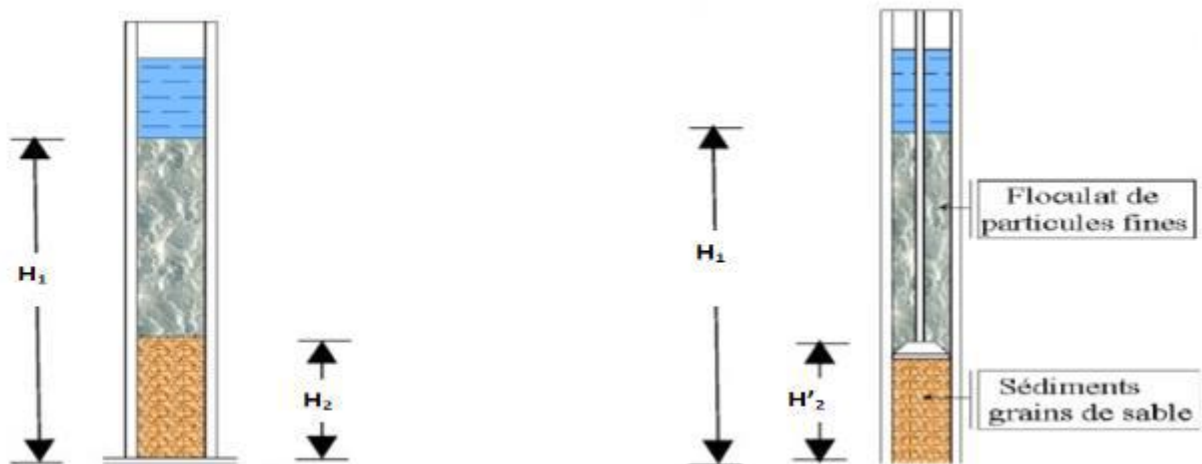


Figure II.2. Essai d'équivalent de sable.

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

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.8. Valeurs d'équivalent de sable.

Type de sable	SA	SD	SC
ES_v	96	93	72
ES_p	82	82	63

Tableau II.9. 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.
$65 \leq ES_v \leq 75$	$60 \leq ES_p \leq 70$	« Sable légèrement argileux » de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$75 \leq ES_v \leq 85$	$70 \leq ES_p \leq 80$	« Sable propre » à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$ES_v \geq 85$	$ES_p \geq 80$	« 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.8 et II.9, on distingue que le sable dunaire et le sable d'alluvionnaire sont des sables très propre, et le sable calcaire est un sable légèrement argileux.

II.2.2 Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude expérimentale. Le ciment utilisé est un ciment de type de **CEM I 42.5 R** (Beskria) provenant des usines de Biskra, confectionné et mis en sacs de 50 kg. Mélangé avec une poudre de marbre noté par (MP). Leurs propriétés chimiques et physiques sont classées dans le **tableau II.10**

Tableau II.10. Composition chimique et propriétés physiques de ciment et MP[36].

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

a) Caractéristiques physiques du ciment

- i. **Finesse de ciment** : La finesse d'un ciment se caractérise par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en 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**[37].

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

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

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

Sp : Surface spécifique (cm^2/g)

K : Constante de l'appareil.

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

t: Temps mesuré en seconde.

e: Porosité.

ρ : Masse volumique absolue (kg/m^3).

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**[38].

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**[38].Le **tableau II.11** présente les caractéristiques physiques du ciment.

Tableau II.11.Caractéristiques physiques du ciment.

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

b) Caractéristiques mécaniques du ciment

Les résultats de la résistance à la compression et la flexion du ciment sont présentés dans le tableau II.12

Tableau II.12. Classe vraie du ciment.

Résistances (MPa)	28 jours
Compression	49,19±2,35
Flexion	7,75±0,4

II.2.3 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.2.4 Adjuvant :

L'adjuvant utilisé dans notre travail est un superplastifiant haut réducteur d'eau « Sika Viscorete Tempo 12 », produit par « Sika El djazair » conforme à la norme EN 934-2 [39]. 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.3 Méthodes expérimentales

Les mortiers ont été confectionnés conformément à la norme ASTM C 305[40], avec un malaxeur de 5 litres de capacité (figure II.3).



Figure II.3. Malaxeur de capacité de 5 litres.

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.

Mortier auto plaçant: Le début du malaxage se fait par un malaxage des constituants sec (ciment + poudre de marbre + sables) pendant 60 secondes tout en malaxant à une vitesse définie comme une vitesse lente pour bien homogénéiser le mélange, ensuite 70% de l'eau de gâchage est ajoutée pendant 30 secondes. Après une minute et 30s, le super plastifiant et l'eau restante mélangés sont introduit régulièrement. Boukendakdji O. [41] a apporté que l'efficacité du SP est autant plus grande lorsqu'il est rajouté avec 30% d'eau. Le malaxage continu encore 2 minutes à grande vitesse, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules, le mélange doit reposer 90 secondes puis une autre 90 secondes à vitesse rapide. Ce qui fait en totale 7 minutes de malaxage. **La figure II.4.** illustre la séquence de malaxage.

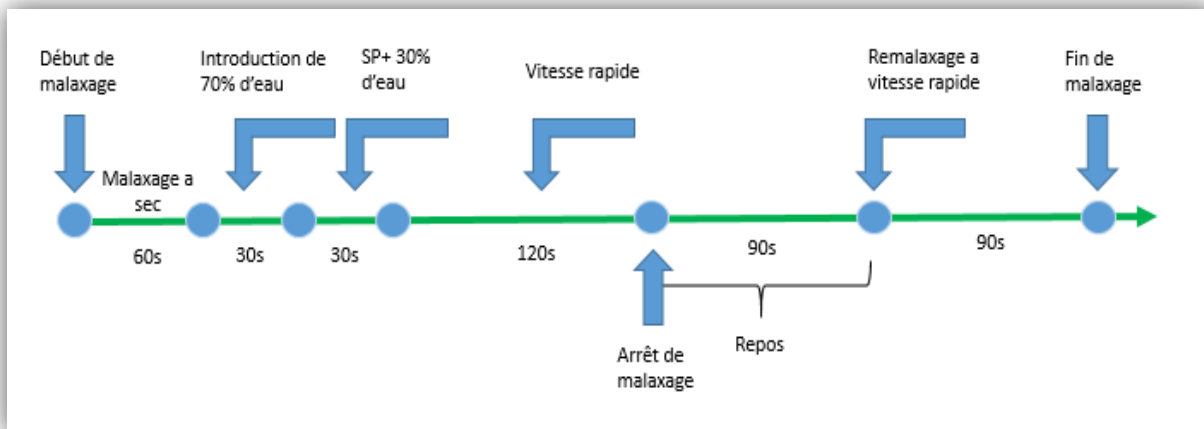


Figure II.4. Séquence de malaxage.

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

a) Étalement au mini cône

L'ouvrabilité des mortiers a été étudiée en utilisant un moule tronconique ($D=100\text{ mm}$, $d=70\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$). L'essai d'étalement consiste à remplir le mini cône placé sur une surface horizontale lisse, une fois le cône est soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire pour retenir la moyenne (figure II.5). Le diamètre de la galette du mortier doit être compris entre 260 et 300 mm pour avoir un mortier autoplaçant.

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

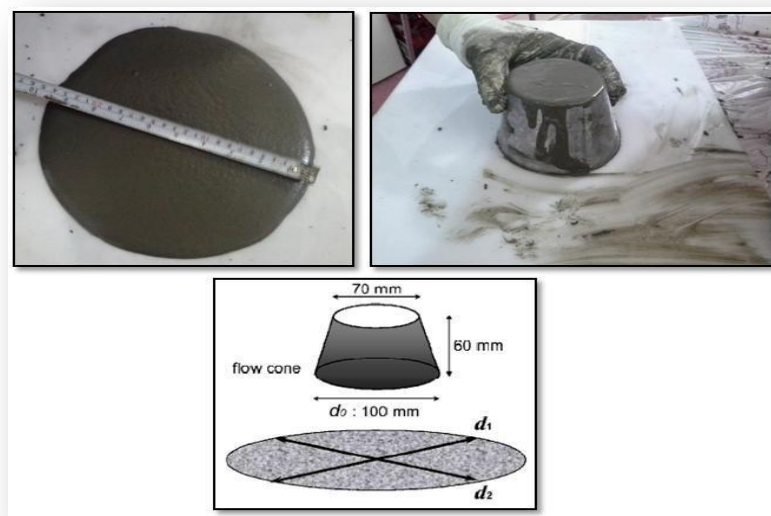


Figure II.5. Essai d'étalement au mini cône.

II.3.3 Essais effectués sur les mortiers a l'état durci

a) Confection et cure des éprouvettes

Les mortiers ont été coulés dans des moules prismatiques (4x4x16cm³). Les moules contenant les spécimens ont été couverts de film plastiques et stockés dans l'environnement du laboratoire. Après 24 heures de confection, les échantillons ont été démoulés soigneusement et conservés jusqu'à l'âge de l'essai dans l'environnement suivant :

- A une température de (21 ± 2) ° C et (60 ± 10) % HR pour l'essai de retrait.
- A la chambre de conservation de (21 ± 2) ° C et (90 ± 5) % HR pour les autres essais (flexion, compression ; module d'élasticité, porosité et absorption d'eau par capillarité).

b) Caractérisation physico-mécanique des mortiers élaborés

i. Auscultation sonique

L'essai non destructif ultrasonique est la technique utilisée fréquemment pour estimer la qualité de béton ou mortier et le module d'élasticité dynamique selon la norme BS EN 12504-4 [42] Cette méthode est basée sur la mesure de la vitesse de la propagation d'onde qui est en rapport avec les propriétés mécaniques et, plus directement, avec le module d'élasticité dynamique (figure II.6.).

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 :

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

Avec :

E_d : Module d'élasticité dynamique (GPa).

ρ : Masse volumique (kg/m³).

ν : Coefficient de poisson.

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

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

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



Figure II.6. Appareil d'auscultation dynamique (ultra sonique).

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

L'essai est réalisé selon la norme **NFEN 196-1**[43] par un dispositif de flexion trois points (figure II.7). 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 $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Figure II.8.). 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.

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

La vitesse de chargement a été réglée à 50N/s jusqu'à la rupture. La charge à la rupture F_f est lue sur le cadran de la presse et la résistance à la traction par flexion est calculée par la relation suivante :

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

R_f : Résistance de flexion (MPa).

F_f : Charge de rupture (N).

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

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



Figure II.7. Dispositif de l'essai de flexion trois points.

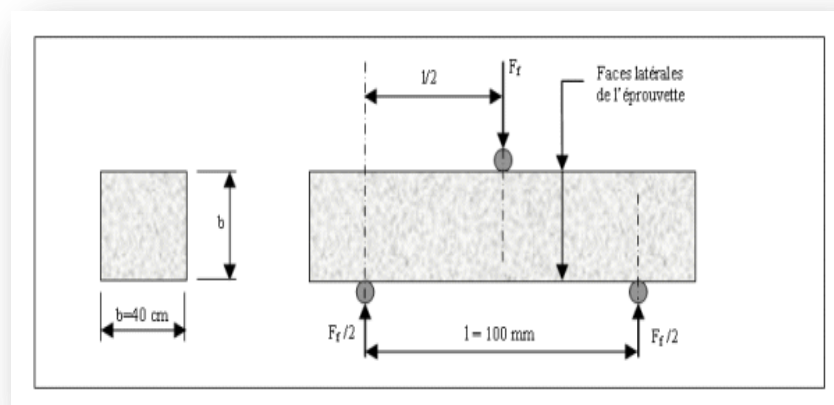


Figure II.8. Schémas de l'essai de traction par flexion.

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme **NFEN 196-1**[43] sur les demi prismes des éprouvettes obtenus après rupture en flexion, comme indiqué sur la figure II.9 et figure II.10.

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

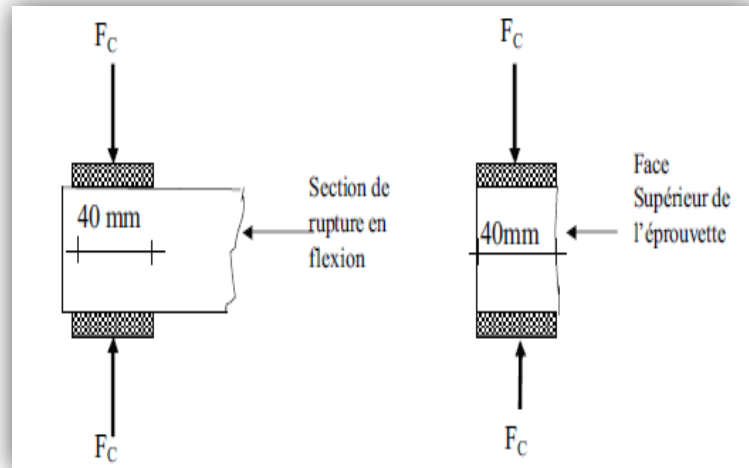


Figure II.9. Schémas de l'essai de compression.

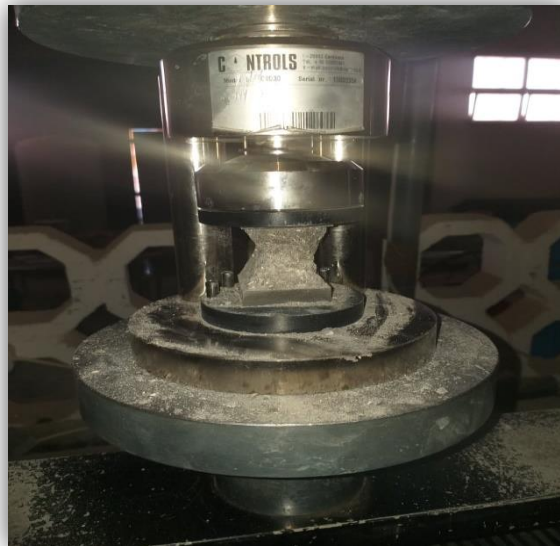


Figure II.10. Dispositif de l'essai de compression.

- iii. **Variations dimensionnelles (retrait)**

L'essai est réalisé selon la norme **EN 12617-4**[44] sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. La mesure du retrait est effectuée à l'aide d'un réfractomètre muni d'un comparateur

CHAPITRE II Matériaux Et Méthodes Expérimentales

digital de division 10^{-3} (figure II.11.). Après démoulage, on initialise le comparateur à la valeur zéro à l'aide d'une tige étalon, et ensuite les éprouvettes munies de plots à leurs extrémités sont placés en position verticale sur le réfractomètre et la lecture $l(t_0)$ est prise. Après cela, les lectures sont effectuées au cours du temps.

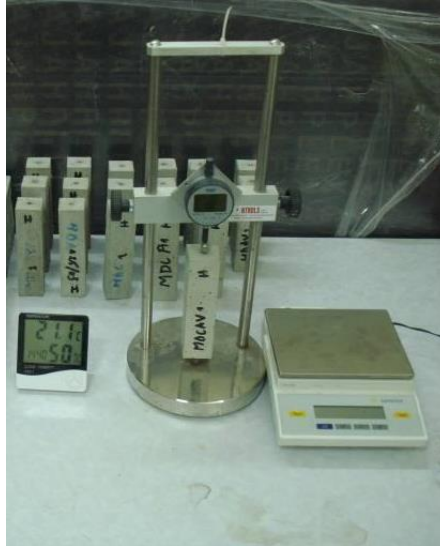


Figure II.11 : Appareillage pour la mesure du retrait.

Le changement de longueur doit être calculé par rapport à la lecture initiale $l(t_0)$ effectuée après 24 h. La déformation de déplacement doit être exprimée comme la variation de longueur (ΔL) sur la longueur de repère (L), exprimée en mm / m, en 0,001 mm / m près (figure II.12).

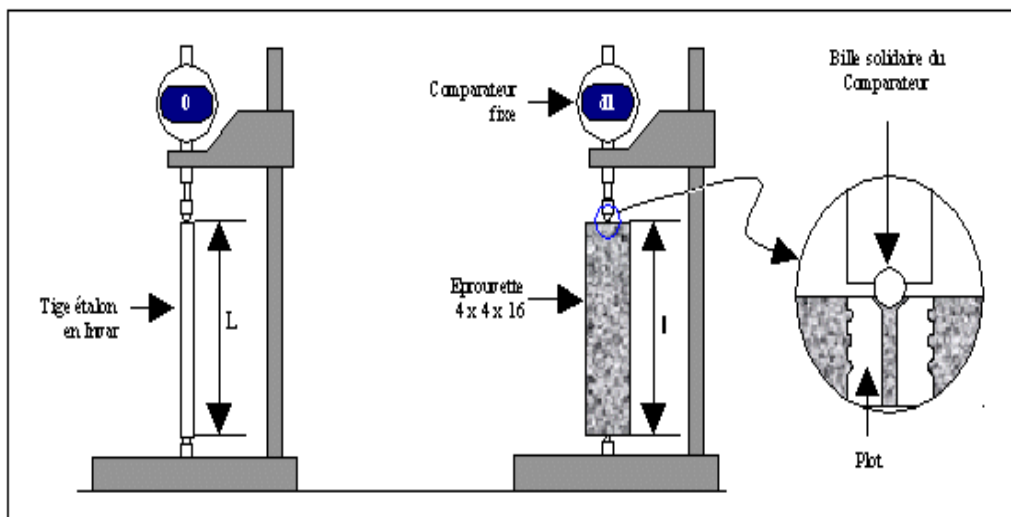


Figure II.12 : Schémas de l'essai de retrait.

Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ 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.

iv. Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de caractériser la capacité d'un mortier à absorber et transmettre l'eau par capillarité. Dans cette étude, l'essai est effectué sur des échantillons prismatiques de $4 \times 4 \times 16$ cm³ selon la norme **EN 1015-18**[45] préalablement séchés dans le four à environ 80°C jusqu'à poids constant. Ils sont ensuite placés dans un bac de sorte que leur surface inférieure jusqu'à 5 mm soit en contact avec l'eau (figure II.13). L'étanchéité latérale est assurée au moyen d'un ruban adhésif pour obtenir un écoulement unidirectionnel (figure II.20). Le poids des échantillons est mesuré à différents moments : 0 ; 15 ; 30 ; 60 ; 120 ; 240 ; 360 ; 480 et 1440 min. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un chiffon. L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué après 28 jours de durcissement.

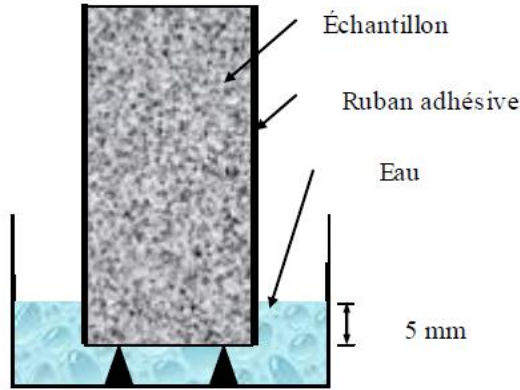


Figure II.13. Schéma d'essai d'absorption d'eau par capillarité.

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

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

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

M : Quantité d'eau absorbé (g).

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

t : Durée d'absorption (min).



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

Figure II.14. Protection des éprouvettes par un film plastique adhésif.

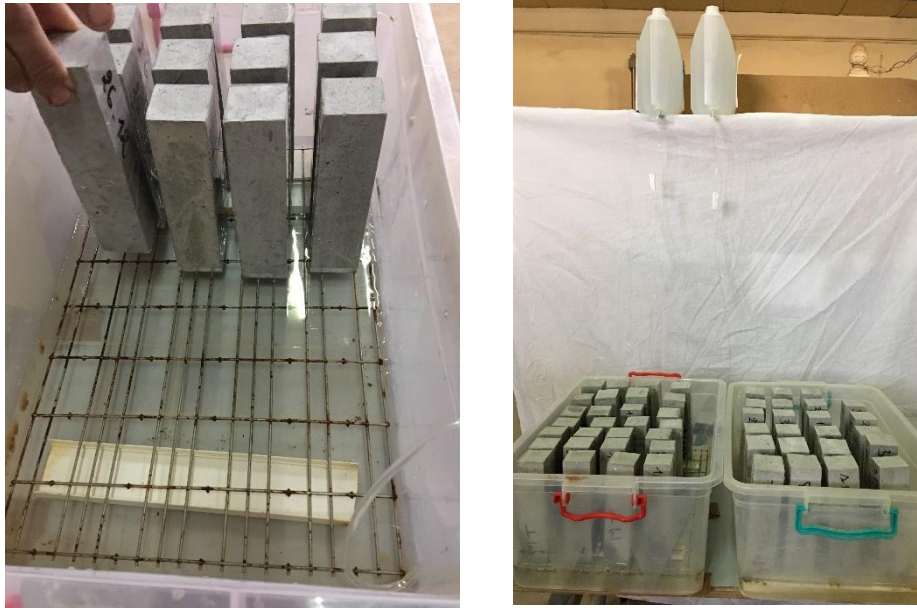


Figure II.15. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

v. Porosité totale

La porosité est définie comme le rapport (V_v/V_t) avec V_v est le volume occupé par les vides et V_t est le volume total du mortier. Pour chaque mortier, des éprouvettes cubiques de (40x40) mm² ont été utilisées pour déterminer la porosité selon les spécifications de la norme **ASTM C642**[46].

Les éprouvettes cubiques sont immergées dans l'eau pendant 24 heures (figure II.16.a), après elles sont séchées dans une étuve à 80°C (figure II.16.b).

La porosité peut être déterminée par la relation suivante :

$$P = \frac{M_{sat} - M_s}{V_t}$$

Avec :

P : Porosité totale.

M : masse saturée

M : masse sèche

V_t : Volume total du mortier.

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

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



Figure II.16. Saturation et séchage des éprouvettes cubiques pour l'essai de la porosité totale

Chapitre III Résultats et discussion

III.1 Introduction

Les chiffres alarmants rapportés par différentes structures, impliquées dans le secteur de la construction, concernant surtout l'état de dégradation constaté sur de nombreuses constructions, avec toutes les retombées socio-économiques que cela implique, dictent une prise en charge urgente du problème de la réparation et de la réhabilitation.

L'utilisation du sable des dunes ainsi que celui obtenu suite au concassage de roches calcaires offre une opportunité pour la préservation des sables rivières dont l'exploitation effrénée nuit de façon très sensible à l'environnement et représente une alternative prometteuse pour substituer le sable alluvionnaire dans l'élaboration des mortiers de réparation. Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence des paramètres de formulation (proportions des : sable alluvionnaire, sable dunaire, sable calcaire) sur la maniabilité, les résistances mécaniques, le module d'élasticité, la porosité et l'absorption d'eau par capillarité des mortiers de réparation autoplaçant. Ensuite, ils sont comparés avec un mortier autoplaçant à base de sable normalisé et un mortier pré à l'emploi.

Dans ce cadre 17 mélanges ont été réalisés comme le montre tableau III.1

III.2. Formulation des mortiers de réparation autoplaçant

Le but de formulation du mortier autoplaçant est d'optimiser le dosage en superplastifiant, en utilisant la méthode japonaise développée par Okamura développée à l'université de Kochi. Elle consiste à garder les rapports V_s/V_m et E/C constants ($V_s/V_m = 0,50$ et $E/C = 0,40$) et à faire varier le pourcentage du superplastifiant pour atteindre un étalement de 28 ± 2 cm. Les quantités des constituants du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide d'un programme Excel.

Le **tableau III.1** récapitule la composition des différents mélanges de MRAP, ainsi la composition du mortier pré à l'emploi MPE.

Chapitre III Résultats et discussion

Tableau III.1 Composition des différents mélanges.

N°	Proportions %			Désignation	Composition / L							Etalement (cm)	
	SA	SD	SC		SA (g)	SD(g)	SC(g)	C(g)	PM(g)	SP	E70		E30
1	100	0	0	M 100 0 0	1290,96	0,00	0,00	575,58	102,68	0,6 ± 1,25	192,40	82,46	28,5 ± 30
2	50	50	0	M 50 50 0	645,48	647,21	0,00				196,30	84,13	
3	0	50	50	M 0 50 50	0,00	647,21	650,43				209,33	89,71	
4	0	25	75	M 0 25 75	0,00	323,61	975,65				216,24	92,67	
5	75	0	25	M 75 0 25	968,22	0,00	325,22				200,28	85,83	
6	25	50	25	M 25 50 25	322,74	647,21	325,22				202,95	86,98	
7	0	100	0	M 0 100 0	0,00	1294,43	0,00				194,88	83,52	
8	25	75	0	M 25 75 0	322,74	970,82	0,00				195,01	83,58	
9	25	0	75	M 25 0 75	322,74	0,00	975,65				215,37	92,30	
10	0	75	25	M 0 75 25	0,00	970,82	325,22				202,16	86,64	
11	25	25	50	M 25 25 50	322,74	323,61	650,43				209,49	89,78	
12	75	25	0	M 75 25 0	968,22	323,61	0,00				196,63	84,27	
13	50	0	50	M 50 0 50	645,48	0,00	650,43				207,69	89,01	
14	0	0	100	M 0 0 100	0,00	0,00	1300,86				222,78	95,48	
15	50	25	25	M 50 25 25	645,48	323,61	325,22				200,85	86,08	
16	MSN				2250,00			601,48	107,30	0,52	201,37	86,30	29
17	MPE				2000						320		

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

III.3.1. Résistances mécaniques

A 7, 28 et 90 jours, les résistances mécaniques en flexion trois points des mortiers obtenus sur trois éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm³, et en compression obtenues sur six demi prismes issues des essais précédents.

III.3.1.1. Résistance à la traction par flexion

Les histogrammes illustrés dans les figures III.1, III.2, III.3 représentent la variation de résistance à la traction par flexion de différents mélanges, de mortier à base de sable normalisé MSN et de mortier pré à l'emploi MPE à 7,28 et 90 jours. En analysant les résultats de ces figures, nous pouvons déceler les constatations suivantes :

- Une augmentation de la résistance à la flexion de différents types des mortiers en fonction du temps à été remarqué. On note un développement de 72 à 98 % de la résistance à 7jours par rapport à sa résistance à 28jours.
- La meilleure résistance qui a été enregistré est pour le mortier M50050. On note une résistance de 7 ; 9 et 12,2 à 7, 28 et 90 jours, respectivement.
- Le mortier à base de sable normalisé présente des résistances à la flexion similaire au mortier M50050 à 28 et 90 jours.
- A 90 jours, les mélanges M252550 et M50050 ont donné des résistances comparables au mortier à base de sable normalisé MSN.
- La résistance à la flexion de différents mélanges des mortiers autoplaçant sont nettement supérieures à celles des mortiers à base de sable alluvionnaire (M10000) de 6% à 49% et de 10% à 47 % à 28 et 90 jours, respectivement. Ceci peut être dû d'une part à l'enchevêtrement des grains concassés calcaires, et d'autre part à la compacité du mélange. On outre, l'activité chimique des fillers de calcaire dans le sable de concassage peut entraîner une accélération de l'hydratation du ciment.

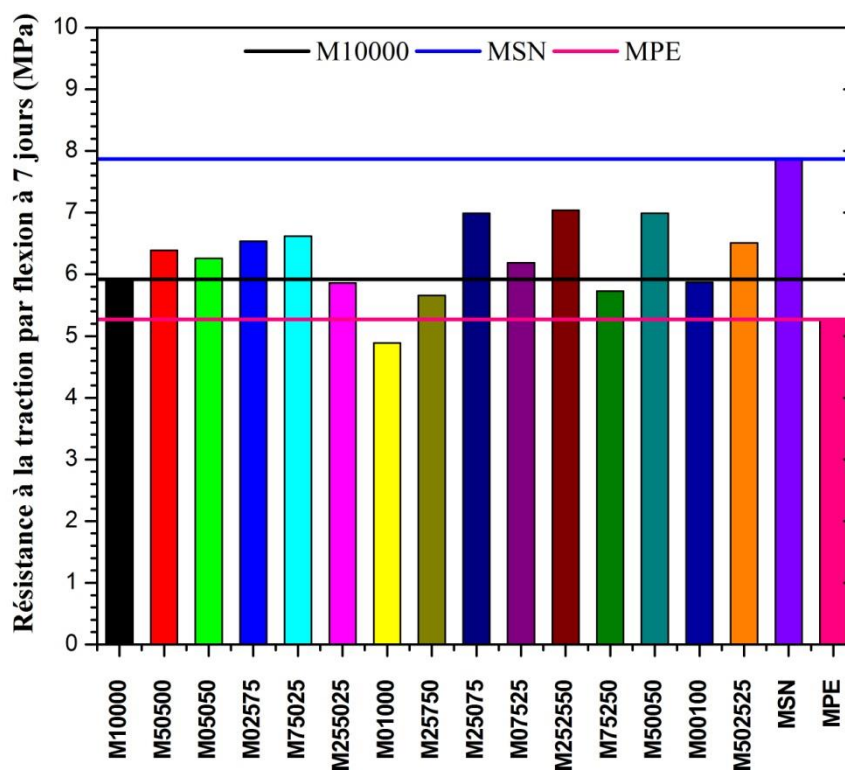


Figure III.1 : Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 7 jours

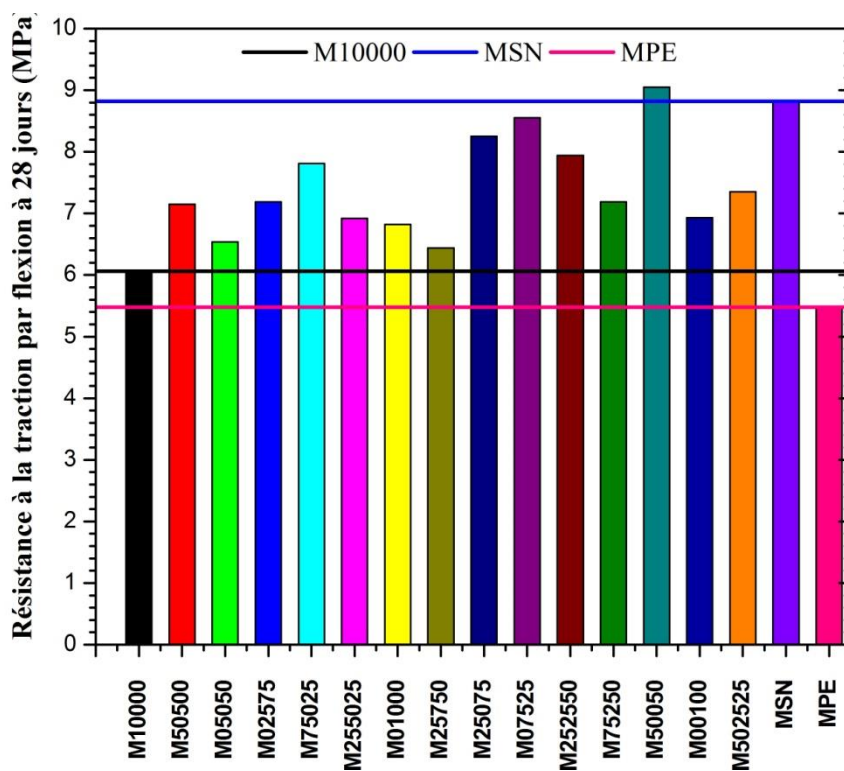


Figure III.2 : Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 28 jours

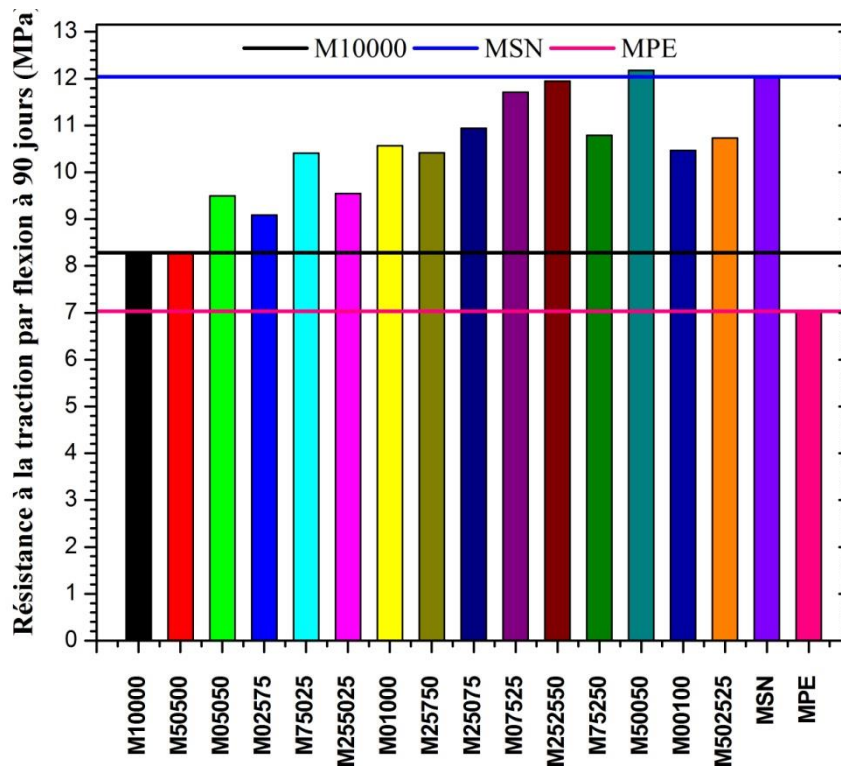


Figure III.3 : Résistance à la flexion de différents types des mortiers à 90 jours

III.3.1.2. La résistance à la compression

Les résultats représentés sur les figures III.4, III.5 et III.6 permettent de constater que la résistance augmente en fonction du temps pour tous les types de mortiers. Nous remarquons que le taux d'augmentation est important pendant les sept premiers jours, où le mortier gagne entre 76 à 94 % de sa résistance à 28 jours, une exception est remarquée pour la résistance de mortier à base de sable normalisé qui accuse un taux d'augmentation de 96%. A 90 jours, une augmentation de 5 à 22% par rapport à 28 jours a été remarquée pour tous les types de mortiers, à l'exception des mortiers M1 et M2 où on a constaté que la résistance à la compression reste pratiquement inchangée. Les mélanges de mortier M25075, M07525, M75250 et M00100 ont montré de meilleures résistances à la compression ($\cong 62$ MPa) par rapport à ceux M1000, MSN et MPE à 28 jours. Ceci peut être dû d'une part à l'enchevêtrement des grains concassés calcaires, et d'autre part à la compacité du mélange. On outre, l'activité chimique des fillers de calcaire dans le sable de concassage peut entraîner une accélération de l'hydratation du ciment. 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 structurale de classe R4. On peut noter aussi à partir de la même figure que la résistance la plus faible à 28 jours a été observée dans le mortier prêt à l'emploi MPE qui est de l'ordre de 29 MPa.

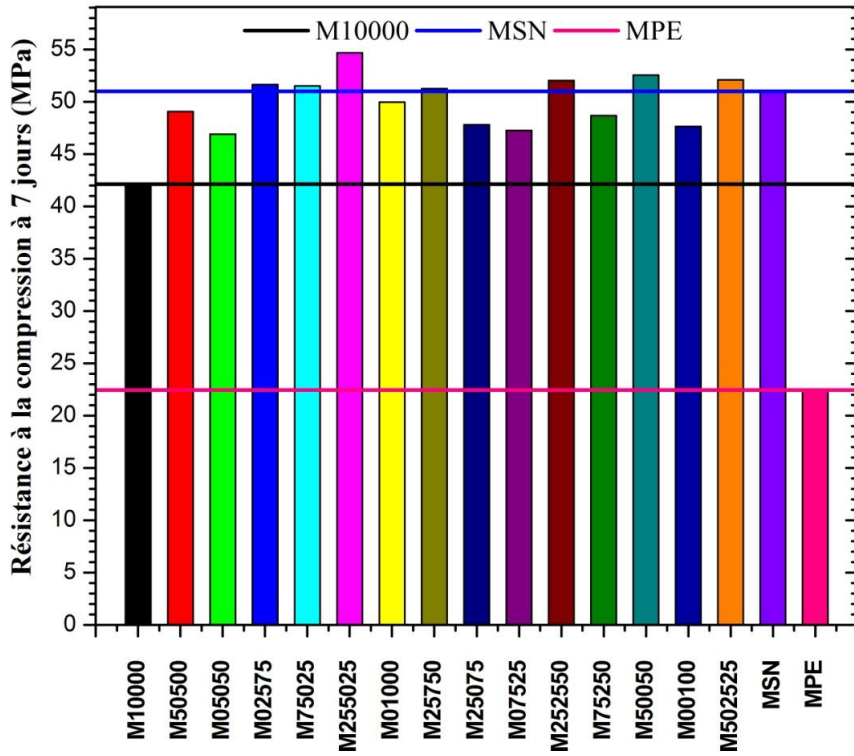


Figure III.4 : Résistance à la compression de différents types des mortiers à 7 jours

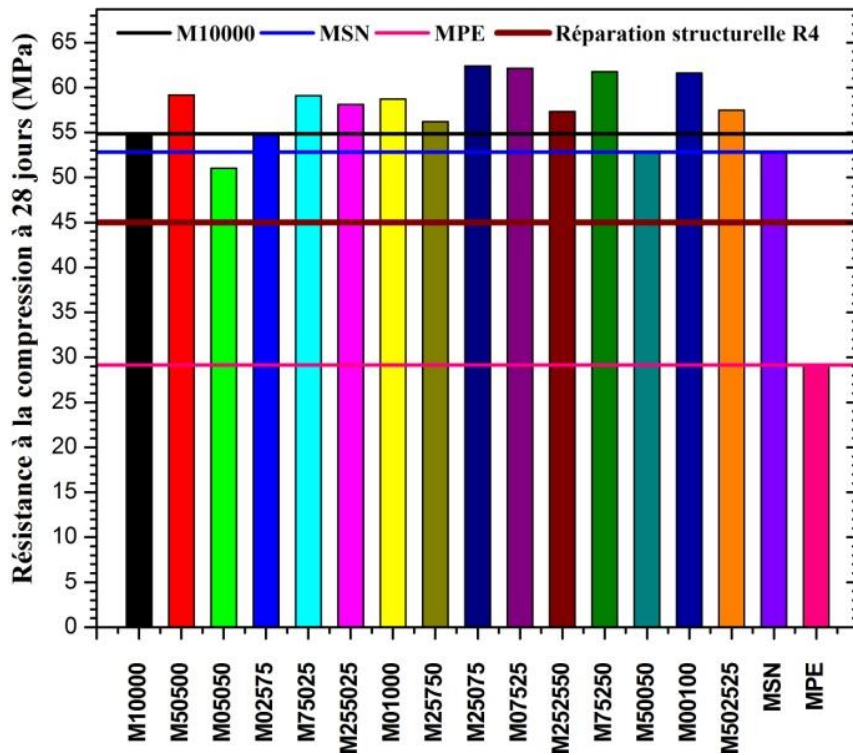


Figure III.5 : Résistance à la compression de différents types des mortiers à 28 jours

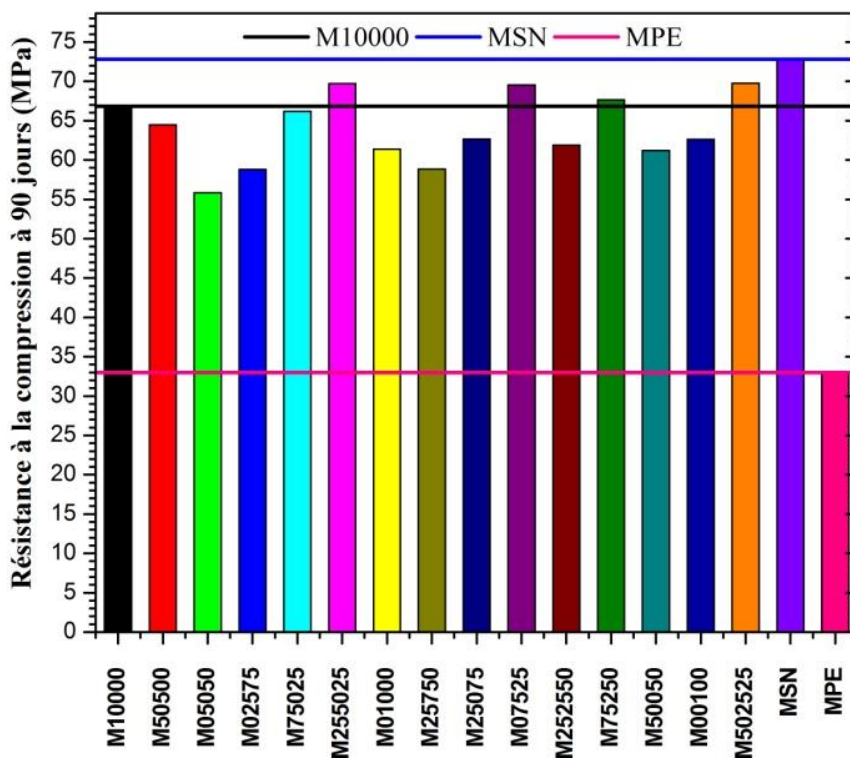


Figure III.6 : Résistance à la compression de différents types des mortiers à 90 jours

III.3.2. Le module d'élasticité dynamique(E_d)

Le module d'élasticité est l'un des facteurs le plus important de la compatibilité dimensionnelle entre le béton substrat et le mortier de réparation. L'essai d'auscultation sonore réalisé sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ permet de calculer la vitesse d'auscultation sonore et d'estimer le module d'élasticité dynamique. Les résultats obtenus à 7, 28 et 90 jours sont représentés par les figures III.7, III.8 et III.9. A l'âge de 7 jours comme le montre la figure III.7, tous les mélanges de mortier présentent pratiquement un module d'élasticité comparable à celles des mortiers M10000 et MSN, qui est de l'ordre de 30 GPa. Un développement de 80 à 97% de module d'élasticité à été observé à 7 jours par rapport à celle enregistré à 28 jours. Au-delà de 28 jours une légère augmentation à été remarqué à 90 jours de l'ordre de 10%.

D'une façon générale, les mélanges M10000, M50500 et M75025 présentent le plus grande module d'élasticité relativement aux autres mélanges. On remarque aussi que le plus faible module d'élasticité est enregistré par MPE. De toute façon, les modules d'élasticité trouvés à 28 jours avec les différents mélanges sont supérieurs à la valeur minimale (20 GPa) fixée par la norme EN 1504-3 pour les mortiers de réparation de classe R4.

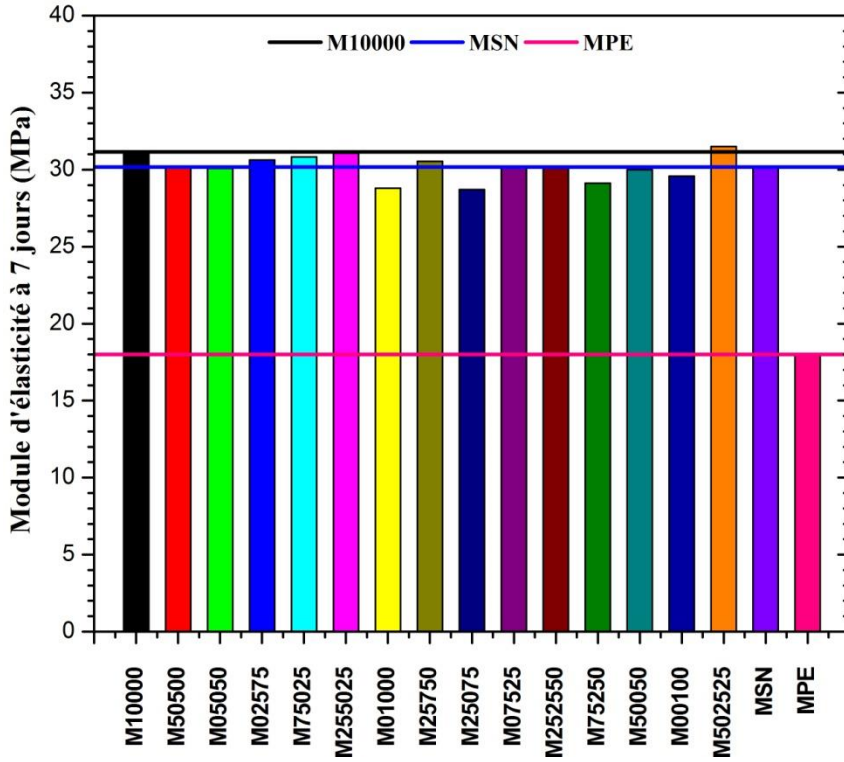


Figure III.7 : Module d'élasticité dynamique(E_d) de différents types des mortiers à 7 jours

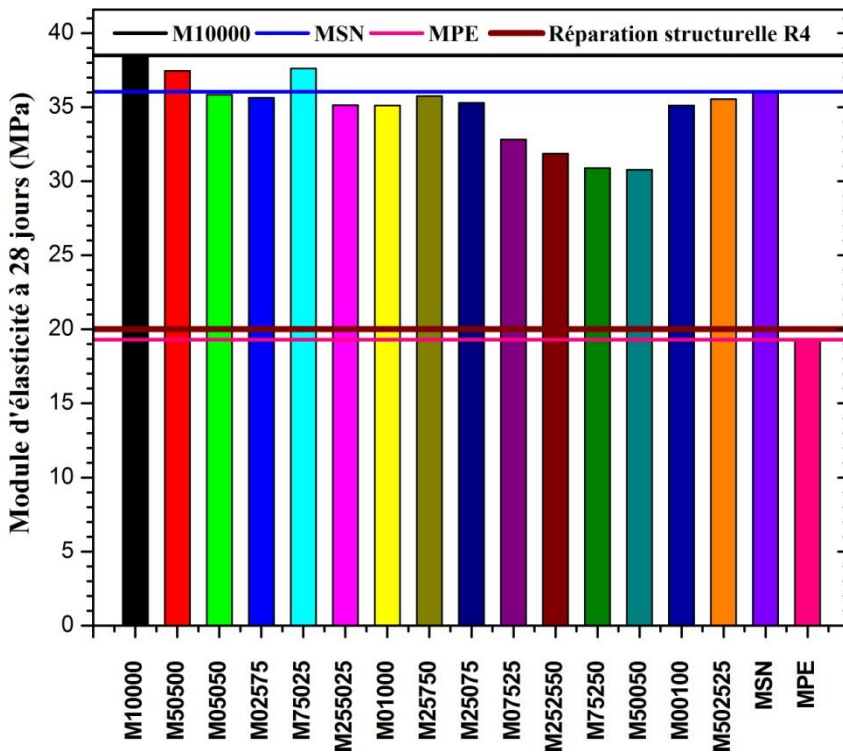


Figure III.8 : Module d'élasticité dynamique(E_d) de différents types des mortiers à 28 jours

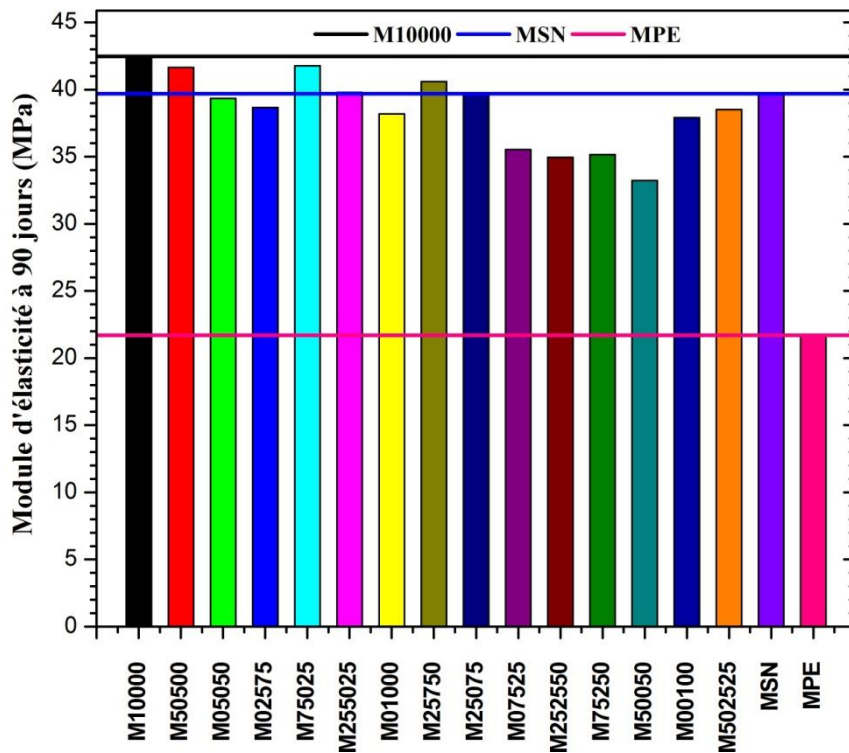


Figure III.9 : L'effet de pourcentage de sable sur le module d'élasticité dynamique(E_d) à 90 jours

III.4. Durabilité des mortiers élaborés

Plusieurs travaux de recherche ont mis en évidence que la valeur de la résistance en compression, indicateur traditionnel de la performance des bétons, n'est désormais plus suffisante pour évaluer la durabilité potentielle des bétons et pour sélectionner une formule devant satisfaire des critères relatifs à la durabilité. Les indicateurs de durabilité sont des paramètres qui apparaissent comme fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation considéré. Ces paramètres doivent être aisément quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur des éprouvettes ou sur des prélèvements, de façon reproductible et selon des modes opératoires bien définis. La porosité et l'absorption d'eau par capillarité sont des essais qui nous ont permis de déterminer le coefficient de la porosité et le coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Ces indicateurs de durabilité sont très importants pour appréhender le comportement des mortiers vis à vis de leur performance dans la protection des armatures du béton armé de la corrosion.

III.4.1. Porosité totale

La porosité totale dans un matériau cimentaire est l'un des indicateurs de la durabilité, pénétration de substances dans les bétons.

Une distribution granulométrique adéquate assure une faible porosité du squelette granulaire, ce qui se traduit éventuellement par une bonne performance du béton ou du mortier, et par conséquent améliore la durabilité.

Les figures III.10 et III.11 montrent la variation de la porosité des différents mortiers à 7 et à 28 jours. Chaque valeur représente la moyenne de porosité à partir de trois éprouvettes cubiques (4x4x4) cm³ avec un coefficient de variation inférieur à 7%. Comme le montre les figures III.10 et III.11 la porosité totale diminue de 6 à 34 % lorsque l'âge de durcissement s'étend de 7 à 28 jours. La faible porosité à 28 jours est enregistrée pour les mélanges M25750, M07525, M252550 et M502525 avec des valeurs de 8,48% ; 9,69 ; 10,70 et 10,84 respectivement.

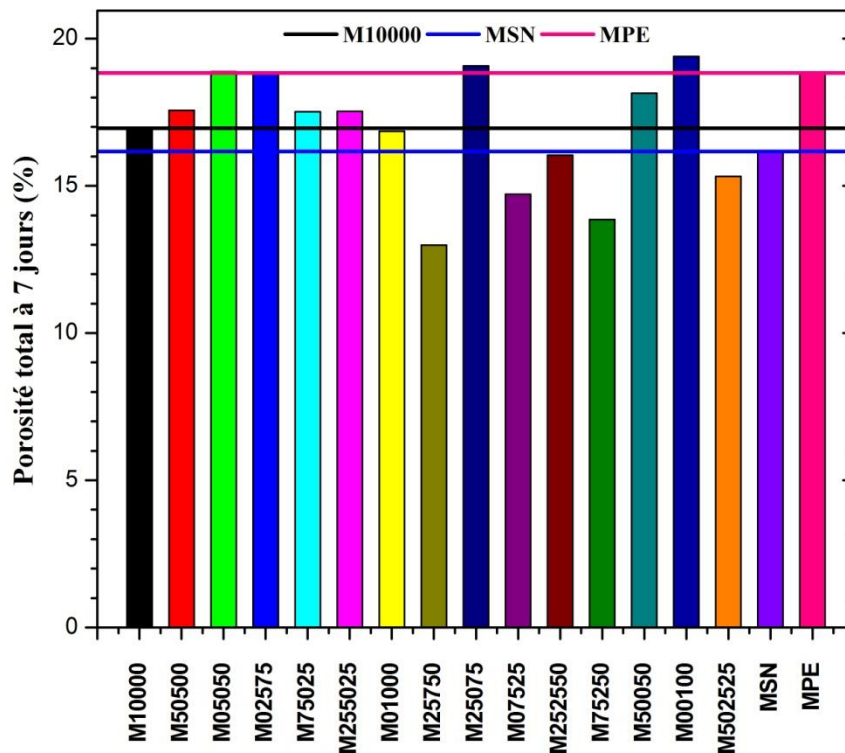


Figure III.10 : Etude comparative de la porosité totale des différents types de mortiers à 7 jours

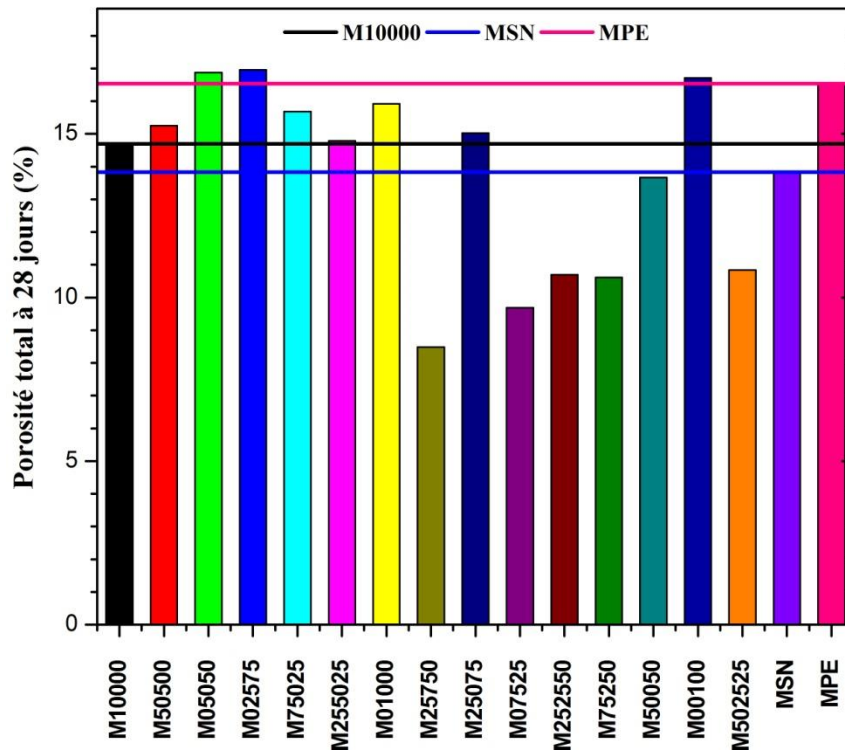


Figure III.11 : Etude comparative de la porosité totale des différents types de mortiers à 28 jours

III.4.2. 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.12 et III.13 illustrent la cinétique d'absorption d'eau cumulée par unité de surface C_c ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$), en fonction de la racine carrée du temps à 28 jours. Les figures montrent 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.

La pente de la droite de chaque courbe entre 0 et 180 min est prise comme coefficient de sorptivité des mortiers testés.

Le tableau III.2 et la figure II.13 présentent les valeurs de sorptivité C_c obtenues à partir des graphes de la figure II.12. Les résultats montrent que les coefficients d'absorption des mortiers M50500, M255025 et MPE à 28 jours sont nettement supérieurs par rapport aux autres formulations. Le mortier M502525 offre un coefficient d'absorption plus faible que les autres mortiers à 28 jours. Le mortier M502525 a une valeur de C_c de 0,0021 à 28 jours, ce qui est environ 32, 36, et 67% inférieur à ceux des mortiers M10000, MSN et MPE, respectivement. Cela peut être dû à la correction granulométrique du sable qui conduit à une

Chapitre III Résultats et discussion

amélioration la compacité de la matrice et par conséquent à une diminution la porosité capillaire. De plus, on constate que les mortiers M10000, M05050, M75025, MSN ont des valeurs similaires de coefficients de sorptivité de l'ordre de $0,0032 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

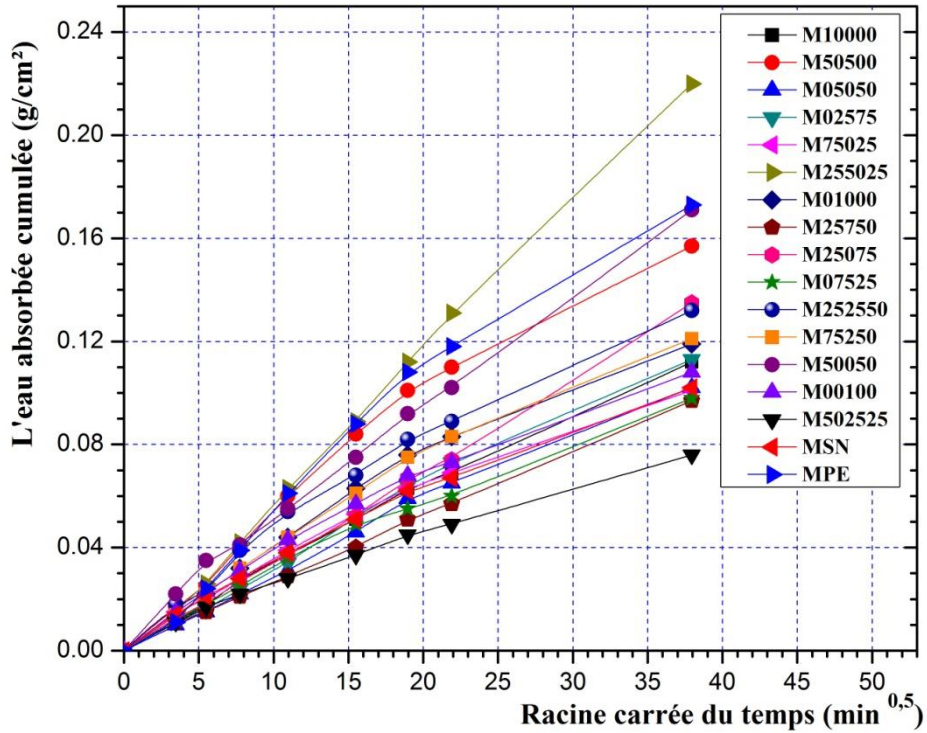


Figure III.12. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps à 28 jours.

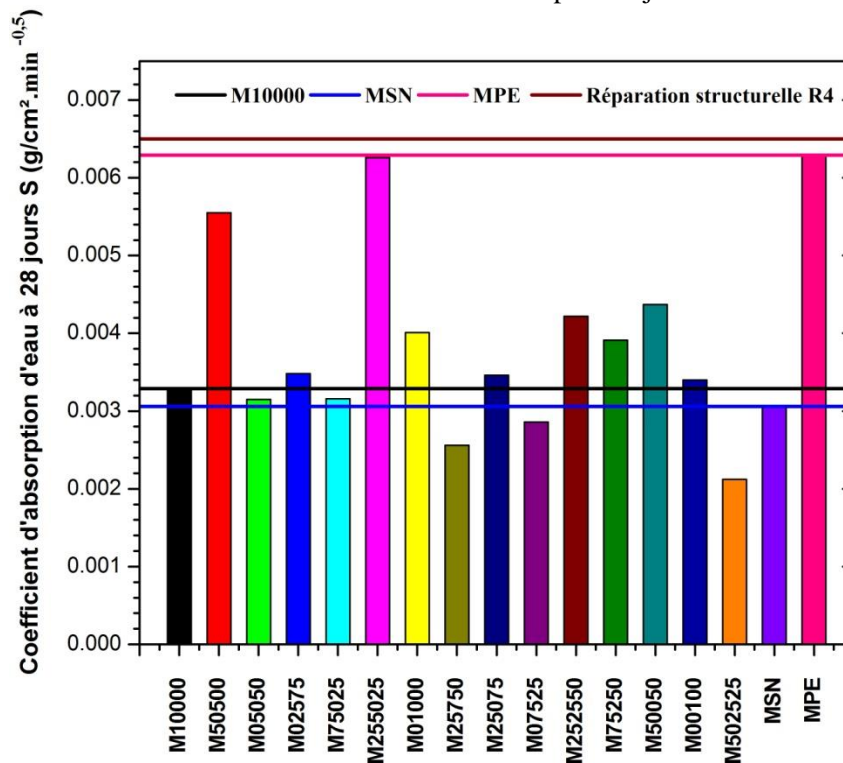


Figure III.13 : Les coefficients d'absorption d'eau de différents types des mortiers à 28 jours

Tableaux III.2 : Résultats des valeurs de sorptivité C_c

Mortier	Equation de la régression linéaire	Coefficient de corrélation R^2	Sorptivité C_c ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$)
M10000	$A_{ab} = 0,0033\sqrt{t}$	0,996	0,0033
M50500	$A_{ab} = 0,0056\sqrt{t}$	0,997	0,0056
M05050	$A_{ab} = 0,0032\sqrt{t}$	0,996	0,0032
M02575	$A_{ab} = 0,0035\sqrt{t}$	0,997	0,0035
M75025	$A_{ab} = 0,0032\sqrt{t}$	0,998	0,0032
M255025	$A_{ab} = 0,0063\sqrt{t}$	0,999	0,0063
M01000	$A_{ab} = 0,0040\sqrt{t}$	0,999	0,0040
M25750	$A_{ab} = 0,0026\sqrt{t}$	0,997	0,0026
M25075	$A_{ab} = 0,0035\sqrt{t}$	0,996	0,0035
M07525	$A_{ab} = 0,0029\sqrt{t}$	0,990	0,0029
M252550	$A_{ab} = 0,0042\sqrt{t}$	0,980	0,0042
M75250	$A_{ab} = 0,0039\sqrt{t}$	0,999	0,0039
M50050	$A_{ab} = 0,0044\sqrt{t}$	0,995	0,0044
M00100	$A_{ab} = 0,0034\sqrt{t}$	0,998	0,0034
M502525	$A_{ab} = 0,0021\sqrt{t}$	0,996	0,0021
MSN	$A_{ab} = 0,0031\sqrt{t}$	0,999	0,0031
MPE	$A_{ab} = 0,0063\sqrt{t}$	0,999	0,0063

III.5. Le retrait total

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

L'évolution du retrait des mortiers en fonction du temps représentée dans la figure III.14 confirme la tendance trouvée dans la plupart des matériaux cimentaires. En effet, la majorité du retrait ($\cong 70\%$) des mortiers confectionnés s'effectue à jeune âge (les deux premières

semaines). En outre, l'évolution du retrait en fonction de l'âge semble montrer la même allure pour tous les mortiers confectionnés.

La figure III.15, donnant la variation du retrait en fonction du type de mortier à 28 jours. Les résultats trouvés mettent en évidence de façon assez claire l'influence du mélange de sable sur le retrait. A 28 jours, les mortiers M25075, M252550, M50050 et M00100 présentent un retrait relativement faible de l'ordre de 1030 $\mu\text{m}/\text{m}$. ce qui est environ 2,3 ; 3,3 et 27% inférieur à celui des mortiers M10000, MSN et MPE. Cela peut être dû à la correction granulométrique du sable qui conduit à une amélioration la compacité de la matrice et par conséquent à une diminution la porosité. Nous constatons aussi que le mortier à base du sable dunaire-calcaire M05050 a affiché une valeur du retrait de l'ordre de 1257 $\mu\text{m}/\text{m}$, qui est supérieur à celui des mortiers M10000, MSN de 18,5%.

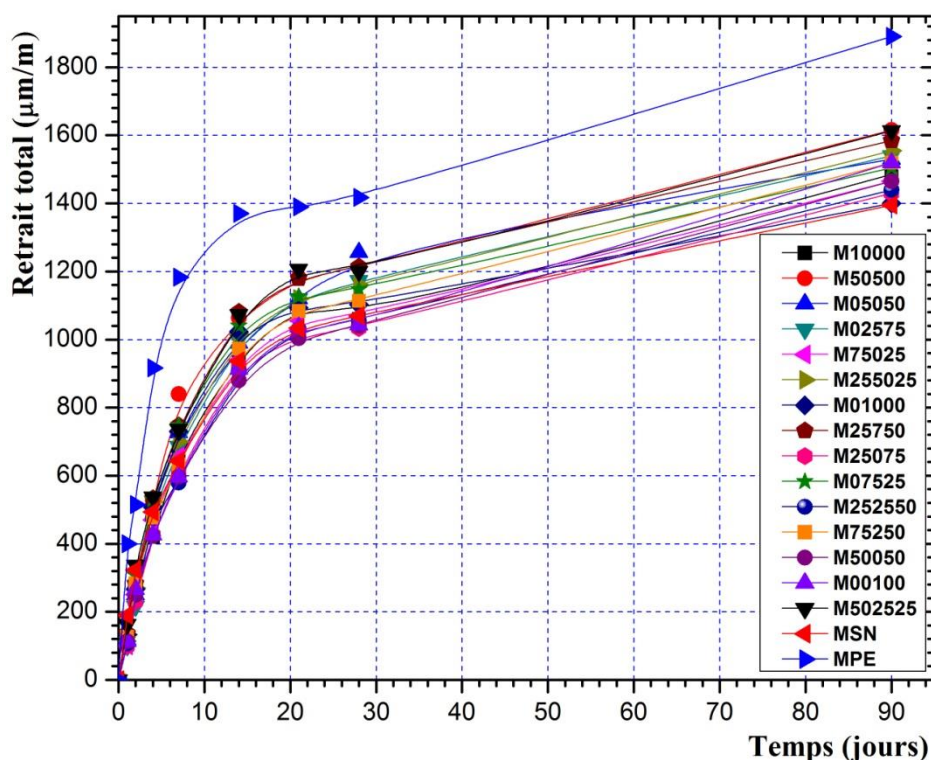


Figure III.14. Evolution du retrait en fonction de temps de différents types des mortiers

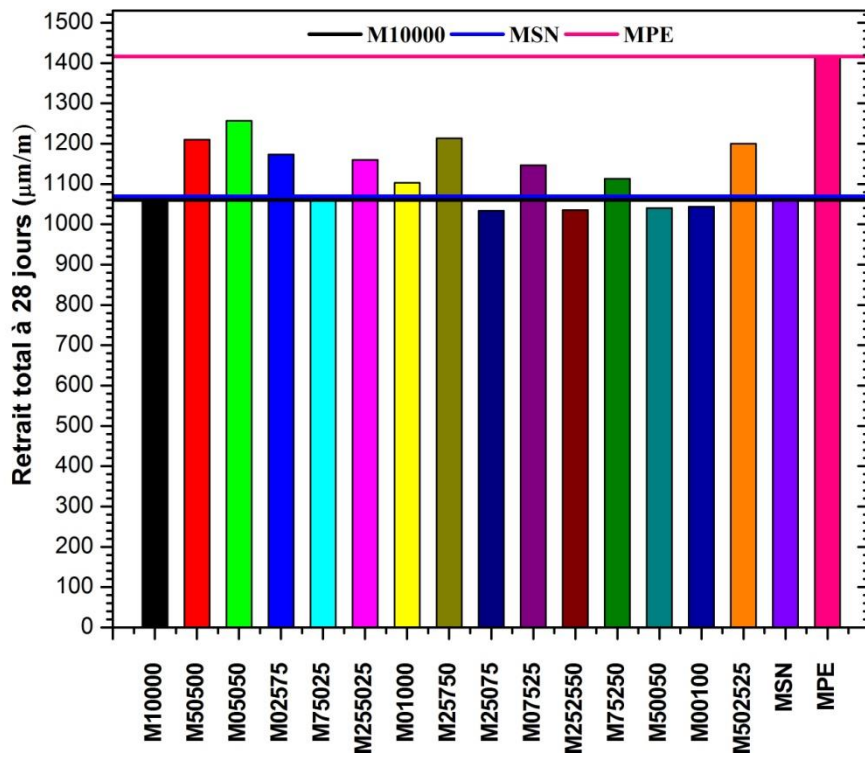


Figure III.15. Etude comparative de retrait de différents types des mortiers à 28jours.

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.

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à contribuer à l'étude de l'effet du type de sable sur les performances d'un mortier de réparation. Ce travail avait comme double objectifs de promouvoir le développement durable à travers la valorisation des matériaux locaux et de fournir aux professionnels du secteur de construction un mortier de réparation, à faible coût, performant et remplissant l'ensemble des exigences techniques. Le programme expérimental tracé dans le cadre du présent travail a nécessité la confection de plus de 300 éprouvettes de dimensions diverses.

En particulier, pour comprendre le comportement mécanique des réparations dans une première étape, à travers le troisième chapitre, nous avons mené une étude sur Les caractéristiques mécaniques et physiques des diverses compositions du mortier à base de sable alluvionnaire de sable concassé et du sable de dune.

Afin d'atteindre notre objectif, en premier lieu, nous avons optimisé le dosage du superplastifiant de chaque composition afin d'atteindre l'étalement souhaité. En deuxième lieu, les propriétés à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la flexion, retrait, module d'élasticité) de chaque mélange ont été déterminées. Et en fin, la durabilité des mortiers élaborés a été évaluée par l'essai de la porosité et l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

Les propriétés physico-mécaniques étudiées sont la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le retrait, le module d'élasticité. La durabilité des mortiers élaborés ont été évaluée par l'essai de la porosité et l'essai d'absorption d'eau par capillarité

Les résultats trouvés à l'issu de cette étude expérimentale montrent que :

- Le dosage optimal du superplastifiant des différents compositions est varié entre 0,6 et 1,25%.
- Les résistances mécaniques, que ce soit en compression ou en flexion, augmentent

Conclusion générale

avec le temps quel que soit le type de mortier.

- Un développement de 80 à 97% de module d'élasticité à été observé à 7 jours par rapport à celle enregistré à 28 jours. Au-delà de 28 jours une légère augmentation à été remarqué à 90 jours de l'ordre de 10% ;
- Les mélanges de mortier **M25075**, **M07525**, **M75250** et **M00100** ont montré de meilleures résistances à la compression ($\cong 62$ MPa) par rapport à ceux **M1000**, **MSN** et **MPE** à 28 jours ;
- Les mortiers **M502525** et **M255025** du sable mélange (alluvionnaire- dunaire-calcaire) présentent les meilleurs performances mécaniques. On note une résistance en compression à 90 jours de l'ordre 70 MPa. Nous remarquons que les deux mortiers contient le même pourcentage de sable calcaire (25 %), ils sont varier on pourcentage de sable alluvionnaire et dunaire ;
- 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
- Les modules d'élasticité trouvés à 28 jours pour les différents mélanges sont supérieurs à la valeur minimale (20 GPa) fixée par la norme **EN 1504-3** pour les mortiers de réparation de classe R4 ;
- Les mélanges **M10000**, **M50500** et **M75025** présentent le plus grande module d'élasticité ($\cong 37$ GPa);
- Le mortier prêt à l'emploi (MPE) représente le plus faible module d'élasticité ;
- La porosité totale diminue de 6 à 34 % lorsque l'âge de durcissement s'étend de 7 à 28 jours. La faible porosité à 28 jours est enregistrée pour les mélanges **M25750**, **M07525**, **M252550** et **M502525** avec des valeurs de 8,48% ; 9,69 ; 10,70 et 10,84 respectivement ;
- Les coefficients d'absorption des mortiers **M50500**, **M255025** et **MPE** à 28 jours sont nettement supérieurs par rapport aux autres formulations ;
- Le mortier **M502525** offre un coefficient d'absorption plus faible que les autres mortiers à 28 jours avec une valeur 67% inférieur à ceux des mortiers **M10000**, **MSN** et **MPE**, respectivement ;

Conclusion générale

- Les mortiers **M10000**, **M05050**, **M75025**, **MSN** ont des valeurs similaires de coefficients de sorptivité de l'ordre de $0,0032 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$;

- [1] M. Abdessemed, S. Kenai, A. Bali, A. Kibboua, B. Guillier, and J.-L. Chatelain, *Suivi et comportement des poutres de ponts en béton renforcées par composites collés*. 2007.
- [2] L. Courard and B. Bissonnette, “Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic,” *Techniques de l’Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation*, 2016.
- [3] L. Courard and B. Bissonnette, “Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 2: Compatibilité et performances,” *Techniques de l’Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation*, 2016.
- [4] “Reparations_TechIng_160301_partie 1.pdf.” .
- [5] O. Laurence, “La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l’expérimentation et de la modélisation,” p. 347.
- [6] F. P. Beer, Ed., *Mechanics of materials*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [7] R. Pattnaik, “Investigation into compatibility between repair material and substrate concrete using experimental and finite element method,” p. 168, 2006.
- [8] T.-H. Nguyen, “Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l’influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation,” Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [9] H. BELKHIRI and A. DERRAGUI, “Contribution à l’étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses,” Mémoire Master, Université Ziane Achour de Djelfa, 2016.
- [10] Z. Ahmad, A. Ibrahim, and P. Tahir, “Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, p. 10, 2010.
- [11] B. Parmentier, V. Pollet, and G. Zarmat, “Le retrait empêché du béton. Prédiction selon l’Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d’exécution,” vol. 2, p. 12, 2009.
- [12] T.-H. Nguyen, “Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l’influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation,” Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [13] D. Cusson, “Durability of repair materials,” p. 8, 1996.
- [14] B. Bissonnette and M. Pigeon, “Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 5, pp. 1075–1085, Jul. 1995.

- [15] L. Courard and B. Bissonnette, “Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 2: Compatibilité et performances,” *Techniques de l’Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation*, 2016.
- [16] O. Laurence, “La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l’expérimentation et de la modélisation,” p. 347.
- [17] B. EN, “1504-3 (2005) Products and systems for the protection and repair of concrete structures-Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity-Part 3: Structural and non-structural repair,” *British Standard Institute*, 2005.
- [18] B. Kiani, R. Y. Liang, and J. Gross, “Material selection for repair of structural concrete using VIKOR method,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 8, pp. 489–497, Jun. 2018.
- [19] M. Hamiane and M. Benmounah, “Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d’ajouts de déchets de briques réfractaires,” p. 109, 2014.
- [20] “R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN«Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.docx.” .
- [21] YAHIAOUI .K and SADKI .M, “Propriétés de mortier autoplaçant à base de différents types de sables,” Mémoire Master, Université Ziane Achour - Djelfa, 2017.
- [22] A. Mekhermeche, M. Hatia, A. Kriker, and S. Abbani, “Contribution à L’étude des Propriétés Thermiques des Briques en Terre,” *حوليات العلوم*, vol. 5, no. 1, pp. 81–89, May 2013.
- [23] M. Hamiane and M. Benmounah, “Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d’ajouts de déchets de briques réfractaires,” p. 109.
- [24] B. Yamina, D. Souad, M. Mekki, Z. Salim, and N. Abdelghani, “Micro-Béton à base de sable mixte (sable de dune et sable concassée) avec poudre de marbre et adjuvant,” *memoire master*, p. 82, 2019.
- [25] Douara .T , Guettala. S, Tarek .H, Attia.A, “Effet de la nature de sable et la température de mûrissement sur les propriétés d’un mortier autoplaçant.”
- [26] “20200908_170724.doc.” .
- [27] B. Benabed, L. Azzouz, E. Kadri, S. E. Belaidi, and H. Soualhi, “Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes,” p. 11, 2012.
- [28] T. Bouziani, A. Benmounah, Z. Makhloufi, M. Bédérina, and M. Queneudec T’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.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] BS EN 933-1, *Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution. Sieving method*, British Standards Institution. London, 2012.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] BS EN 1097-6, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption*, British Standards Institution. 2013.
- [35] N. P 18-540, *Granulats: Définitions, conformités et spécifications*. Afnor Paris, 1997.
- [36] T. Bouziani, A. Benmounah, Z. Makhloufi, M. Bédérina, and M. Queneudec T’kint, “Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 28, no. 18, pp. 1823–1834, Sep. 2014.
- [37] N. EN, “196-6,” *Methods of testing cement-Part*, vol. 6, 2010.
- [38] 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.
- [39] T. EN, “934-2 ‘Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling,’” *British Standards Institution*, 2009.
- [40] C. ASTM, “305-99. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency,” 1999.
- [41] 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.

- [42] BS EN 12504-4, *Testing concrete: part 4 : determination of ultrasonic pulse velocity.*, British Standards Institution. London, 2004.
- [43] N. EN, “196-1, Méthodes d’essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques,” *French Standard*, 2006.
- [44] B. EN, “12617-4. Products and systems for the protection and repair of concrete structures-test methods-Part 4: Determination of shrinkage and expansion,” *Br Stand Inst. London*, 2000.
- [45] B. EN, “1015-18 (2002) Methods of test for mortar for masonry,” *Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, 2002.
- [46] ASTM, “ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” 2001.