



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

**FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL**

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

BOUAMEUR NACEUR ET OULED AMRANE FAROUK

DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE GENIE CIVIL

OPTION MATERIAUX DE GENIE CIVIL

Thème

**Etude de la durabilité des mortiers de sable vis-à-vis des
attaques sulfatiques de sévérité croissante**

Jurys de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. BENCHAA BENABED	M.C.A	Président
Mme. MARGHOUB MASSAOUDA	M.A.A	Examinatrice
Mr. LAKHDARI MOHAMED	M.A.A	Rapporteur

Promotion : Juin - 2018

Dédicace

Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné toute la volonté et la patience pour aboutir à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mon source de douceur, de tendresse, d'amour et affection et grâce au encouragement et aux sacrifices qu'elle a consentis j'ai pu arriver à réaliser ce travail, ma très chère mère FARIHA

A mon très cher père BOULANOUR, pour les sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation et pour l'avenir qu'il m'a cessé d'offrir.

A toutes mes chères sœurs.

Aces qui m'ont soutenu, encouragée, apprécie mon efforts et crée le milieu favorable, l'ambiance joyeuse et l'atmosphère joviale pour mon procurer ce travail, mes chers frères à dieu:

Bouameur tufour, Ouarnoughi Mosaabe, Abdallah

A mes chers amis : DJAMEL, YACINE, MOHAMED, TAIFOUR, ... et tous mes amis sans exception qui j'ai passée des bonnes moments avec-ils.

A mon chère ami et mon binôme : Farouk

A tout ce qui j'aime et tout ce qu'ils m'aiment.

Toutes ces personnes que j'ai senties redoutable de leur dédier ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude

NACEUR

إهداء

أهدي ثمرة عملي المتواضع الى والدي الكريمين. بذلا الجهد ونحتا الصخر واحترافا كالشمعة لتضيء لنا الطريق الطويلة ونحيا الحياة الكريمة. فجازاهما الله بأفضل ما يجازي به عباده الصالحين.

إلى الشريف الطاهر الذي رحل عن عيني ولم يرحل عن قلبي الذي برحله فقدت أعظم مثال للمحبة والنصح "ابي الغالي رحمه الله ". إلى الجدة العزيزة رحمها الله أيضا وإلى كل موتى المسلمين رحمهم الله أجمعين.

إلى من قاسموني الحلوة والمرارة إخوتي الأعزاء (سلاف - مراد - محفوظ - غنية - هدى - عبد الرحمان - سليمة) إلى كل العائلة صغير وكبير.

إلى قدوتي ومثلي الأعلى الشيخ عبد الغاني.

إلى البراعم الصغار (محمد - فاطمة - شفاء - جيهان - عنتر - هاجر) إلى كل أبناء وبنات العمومة والأخوال.

إلى من ظلوا المثل الصادق للرجولة وسندي في الحياة (الأعمام والأخوال إلى كل واحد باسمه) إلى من قاسموني عناء الحياة الجامعية (الطاهر - جمال - ياسين - محمد - إلى رفيق الدرب (الناصر).

إلى أستاذي الكريم المشرف و المرشد و الذي كان بمثابة الأب لخضاري محمد فتاح و إلى كل أساتذة قسم الهندسة المدنية بجامعة الاغواط ... إلى كل من أحبهم قلبي وتناساهم قلبي إلى كل هؤلاء اهدي ثمرة عملي المتواضع.

أولاد عمران فاروق

Remerciements

Le présent travail

*A été réalisé au sein du laboratoire de Génie
Civil de l'Université Amar Telidji à Laghouat*

*On tient à remercier en premier lieu DIEU "Allah" Miséricordieux
Qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*On adresse nos remerciements à notre promoteur le professeur
Mr.Lakhdari Mohamed Fateh, on le remercie de nous avoir encadré,
orienté, aidé et conseillé pour la réalisation de ce travail.*

*On remercie également Mr. Ibrahim Hamdi et Deles Aissa, à la fois
présent et disponible,*

*Nos sincères remerciements pour sa patience,
Sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.*

*Et sans oublier à remercier les responsables de laboratoires GC de l'UV
de Laghouat*

Qui nous ont aidé et fournit les moyens pour réaliser cette recherche.

On voudrait remercier nos familles

(Qu'on dédie ce travail) pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Finalement, merci pour toutes personnes qui

Nous ont aidées de près ou de loin

Farouk

&

Naceur

المخلص

الهدف من ه ذا العمل ,تثمين المواد المحلية في منظور التتميع المستدامة لمواد البناء. المواد المحلية هي رمل الكثباني و الموجود بكثرة في الجنوب إلا انه غير مستغل في مجال البناء , نحن تطرقنا في عملنا إلى ملاط مكون أساسا من رمل كثباني وذلك بدارسة فيزيائيه- ميكانيكية وديمومة هذا الملاط .

استعملنا نوعين من الرمل في تركيبه الملاط , (رمل كثباني و رمل الوادي) مع ثلاثة أنواع من الاسمنت و قمنا بالمعالجة في وسطين مختلفين: المعالجة في الهواء والمعالجة داخل الماء.

تطرق البحث إلى دراسة تأثير نوعية الاسمنت و وسط المعالجة على الخصائص الميكانيكية للملاط مثل: مقاومة الضغط و كذلك على الخصائص الفيزيائية مثل: التقلص و التمدد وامتصاص الماء.

وقد تم التركيز في هذا العمل على دراسة ديمومة الملاط وذلك بوضع العينات في ستة أحواض من محلولين هما الصوديوم والمغنيزيوم, بح يث ثلاثة أحواض بها الصوديوم بنسبة 2%, 5% و 10%, والثلاثة الأخرى المغنيزيوم بنسبة 2%, 5% و 10% و كيفية تأثير هذين المحلولين على الملاط المكون أساسا من رمل الكثباني على المدى القصير.

وعلى ضوء النتائج المحصل عليها وجدنا أن تأثير الصوديوم والمغنيزيوم على الملاط يتغير حسب نوع الاسمنت ونوع الملاط.

كلمات مفتاحية رمل كثباني, رمل الوادي, الاسمنت, ملاط, مقاومة الضغط, تقلص, تمدد, امتصاص الماء, الصوديوم, المغنيزيوم, ديمومة.

Résumé

L'utilisation des matériaux locaux dans la fabrication du mortier constitue une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet du type de ciment et l'intensité de l'attaque sulfates sur la propriété et la durabilité des mortiers SD et SA trois type de ciment, ont été utilisé, il s'agit des ciments.

Cette partie de l'étude a successivement traitées les points suivants :

- caractérisation des matériaux utilisés dans les compositions des mortiers.
- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les mortiers à l'état durci au cours de cette étude.
- pour évaluer la durabilité du mortier, des éprouvettes ont été immergés dans 06 milieux d'attaque (2%,5%,10% Na_2SO_4) et (2%,5%,10% MgSO_4) pendant environ 50 jour et étude comparative entre les effets physique.

Mots clés : Sable de dune, sable alluvionnaire, ciment, résistance à la compression, retrait, expansion, absorption d'eau, permanence. Sodium, magnésium

Abstract

The use of local materials in the manufacture of mortar is an important economic and technological alternative in some developing countries. This research presents a contribution to the study of the effect of the type of cement and the intensity of attack sulfates on the property and the durability of mortar SD and SA three type of cement were used, it is cements.

This part of the study successively dealt with the following points:

- Characterization of the materials used in mortar compositions.
- Experimental procedures and tests performed on hardened mortars during this study.
- To evaluate the durability of the mortar specimens were immersed in 06 attack media (2%, 5%, 10% Na_2SO_4) and (2%, 5%, 10% MgSO_4) hang about 50 days and comparative study between the physical effects.

Keywords: Dune sand , valley sand, cement, mortar, pressure resistance, shrinkage, stretch, absorption of water, medium of sulfur, middle, permanence.

Table des Matières

المُلخَص	I
Résumé	II
Abstract.....	III
Table des Matières	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	XII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Étude bibliographique	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les sable	3
I.2.1 Définition sable de dunes	3
I.2.2 Définition Sable alluvionnaire	4
I.3 Le ciment	4
I.4 Les mortiers	5
I.4.1 Définitions	5
I.4.2. Types de mortier	5
a. Les mortiers de ciment.....	5
b. Les mortiers de chaux.....	6
c. Les mortiers bâtards.....	6
I.5 Conclusion	6
I.6 Durabilité	6
I.6.1 L'attaque des sulfates	7
I.6.2 Définition de l'attaque sulfatique	8
I.6.3 Sources des sulfates	8
I.6.4 Mécanismes d'attaques	10

I.6.5 Actions des Solutions Sulfatiques.....	10
I.6.7 Processus d'attaque par les sulfates internes	10
I.6.8 Processus d'attaque par les sulfates externes.....	11
I.6.9 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates	12
I.6.10 Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques.....	13
I.6.11 Mesures de préventions contre les ions sulfates	15
I.6.12 Conclusion sur l'attaque sulfatique	15
Chapitre II : Caractérisation des matériaux et Dispositifs expérimentaux.....	16
II.1. Introduction	16
II.2 Les Sables	16
II.2.1. Caractéristique physique	16
II.3 Ciment	17
II.3.1 Analyse chimique et minéralogique	17
II.4 Eau de gâchage	18
II.5 Adjuvants (super plastifiant)	18
II.6 Solution d'attaque sulfatique	18
II.7 Composition des mortiers	18
II.7.1 Propriétés physiques et mécaniques de mortier.....	19
II.8 Formulation de mortier	19
II.9 Essais expérimentaux	20
II.9.1 Confection et préparation des éprouvettes	20
II.9.2 Conservation des éprouvettes	20
II.9.3 Malaxage	20
II.9.4 Essais a l'état durci.....	22
Chapitre III : Analyse et discussion des résultats	25
III.1 Introduction	25

III.2 Essais a l'état frais	25
III.2.1 Essais de maniabilité (l'ouvrabilité)	25
III.3 Essais à l'état durci	26
III.3.1 Essai de retrait.....	26
III.3.2 Essai d'Expansion Effet de la cure	32
III.3.3 Essai de la résistance a la compression.....	33
III.4 Essai d'absorption	38
III.4.1 Mortier SA	38
III.4.2 Mortier AA.....	39
Chapitre IV : Durabilité	41
IV.1 Introduction	41
IV.2 Attaques sulfatiques externes	42
IV.3 Suivi de la variation de la masse	42
IV.3.1 La solution de Na ₂ SO ₄	43
IV.3.2 La solution de MgSO ₄	44
IV.4 Suivi de la variation dimensionnelle	45
IV.4.1 La solution de Na ₂ SO ₄	46
IV.4.2 La solution de MgSO ₄	47
IV.5 Inspection visuelle	48
IV.6 Absorption massique	48
IV.7 Absorption d'eau	49
IV.8 Valeur maximale de ΔL et ΔM en fonction de pourcentages (%)	49
IV.8.1 La solution de Na ₂ SO ₄	49
IV.8.2 La solution de MgSO ₄	50
IV.9 Synthèse des résultats	50
Conclusion Générale	52
Recommandations et perspectives	56

Références bibliographiques	57
ANNEXE	58

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 Morphologie de la barkhane [4].....4

Figure I. 3. Aspect général du sable alluvionnaire d'Oued M'zi de Laghouat [5].4

Chapitre II

Figure II.1 courbes granulométriques des sables étudiés [15]..... 16

Figure II. 2. Séquence de malaxage du mortier 21

Figure II. 3. Maniabilimetre 22

Figure II. 4. Appareillage de mesure du retrait..... 23

Figure II. 5. Appareil d'écrasement..... 23

Chapitre III

Figure III. 1. Variation du rapport E/C en fonction du type des mortiers 26

Figure III. 2. Variation du Retrait en fonction du type des mortiers 27

Figure III. 3. Variation de Retrait de Retrait de M1 AA 28

Figure III. 4. Variation de Retrait de M1 SA 28

Figure III. 5. Variation de Retrait de M3 AA 29

Figure III. 6. Variation de Retrait de M3 SA 30

Figure III. 7. Variation de Retrait de M2 AA 30

Figure III. 8. Variation de Retrait de M2 SA 31

Figure III. 9. Evolution de retrait du type des mortiers 32

Figure III. 10. Variation du Expansion en fonction du type des mortiers 32

Figure III. 11. Evolution d'Expansion du type des mortiers 33

Figure III. 12. La résistance à la compression du mortier SA avec air 34

Figure III. 13. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec air
..... 34

Figure III. 14. La résistance à la compression du mortier AA avec air 35

Figure III. 15. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec air
(Mortier AA) 36

Figure III. 16. La résistance à la compression du mortier SA avec eau	36
Figure III. 17. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec eau (Mortier SA)	37
Figure III. 18. La résistance à la compression du mortier AA avec eau	37
Figure III. 19. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec eau (Mortier AA)	38
Figure III. 20. L'absorption d'eau en fonction de type de mortiers	38
Figure III. 21. L'absorption d'eau en fonction de type de mortiers	39

Chapitre IV

Figure IV. 1. effet de la solution de $MgSO_4$ (%)	48
---	----

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I. 1. Classification du type d'agression par les sulfates [9].	7
---	---

Chapitre II :

Tableau II. 1. Caractéristique des sables étudiés	17
Tableau II. 2. Analyse chimique et minéralogique	17
Tableau II. 3. Analyse minéralogique du ciment utilisé	18
Tableau II. 4. Composition de mortier	19

Chapitre III :

Tableau III. 1. Rapport E/C et temps d'écoulement du chaque du type des mortiers	25
Tableau III. 2. Réduction d'eau	26
Tableau III. 3. La résistance à la compression de mortiers SA	33
Tableau III. 4. La résistance à la compression de mortiers AA	35
Tableau III. 5. La résistance à la compression de mortiers SA	36
Tableau III. 6. La résistance à la compression de mortiers AA	37
Tableau III. 7. Les différents paramètres de formulation (Air)	39
Tableau III. 8. Les différents paramètres de formulation (Eau)	40

Chapitre IV :

Tableau IV. 1. Variation de masse de la solution de Na_2SO_4 (%)	43
Tableau IV. 2. Variation de masse de la solution de MgSO_4 (%)	44
Tableau IV. 3. Variation dimensionnelle de la solution de Na_2SO_4 (%)	46
Tableau IV. 4. Variation dimensionnelle de la solution de MgSO_4 (%)	47
Tableau IV. 5. Valeur maximale de ΔL et ΔM de Na_2SO_4 (%)	49
Tableau IV. 6. Valeur maximale de ΔL et ΔM de MgSO_4 (%)	50

Introduction générale

L'objectif de ce travail porte sur la valorisation du sable de dune dans le domaine de la construction. Notre contribution concerne particulièrement la durabilité des mortiers à base de sable dunaire vis-à-vis des attaques de sulfates. La motivation de ce thème tient au fait que plusieurs études effectuées sur ces types de mortiers tant du point de vue de leurs formulations que celui de leur durabilité ont montré que le mortier à base de sable de dune pourrait remplacer avantageusement le mortier ordinaire dans certains secteurs du bâtiment et des travaux publics. Néanmoins certains aspects tels que ceux liés au degré d'agressivité des milieux d'attaques et à l'agent d'attaque lui-même posent des questions qui nécessitent des études plus approfondies.

La durabilité du mortier caractérise sa résistance aux agressions chimiques ou physiques, et sa capacité à maintenir son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues. Le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieur du matériau solide. La majorité des propriétés du béton/mortier sont liées à la nature du ciment et à sa composition sur le comportement rhéologique, mécanique et la durabilité spécialement à la résistance aux agressions chimiques.

Le monde de la construction est un secteur clé dans l'activité économique. La construction en Algérie est confrontée aujourd'hui à deux exigences à priori contradictoires qui sont la réduction des coûts d'une part et l'amélioration de la qualité d'autre part. Réduire les coûts; c'est en général mener une action de diversification et d'intensification des matériaux de construction et instaurer impérativement une politique de valorisation des matériaux locaux. Pour cela nous avons choisi d'utiliser le sable de dunes, qui se trouve en grande quantité dans l'Algérie particulièrement dans le sud, connu par son manque en matière de granulats et comparée avec un sable alluvionnaire. Donc l'utilisation de ce sable rend un immense service à l'économie nationale et participe au développement et à la préservation de l'environnement.

Ce projet entre dans un cadre général de valorisation et développement des matériaux locaux (sable de dune). Le but de cette étude est d'étudier de la durabilité des mortiers de sable dunaire vis-à-vis des attaques sulfatiques de sévérité croissante outre l'introduction générale, le présent mémoire s'articule en 4 chapitres :

- **Chapitre I** : Etude bibliographique.
- **Chapitre II** : **II-1** Caractérisation des matériaux.
II-2 Dispositifs Expérimentaux.
- **Chapitre III** : Analyse et discussion des résultats.
- **Chapitre IV** : La durabilité.

Finalement, la conclusion propose une synthèse des résultats obtenus dans notre travail ainsi que des perspectives de recherche.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

1.1 Introduction

Dans ce qui suit nous présentons un compte d'une recherche bibliographique en relation avec le thème que nous traitons.

1.2 Les sable

Le sable a sur le mortier, une influence notable tant sur la résistance que sur la cohésion et c'est donc logique que dans ce qui suit nous allons donner une présentation générale sur les propriétés des sables utilisés dans le domaine de génie civil. Notamment leurs mécanismes de formation, classifications et les critères d'acceptation pour leur emploi en construction. Nous allons entendre par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [1].

Dans notre travail, l'expérimentation a été entreprise sur deux types de sable ; un sable de dune noté par SD et un sable alluvionnaire désigné par SA. Également donner un aperçu sur les mortiers.

I.2.1 Définition sable de dunes

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédiment

ation 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 [2].

Dans une autre signification le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction modéré, et de sa propreté apparente, pourrait constituer la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles telles que le SA et se présente comme un matériau d'avenir [3].

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane (voir figure. I.1). Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et

le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent (voir figure. I.1) [3].

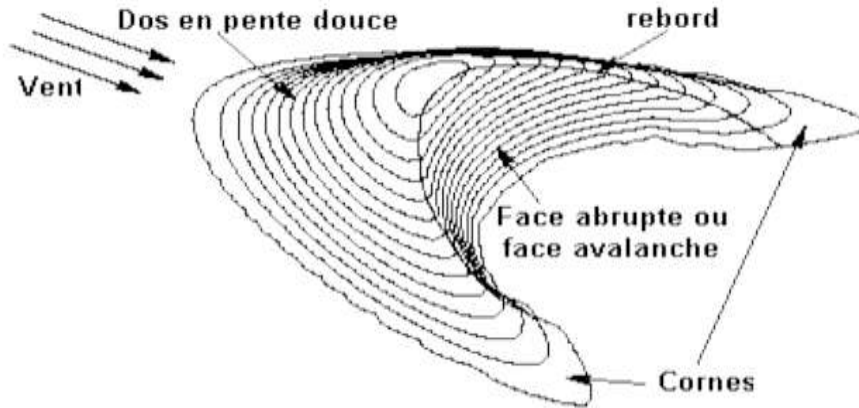


Figure I. 1 Morphologie de la barkhane [4].

I.2.2 Définition Sable alluvionnaire

La majorité des ouvrages de la région Sud (Ghardaïa, Laghouat et Ouargla) utilisent du sable alluvionnaire (sable siliceux naturel) qui est extrait de la rivière d'Oued M'zi (rivière traversant la ville de Laghouat). Ce sable contient une grande quantité de silice SiO_2 (Quartz), Les grains utilisés ont une forme roulée et une surface lisse (Figure I.2).

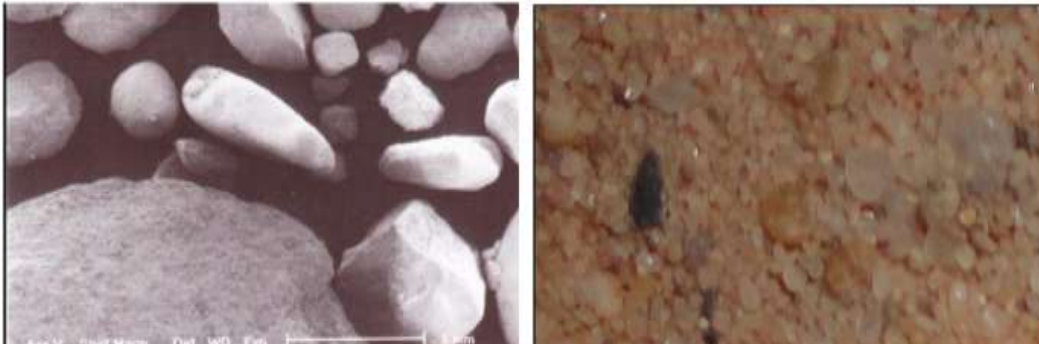


Figure I. 2. Aspect général du sable alluvionnaire d'Oued M'zi de Laghouat [5].

I.3 Le ciment

Dans ce qui suit nous présentons de façon sommaire le ciment, qui est le constituant principal du mortier. La fabrication du ciment est un procédé complexe qui transforme des roches mères en un produit de cuisson appelé clinker. Le cru produit initial est constitué comme suit :

- Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83 %
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14%
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4%
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) : de 1,5 à 3 %

A l'issue de la cuisson, nous obtenons à partir de ce cru ,4 phases cristallines sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- ✓ 45 à 65 % de silicate tricalcique (Alite) $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S)
- ✓ 15 à 25 % de silicate bicalcique (Bélite) $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S)
- ✓ 0 à 10 % d'alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)
- ✓ 0 à 15 % d'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)

I.4 Les mortiers

I.4.1 Définitions

Le mortier est un mélange de ciment, de sable et d'eau, utilisé notamment dans les maçonneries et les enduits. Selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants [6].

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres ; liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement [7].

I.4.2. Types de mortier

a. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour un mètre cube de sable [6]. Liants Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée [6].

b. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique [6].

c. Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée [6].

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée tels que les plastifiants, les entraîneurs d'air, les retardateurs de prise, les hydrofuges. L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables [6].

I.5 Conclusion

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

I.6 Durabilité

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques physico-mécaniques pour le matériau béton ou mortier. Cette propriété est définie dans un cadre très général par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un mortier, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations [1]. Nous présentons dans ce qui suit une synthèse bibliographique sur les attaques que nous étudions c'est-à-dire celles liées à l'attaque des sulfates.

I.6.1 L'attaque des sulfates

I.6.1.1 Introduction

En Algérie, les sulfates sont très répandus dans les sous-sols et les eaux souterraines. La localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse, on Les cause de dégradations de plusieurs ouvrages (barrages, ponts,...) sont généralement dues à des réactions pathologiques principalement à des réactions sulfatiques. Les sulfates sont présents naturellement dans les sols, surtout dans les régions qui contiennent du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ telles que le sud et l'ouest de l'Algérie. Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration peuvent contenir des sulfates par le contact direct avec des sols sulfatés ou par la pollution des environnements industriels.

Généralement, les conséquences d'une réaction sulfatique sont d'ordres macroscopiques en particulier d'ordre mécanique tel que la chute de résistance, la fissuration et l'expansion. Ce type de dégradation qui est à long terme fonction de l'attaque (teneur ou concentration des sulfates en contact) et du type de ciment utilisé.

La norme ACI (1997) [8] apprécie le degré d'agression des sulfates en fonction de leurs concentrations dans les eaux souterraines et dans le sol. Elle estime que l'agression est d'autant plus sévère que le taux de concentration dépasse les 10000 ppm dans les eaux souterraines et 2% dans les sols (tableau I.1).

Tableau I. 1. Classification du type d'agression par les sulfates [9].

Catégorie de l'agression	Concentration en sulfate SO_4	
	Dans les eaux souterraines (en ppm)	Dans le sol (en %)
Négligeable	<1 50	<0.1
Modéré	150 – 1500	0.10 – 0.20
Sévère	1500 – 10000	0.20 -2.00
Très sévère	> 10000	> 2.00

Dès les années 1950, les premières réglementations, un peu par tout dans le monde, en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique, recommandaient l'utilisation de ciment à faible rapport E/C, à taux de C3A limité et à ajouts pouzzolaniques accrus [2]. Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates réactifs et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne [2].

I.6.2 Définition de l'attaque sulfatique

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton ou du mortier, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories [7]:

- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- La formation de produits expansifs à l'intérieur de la matrice du mortier.

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé [10].

I.6.3 Sources des sulfates

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même [2].

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasie à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du

gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.
[6]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, hémihydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite K_3NaSO_4 , langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2) :
- Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes, leur concentration moyenne est comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec.

Des concentrations beaucoup plus importantes (> 5 %) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou de l'anhydrite $CaSO_4$. La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium $SO_4(NH_4)_2$, provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

- Les eaux d'infiltration peuvent se charger en ions SO_4^{2-} au contact des sols ou des remblais contenant des sulfates.

- Dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.

- Les fermentations anaérobies qui se produisent dans les ouvrages d'assainissement conduisent également à la formation d'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré dégagé.

[11]

- L'eau de mer contient des sulfates en solution.

I.6.4 Mécanismes d'attaques

Les sulfates peuvent agir selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion.
- Perte des propriétés liantes des C-S-H qui se manifestent une perte de résistance.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

I.6.5 Actions des Solutions Sulfatiques

La résistance aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour la durabilité des mortiers. Le problème est aussi ancien que le ciment et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans [12, 13].

I.6.7 Processus d'attaque par les sulfates internes

A- Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.

B- Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

· Soit à partir de reliquats de C₃A anhydre :



· Soit à partir de l'aluminate tétra calciue hydraté C₃AH₁₃ ou du monosulfoaluminate de calcium C₃ASO₄H₁₂ [14].

I.6.8 Processus d'attaque par les sulfates externes

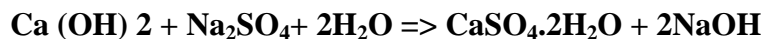
Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $\text{NH}_4\dots$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.
- Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus au moins complète du béton [3].

Exemples de l'attaque par les sulfates

-Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4)

A- Formation de gypse secondaire



NaOH : alcalinité élevée Stabilisation des C-S-H

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté (pas ou peu d'expansion).

B-Formation d'ettringite secondaire

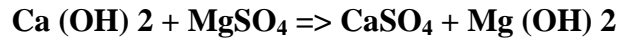
- à partir du C_3A anhydre résiduel



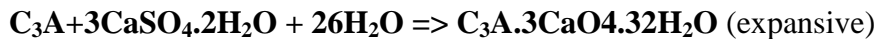
- à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



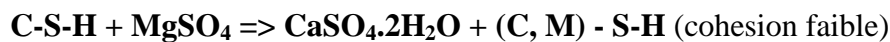
Le cas de sulfate de magnésium MgSO_4 (double action)



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H



Etant donné la très faible solubilité du $\text{Mg}(\text{OH})_2$, cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates.

Une réaction ultérieure entre le $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et le gel de silice est possible et peut aussi provoquer une détérioration des C-S-H.

Le gypse formé occupe un volume plus grand que la portlandite, sa formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte. Lorsque la concentration en sulfates est assez élevée, le gypse restera stable et de nouveaux cristaux de gypse continueront à se former.

Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions SO_4^{2-} qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'ettringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion.

Lors d'une attaque du mortier par des sulfates externes, sa dégradation se produit par la formation d'ettringite ou de gypse et par la pression et la fissuration conséquentes [6].

I.6.9 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates

Suite aux études effectuées, à travers le monde, sur l'influence de l'attaque sulfatique sur les matériaux cimentaires, il a été conclu que :

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment

- Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qui ralentie la pénétration des sulfates et de l'ion qui leur est associé.
- Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en C_3A du ciment est faible.
- Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates [14].

I.6.10 Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques

I.6.10.1 Essais de résistance aux attaques sulfatiques externes

· Essai Anstett ou Le Chatelier-Anstett-Blondiau

Cet essai est effectué sur pâte pure de ciment hydratée à 14 jours, broyée puis mélangée à du gypse (rapport 50/50), humectée et comprimée sous forme de plaquettes circulaires de 8 cm de diamètre et 3 cm de hauteur. Les cylindres sont placés dans un récipient fermé sur un papier filtre trempant dans l'eau distillée. Le diamètre des éprouvettes est mesuré à échéances déterminées (28 et/ou 90 jours). Un accroissement de plus de 1,25 % classe le ciment comme non résistant aux sulfates. Cet essai simple, rapide mais très sévère a été souvent très critiqué et ne donne pas toujours un bon classement des ciments. Néanmoins, eu égard à la sévérité du test, les ciments satisfaisants à cet essai offrent une très bonne garantie de résistance aux attaques sulfatiques.

· Essai Mehta

Les essais sont réalisés à partir de petits cylindres de pâte pure de rapport E/C élevé, préparés en ajoutant une barbotine du ciment pré-hydraté destinée à éviter le ressuage. Les cylindres, de diamètre 11 mm et de longueur 22 mm (élancement 2) sont conservés 1 jour à 20 °C en atmosphère humide puis 13 jours à 40 °C et 100 % d'humidité relative. Ils sont ensuite immergés dans une solution à 4 % de Na_2SO_4 de pH stabilisé à 7 #177; 0,5 par addition de H_2SO_4 (0,1 N), à température ambiante. La résistance en compression des cylindres est mesurée après 28 jours et/ou 90 jours d'immersion. Le critère de non résistance aux sulfates est une perte mécanique de 25 % par rapport à la résistance des cylindres à l'issue

du traitement à 40 °C. Cet essai est intéressant par sa rapidité, mais peut donner des résultats variables d'un laboratoire à un autre, en raison d'un mode opératoire non optimisé.

· Norme ASTM C1012-04 [24]

L'essai est applicable à tous les ciments. Il est pratiqué sur prismes de mortier 25x25x285 mm³, de composition : ciment/sable = 1/2,75 et E/C = 0,485. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau saturée de chaux à 23 °C jusqu'à atteindre une résistance en compression d'au moins 20 MPa sur des cubes 50x50x50 mm³ de même mortier. À ce stade, les prismes sont immergés dans une solution à 50 g/l de Na₂SO₄ (autres concentrations ou autre sulfates comme MgSO₄ peut être employé pour simuler l'environnement d'exposition), la température de stockage est à 23 ± 2 °C. Les mesures d'allongement sont effectuées à 1, 2, 3, 4, 8, 13 et 15 semaines. Si à 15 semaines un léger allongement continu est observé, les mesures suivantes sont faites à 4, 6, 9 et 12 mois. [14].

I.6.10.2 Essais de résistance aux attaques sulfatiques internes

· Le test de Duggan : Cet essai est réalisé sur des éprouvettes de béton cylindriques de 25 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur. Il est basé sur une succession de phases d'exposition à une température élevée (82 °C) et d'une phase d'immersion dans l'eau.

Gillot et al. Jugent cet essai trop sévère. Ils estiment que les cycles imposés à plusieurs reprises modifient les caractéristiques physiques et chimiques du matériau de manière irréaliste.

· L'essai de Fu : Les essais sont réalisés sur des éprouvettes de mortiers prismatiques (25x25x160 mm³). Les éprouvettes sont tout d'abord conservées 1 heure à 23 °C dans une enceinte humide. Elles subissent ensuite deux traitements thermiques :

- le premier de 12 heures à 95 ± 1,7 °C, suivi d'une immersion dans l'eau pendant 6 heures à 23 °C.

- le deuxième de 24 heures à 85 ± 1,7 °C.

La mesure initiale des dimensions des éprouvettes est réalisée avant le deuxième étuvage. Le délai d'une heure, accordé pour la maturation des mortiers à température ambiante a pour objectif d'augmenter la quantité d'ions sulfates adsorbés à la surface des C-S-H. Le deuxième traitement thermique doit permettre d'accélérer les processus d'expansion. À la suite de ces

cycles, les échantillons sont conservés dans une solution saturée en chaux à 23 °C. L'expansion des mortiers est mesurée tous les 7 jours. Le seuil retenu est de 0,04 % d'expansion après 42 jours d'immersion [2].

I.6.11 Mesures de préventions contre les ions sulfates

Pour éviter une attaque due aux sulfates, on fera les choix suivants:

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.
- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment [7].

I.6.12 Conclusion sur l'attaque sulfatique

Le mortier est un matériau poreux. L'eau de l'extérieur peut pénétrer dans son réseau de pores et de capillaires et apporter avec elle des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure. Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée. Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le mortier dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction différée est l'ettringite.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et Dispositifs expérimentaux

II.1. Introduction

L'objet de notre recherche consiste à étudier la durabilité d'un mortier à base de SD et SA formulé dans des travaux précédents [15]

Dans ce qui suit nous présentons dans une première phase, les caractéristiques des différents matériaux utilisés et dans une deuxième phase le mode d'élaboration des mortiers à étudier. [15]. A ce titre nous précisons que nous avons varié le type de ciment tout en maintenant fixes les dosages des autres matériaux à savoir le sable, l'eau et l'adjuvant.

II.2 Les Sables

Nous utilisons dans notre travail un SD et un SA qui ont été préalablement caractérisés. [15]

II.2.1. Caractéristique physique

II.2.1.1 Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des sables étudiés sont regroupées dans la figure (II.1)

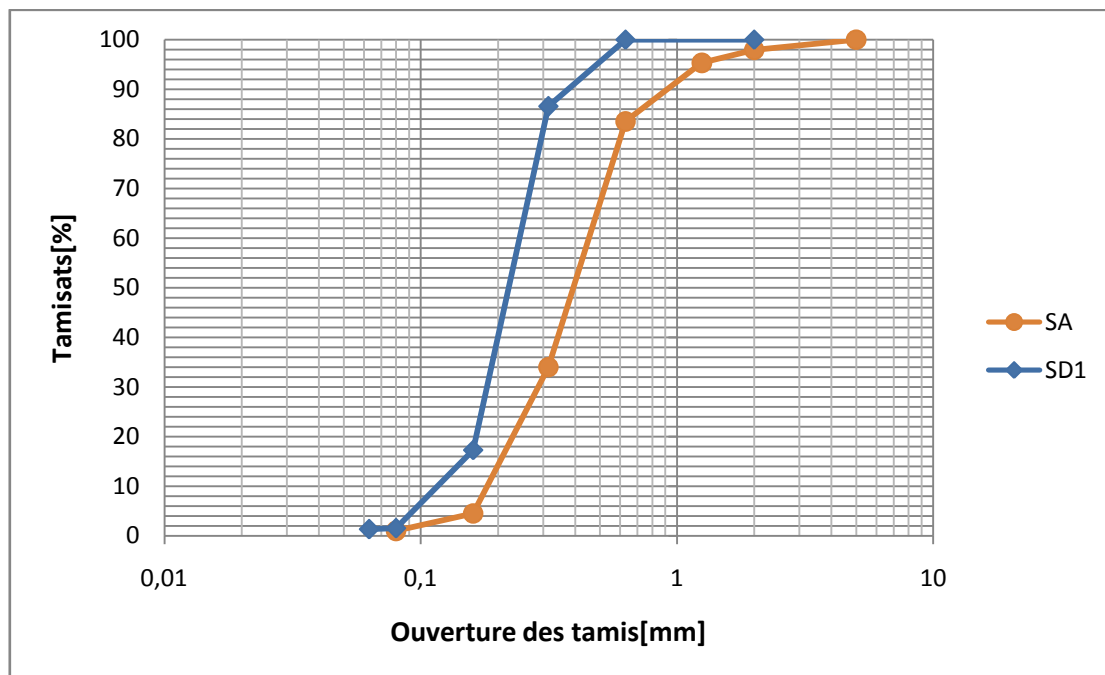


Figure II.1 courbes granulométriques des sables étudiés.

L'analyse granulométrique du sable alluvionnaire a été effectuée selon la norme NF P18-560 [16]. Figure II.1 D'après cette analyse, on constate que la granulométrie est étalée. La quantité des fines

(< 0,080 mm) dans ce sable est de 1,5%. Les Caractéristique des sables étudiés est présentée dans le tableau II.1et le tableau II.2, il se situe dans le fuseau recommandé pour les sables de construction

Tableau II. 1.Caractéristique des sables étudiés

Caractéristiques	Unité	SD	SA
Masse volumique apparente	(kg /m ³)	1550	1556.9
Masse volumique absolue	(kg /m ³)	2760	2600
Module de finesse	/	0,96	2,19
Compacité C _p	(%)	56	60
Porosité P	(%)	44	40
Equivalent de sable .ES (avec piston)	(%)	76	87
Equivalent de sable .ES (visuel)	(%)	83	84

II.3 Ciment

Nous avons utilisé trois types de ciment dans notre étude afin de bien suivre l'évolution du comportement mécanique et la durabilité de mortiers, surtout vis-à-vis l'attaque des sulfates.

Il s'agit du ciment Portland composé (CPJ CEM II 42.5) provenant de la cimenterie de Biskra et du (CPJ CEM II 52.5) provenant de la cimenterie Hamame Dhala de Msila et du (CPJ CEM II 32.5).

II.3.1 Analyse chimique et minéralogique :

Tableau II. 2.Analyse chimique et minéralogique

Elément		SiO₂	Al₂O₂	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O	CL	CaO Libre
CPJ	%	19.70	4.52	3.49	62.15	1.79	2.27	0.49	0.25	0,02	1
42.5											

Tableau II. 3. Analyse minéralogique du ciment utilisé

Elément		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CPJ 42.5	%	61, 31	17,40	6,13	11,97

II.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des substances qui pourraient avoir un effet négatif appréciable sur la qualité et la durabilité du mortier. Celle utilisée dans tous les essais est l'eau courante des robinets du laboratoire de département de génie civil de Laghouat.

II.5 Adjuvants (super plastifiant)

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant « Medaplast SP40 » fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar Alger.

Le superplastifiant SP40 est une solution hydrosoluble de couleur marron, de pH égal à 8.2 et de densité de 1.22, spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage [17].

II.6 Solution d'attaque sulfatique

La solution d'attaque sulfatique utilisée pour l'expérimentation, est une solution du sulfate de sodium (Na₂SO₄) de concentration 2 %, 5%, 10%, et magnésium (MgSO₄) de concentration 2%, 5%,10%.

II.7 Composition des mortiers

Afin de suivre le comportement mécanique et la durabilité des mortiers, nous avons considéré pour chaque type de ciment deux compositions l'une avec adjuvant ; l'autre sans adjuvant.

- Composition 1: Un mortier du sable mélange (alluvionnaire- dunaire) sans plastifiant (SP40), ce mortier est noté MSA4D.
- Composition 2: Un mortier du sable mélange (alluvionnaire- dunaire) avec plastifiant (SP 40), ce mortier est noté MSA4DP.

II.7.1 Propriétés physiques et mécaniques de mortier

II.7.1.1 Mesure de la consistance des mortiers (NF P 18-452 et NF P15-437)

a. Objectif de l'essai C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou superplastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance ; c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 et NF P 15 -437. [18]

b. Principe de l'essai

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

II.8 Formulation de mortier

C/S = 1/3 SD =60% SA= 40%

Tableau II. 4.Composition de mortier

Type de ciment		E/C	SD60%(g)	SA40%(g)	Ciment(g)	Adjuvant(SP40) SP40 1.9% (g)
M1	SA	0.61	810	540	450	8.6
	AA	0.48	810	540	450	8.6
M2	SA	0.64	810	450	450	8.6
	AA	0.52	810	540	450	8.6
M3	SA	0.63	810	540	450	8.6
	AA	0.55	810	540	450	8.6

II.9 Essais expérimentaux

Nous allons dans ce qui suit décrire sommairement les principaux essais expérimentaux entrepris lors de cette étude sur les mortiers frais et les mortiers durcis, il s'agit de:

- L'essai de maniabilité
- L'essai de rupture par compression
- L'essai de retrait
- L'essai d'expansion
- L'essai d'absorption d'eau
- L'essai de résistance aux sulfates

II.9.1 Confection et préparation des éprouvettes

Des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16$ cm³, au nombre de 218 (pour caractéristique physique) et 108 éprouvettes prismatiques de $2 \times 2 \times 28$ (pour l'expansion) cm³ ont été utilisées pour l'étude.

Elles sont maintenues de ce même milieu jusqu'au jour du démoulage qui aura lieu 24 heures après le coulage du mortier, ensuite les éprouvettes sont recouvertes par un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau après démoulage, les éprouvettes sont affectées directement au milieu de conservation souhaité jusqu'au jour du test. Afin d'être certain que le travail est bien fait, une procédure rigoureuse a été respectée.

II.9.2 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes du mortier sont conservées dans deux environnements :

ENV I (milieu 1) : Sous l'eau potable $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

ENV II (milieu 2) : À l'air libre à l'intérieur du laboratoire.

II.9.3 Malaxage

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des mortiers et bétons, il est indispensable pour que le sable soit régulièrement dispersé et que le ciment soit bien réparti entre et autour de tous les grains inertes, il faut en outre que le ciment ne soit pas regroupé en grumeaux, mais régulièrement entouré d'une particule d'eau. Les mélanges sont

malaxés à petite vitesse pendant une minute. Puis le malaxage s'accélère en grande vitesse pendant les 2ème, 3ème et 4ème minutes. Le mélange est alors prêt à l'emploi. Le malaxeur utilisé durant nos travaux, est un malaxeur à mortier à une contenance de cinq litres.

Un premier malaxage est réalisé à sec, les matériaux secs (sable et ciment) sont mélangés en les retournant d'un bout à l'autre sur une surface dure, propre et non absorbante jusqu'à ce que le mélange semble uniforme.

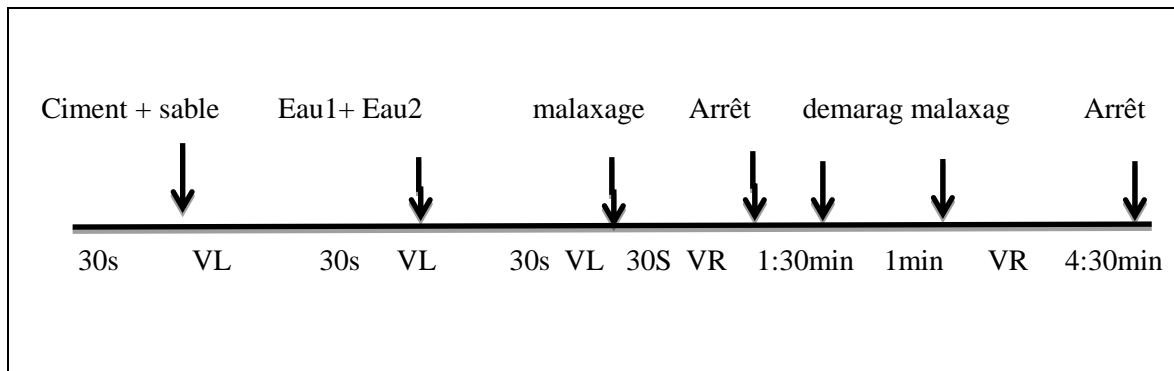


Figure II. 2.Séquence de malaxage du mortier

II.9.4 Essais a l'état frais

II.9.4.1 Essais de maniabilité (l'ouvrabilité)

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du mortier, elle se définit comme la facilité offerte à sans mise en place. L'essai adopté pour déterminer l'ouvrabilité de notre mortier est l'essai mesurant le temps d'écoulement, par le maniabilimètre, conformément à la norme NFP 18-452[19].

L'essai a pour but de classer les mortiers d'après leur aptitude à être mis en œuvre dans des conditions données. L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un mortier par l'intermédiaire du maniabilimètre.



Figure II. 3.Maniabilimetre

II.9.4 Essais a l'état durci

II.9.4.1 Essai de retrait

L'étude de l'évolution de la variation de longueur des mortiers est un moyen nécessaire qui permet de prévoir le comportement de ces matériaux vis-à-vis des conditions climatiques, car la durabilité de ces matériaux est compromise lorsque le matériau de construction de base a tendance à rétrécir au jeune âge. Si la variation relative de dimension est très grande, la durabilité par conséquent est affectée et on doit établir de nouvelles formulations afin d'optimiser le comportement du matériau vis-à-vis de l'apparition de fissures à cause du retrait, qui par conséquent, facilitent la pénétration des agents agressifs à travers ces fissures.

Les mesures du retrait ont été effectuées sur les éprouvettes 4×4×16 conformément à la norme NFP15 – 433[21] munis à leurs deux extrémités des plots comme indiqué sur la figure III.4

Les éprouvettes sont après démoulage à 24 heures placées dans un déformomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures de retrait.



Figure II. 4.Appareillage de mesure du retrait.

II.9.4.2 Essai de la résistance a la compression

Cet essai est régi suivant la norme EN 196-1[20], exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes 40x40mm. Chaque demi-prisme est mis entre deux plaques de métal dur puis testé en compression sur ses faces latérales (de moulage) de section de 40x40mm².



Figure II. 5.Appareil d'écrasement

II.9.4.3 Essai d'absorption

Absorption d'eau par immersion totale (Essai de porosité) La mesure de la capacité d'absorption massique permet de mesurer la porosité ouverte. L'essai de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par AFREM [22] et cité dans le projet GranDuBé [23].

La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à $105\pm 5^\circ\text{C}$ pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis sont pesées soit M_0 . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant 24 heures. Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit M_1 . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$A_{bi} = \left(\frac{M_1 - M_0}{M_0} \right) \times 100$$

Avec : taux d'absorption en % ;

M_0 : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

M_1 : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;

Chapitre III : Analyse et discussion des résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons dans le détail les résultats successifs des différents essais que nous avons effectués

III.2 Essais a l'état frais

III.2.1 Essais de maniabilité (l'ouvrabilité)

Tableau III. 1.Rapport E/C et temps d'écoulement du chaque du type des mortiers

M3		Ciment (g)	E/C	sable alluvionnaire 40%(g)	sable dunaire 60%(g)	Adjuvant (SP40) 1.9%(g)	Temps d'écoulement 8-12(s)	Remarque
M3	AA	450	0.53	540	810	8.6	12.03	
		450	0.50	540	810	8.6	14	
		450	0.55	540	810	8.6	9.27	Formulation adoptée
	SA	450	0.58	540	810	8.6	20	
		450	0.6	540	810	8.6	15	
		450	0.63	540	810	8.6	10.5	Formulation adoptée
M2								
M2	AA	450	0.5	540	810	8.6	12.65	
		450	0.54	540	810	8.6	7.5	
		450	0.52	540	810	8.6	8.77	Formulation adoptée
	SA	450	0.61	540	810	8.6	18	
		450	0.63	540	810	8.6	13	
		450	0.64	540	810	8.6	8.60	Formulation adoptée
M1								
M1	AA	450	0.51	540	810	8.6	7	
		450	0.5	540	810	8.6	7.55	
		450	0.48	540	810	8.6	10.08	Formulation adoptée
	SA	450	0.63	540	810	8.6	6.40	
		450	0.60	540	810	8.6	13	
		450	0.61	540	810	8.6	8.51	Formulation adoptée

Les résultats du rapport E/C en fonction du type du ciment sont illustrés sur la figure III.1 ci-dessous,

Les résultats du rapport E/C en fonction du type du ciment sont illustrés sur la **figure III.1** ci-dessous,

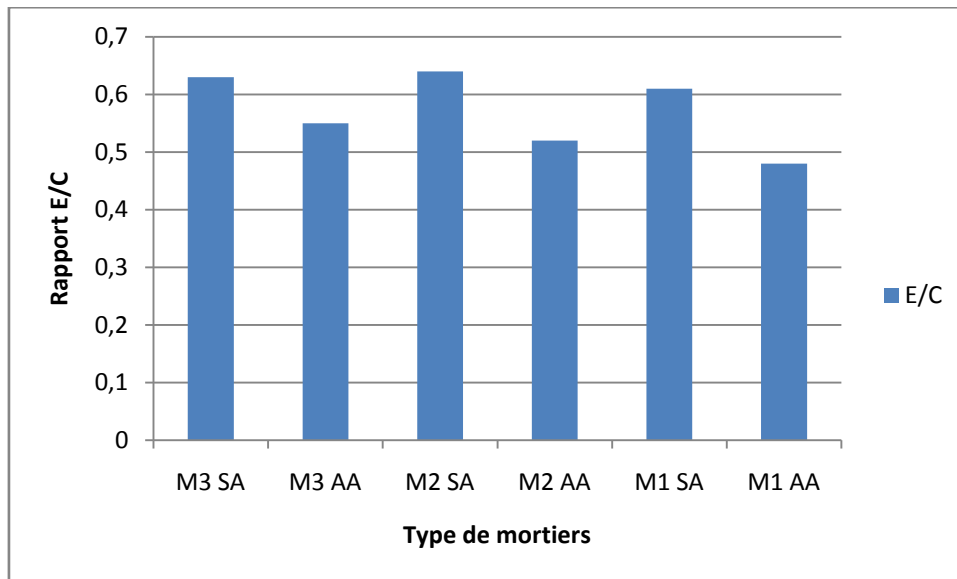


Figure III. 1. Variation du rapport E/C en fonction du type des mortiers

Dans chaque cas le SP a permis d'avoir une réduction de l'eau avec cependant une efficacité variable indiquée dans le tableau ci-dessous selon les types de ciment

Tableau III. 2. Réduction d'eau

Type de ciment	52.5	42.5	32.5
Gain(%)	15	23	27

Le ciment 32.5 exhibe un meilleur gain en terme de réduction d'eau c'est à dire une meilleure maniabilité suivi par le 42.5 le moins performant étant le 52.5

III.3 Essais à l'état durci

III.3.1 Essai de retrait

Cette étude est basée sur les résultats donnés par l'essai de retrait sur des éprouvettes conservés à l'air libre

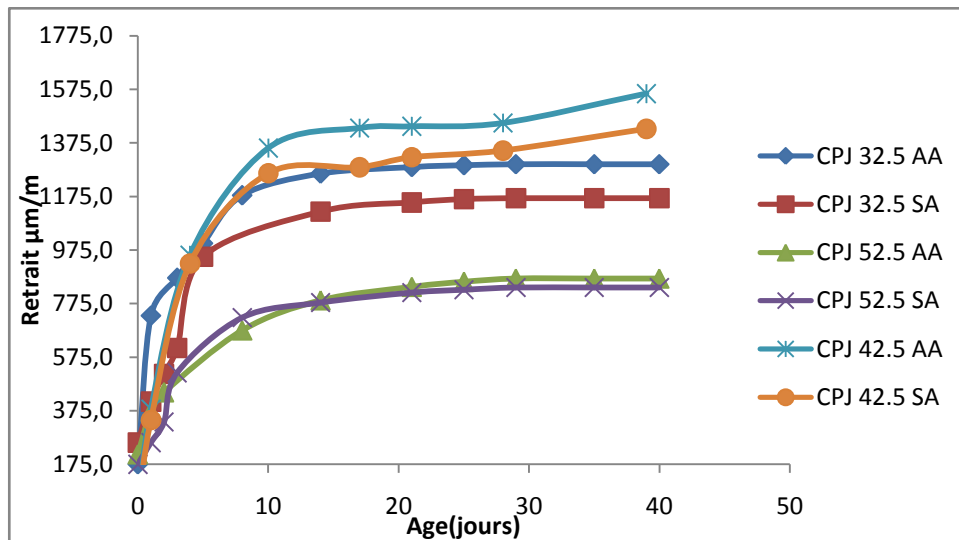


Figure III. 2.Variation du Retrait en fonction du type des mortiers

La figure ci-dessus permet de relever les points suivants :

Pour tous les types de ciment l'évolution du retrait suit deux phases principales :

-Une première se caractérisant par un développement rapide pendant laquelle le retrait atteint pratiquement 90 % de sa valeur maximale.

-La deuxième phase se caractérise par une nette diminution du taux de croissance

-Pour chaque type de ciment L'adjuvant a pour effet d'accentuer le retrait.

-Le mortier M3 confectionné avec le CEM 52.5 exhibe le retrait le plus faible avec une valeur de 845μm/m à 40jours. Cette valeur est comparable à celle d'un béton conventionnel 900μm/m. Donc on peut conclure que ce type de mortier peut être envisagé pour la réparation du béton compte tenu du fait qu'il satisfait au critère de compatibilité.

Afin d'étayer les observations précédentes nous dressons un bilan comparatif dans les figures suivantes l'effet du type de ciment sur l'évolution du retrait

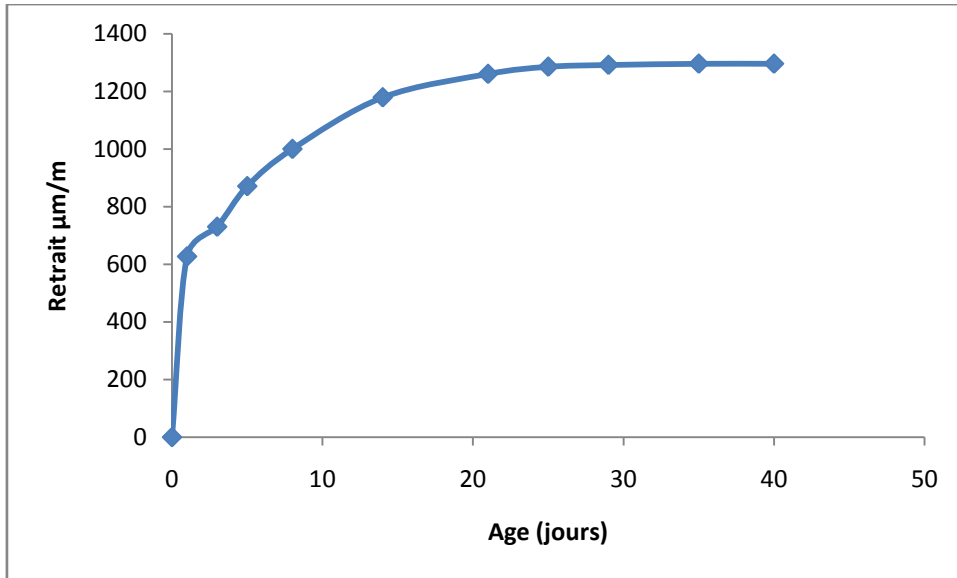


Figure III. 3. Variation de Retrait de Retrait de M1 AA

Interprétation :

Phase 1 :12jours

Retrait : 1180µm/m

Retrait max 1190µm/m

Le mortier a développé la quasi-totalité de son retrait en 12jours pour continuer à se déformer mais à une allure très faible.

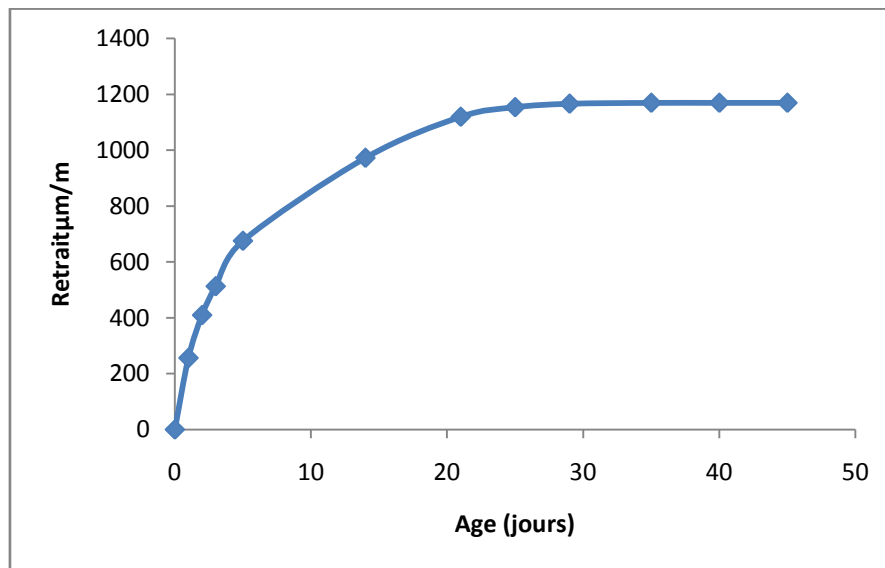


Figure III. 4. Variation de Retrait de M1 SA

Interprétation :

Phase 1 :14jours

Retrait : 1118 $\mu\text{m}/\text{m}$

Retrait max 1168 $\mu\text{m}/\text{m}$

Le mortier a développé la majeure partie de son retrait en 14jours pour atteindre sa valeur maximale à 28jours. Nous enregistrons un écart de deux jours avec le mortier adjuvanté.

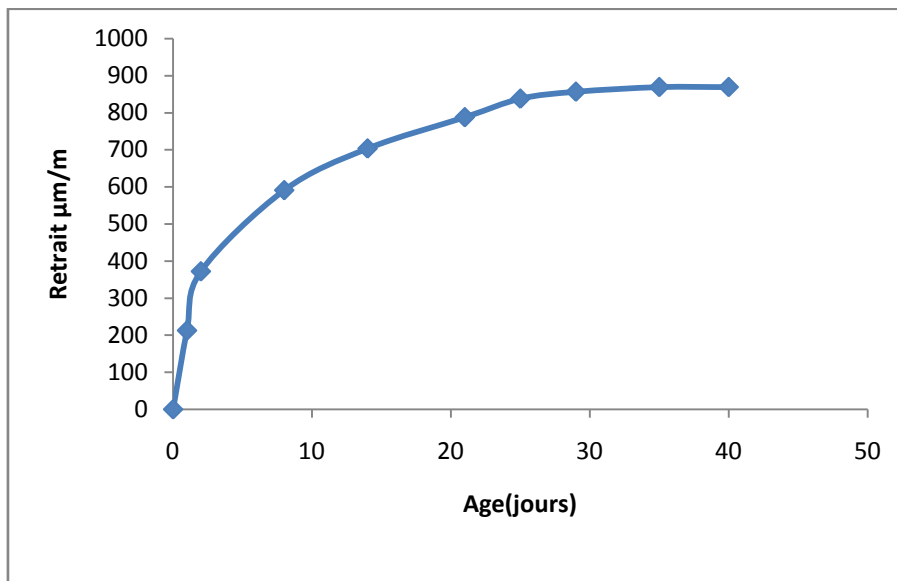


Figure III. 5.Variation de Retrait de M3 AA

Interprétation :

Phase 1 :14jours

Retrait : 800 $\mu\text{m}/\text{m}$

Retrait max 890 $\mu\text{m}/\text{m}$

Le mortier a développé la majeure partie de son retrait en 14jours pour atteindre sa valeur maximale de 890 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28jours

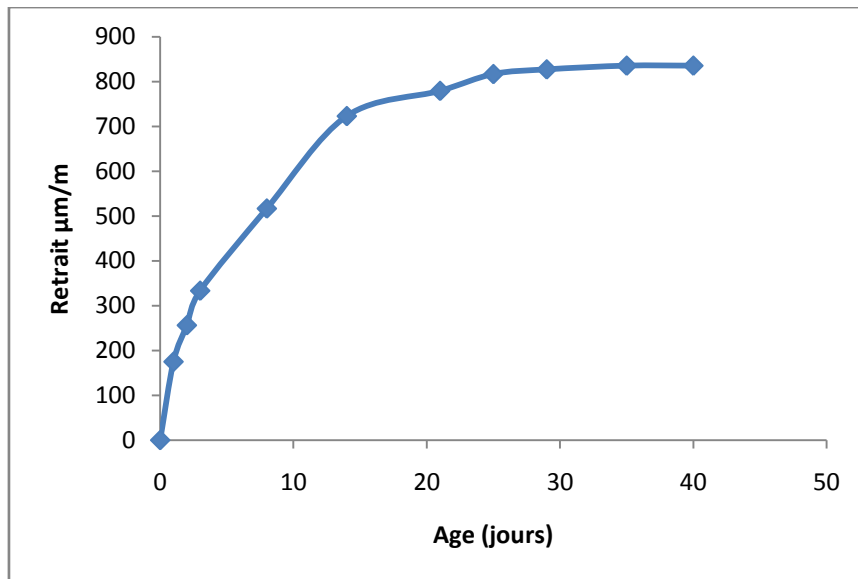


Figure III. 6. Variation de Retrait de M3 SA

Interprétation :

Phase 1 :14jours

Retrait : 780µm/m

Retrait max 850µm/m

Le mortier a développé une partie de son retrait en 14jours pour atteindre sa valeur maximale à 28jours. Nous remarquons que l'adjuvant a eu pour effet d'accentuer le retrait.

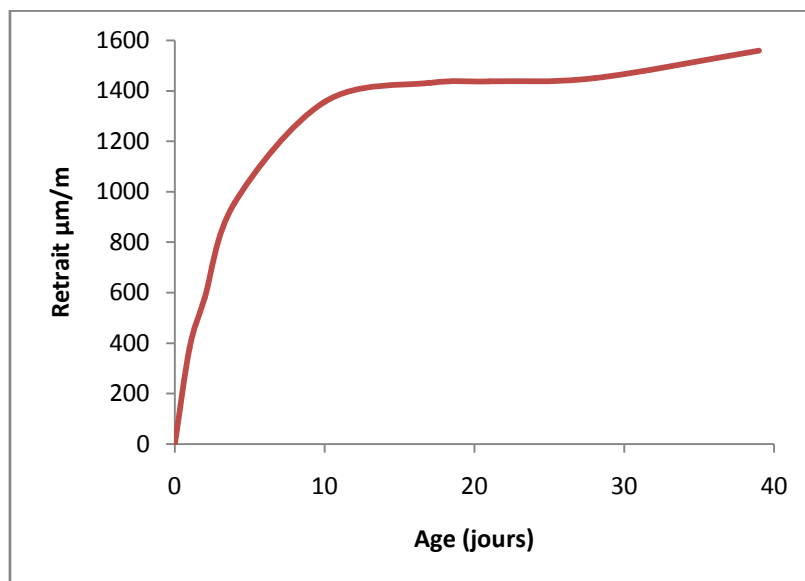


Figure III. 7. Variation de Retrait de M2 AA

Interprétation :

Phase 1 :10jours

Retrait : 1400 $\mu\text{m}/\text{m}$

Retrait max 1600 $\mu\text{m}/\text{m}$

Le mortier a développé la majeure partie de son retrait en 10jours pour atteindre sa valeur maximale à 28jours. La diminution du taux d'augmentation du retrait intervient pendant le reste de la durée d'étude.

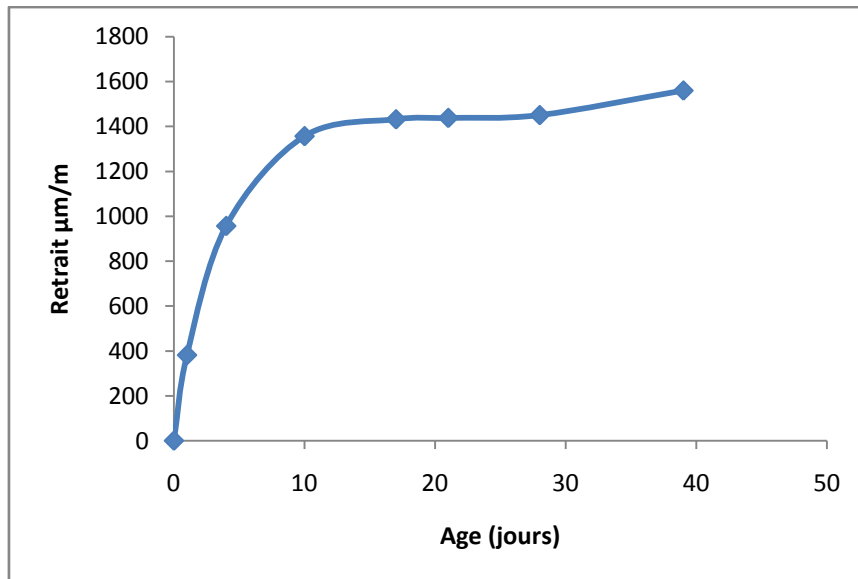


Figure III. 8. Variation de Retrait de M2 SA

Interprétation :

Phase 1 :10jours

Retrait : 1240 $\mu\text{m}/\text{m}$

Retrait max 1400 $\mu\text{m}/\text{m}$

Le mortier a développé la majeure partie de son retrait en 10jours pour atteindre sa valeur maximale à 28jours.

III.3.1.1 Evolution de retrait du type des mortiers

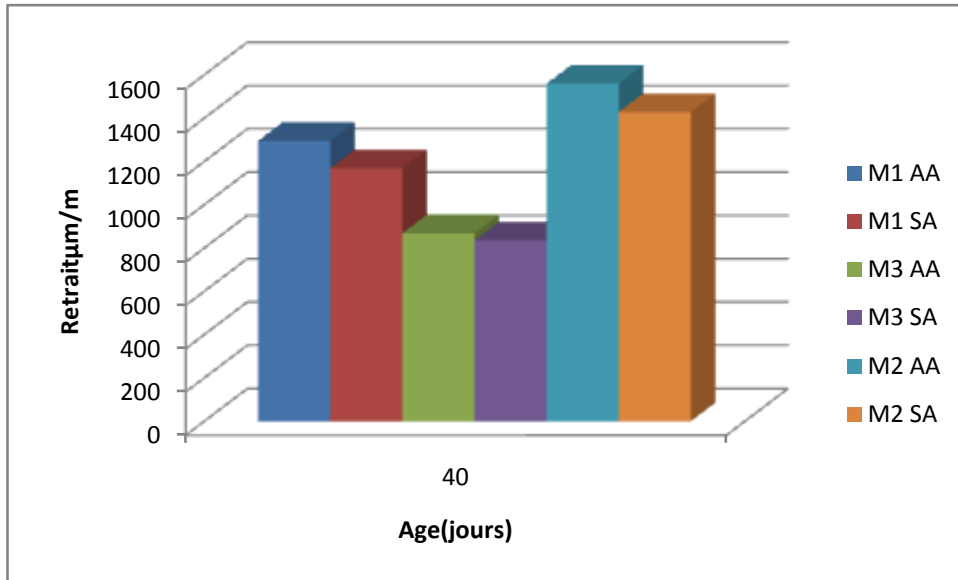


Figure III. 9. Evolution de retrait du type des mortiers

III.3.2 Essai d'Expansion Effet de la cure

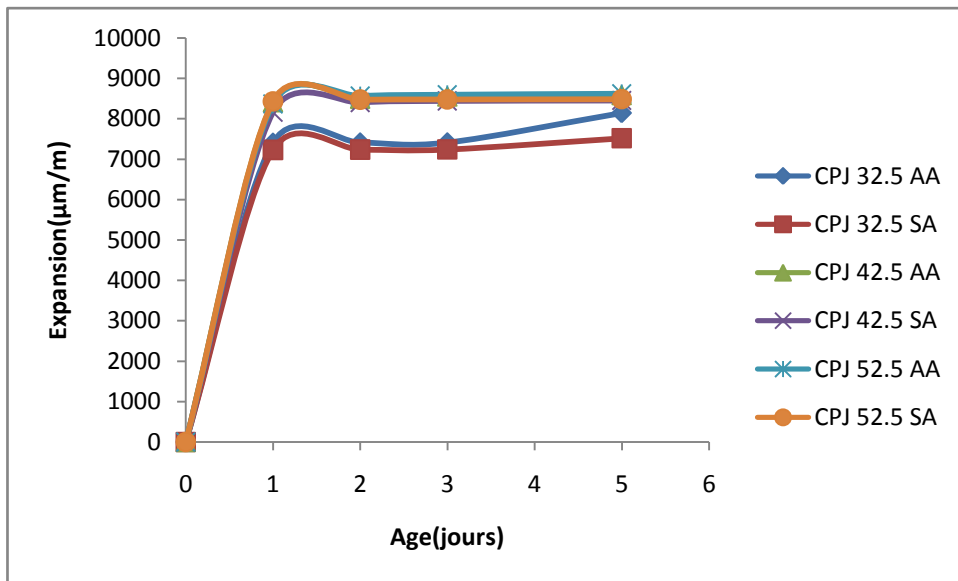


Figure III. 10. Variation du Expansion en fonction du type des mortiers

III.3.2.1 Evolution d'expansion du type de ciment

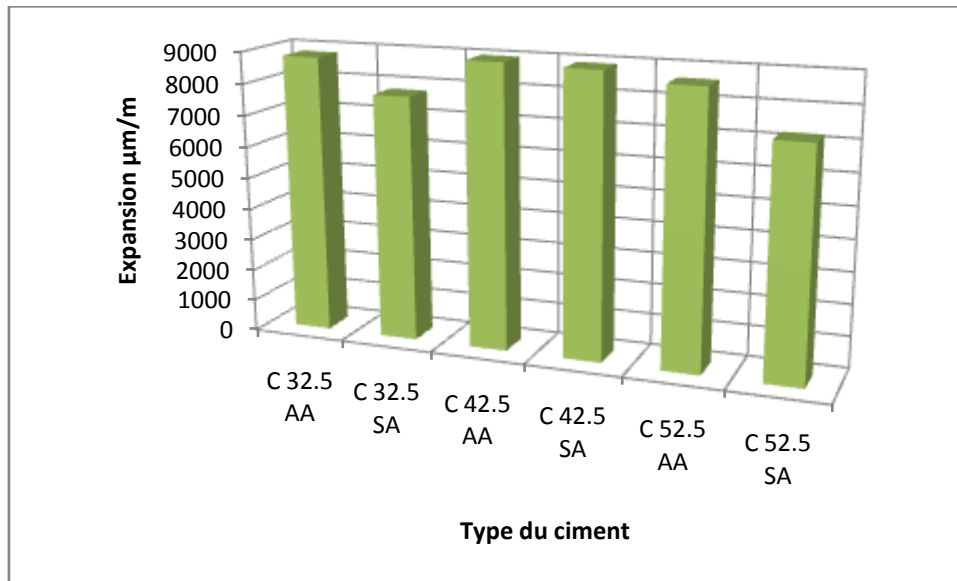


Figure III. 11. Evolution d'Expansion du type des mortiers

Sous l'eau les résultats font ressortir un contraste par rapport au retrait, c'est-à-dire que l'adjuvant n'accentue pas l'expansion d'une part et d'autre part c'est le mortier M3 qui montre le taux d'expansion le plus marqué pendant que le mortier M1 exhibe le taux d'expansion le plus faible. Une explication possible de ce comportement en déformation réside probablement dans les mécanismes d'hydratation des constituants des ciments qui conditionnent la structuration de la matrice donc celle de sa porosité car celle-ci influence le volume d'eau susceptible de s'évaporer dans le cas de la cure dans l'air ou au contraire de saturer encore plus la porosité dans le cas de l'immersion dans l'eau.

III.3.3 Essai de la résistance a la compression

III.3.3.1 Les contraintes

Cure 1: Air (Mortier SA)

Tableau III. 3. La résistance à la compression de mortiers SA (MPa)

	M1	M2	M3
7 (Jours)	14.41	15.02	21.23
14 (Jours)	16.72	18.23	28.11
28 (Jours)	23.85	22.89	32.08

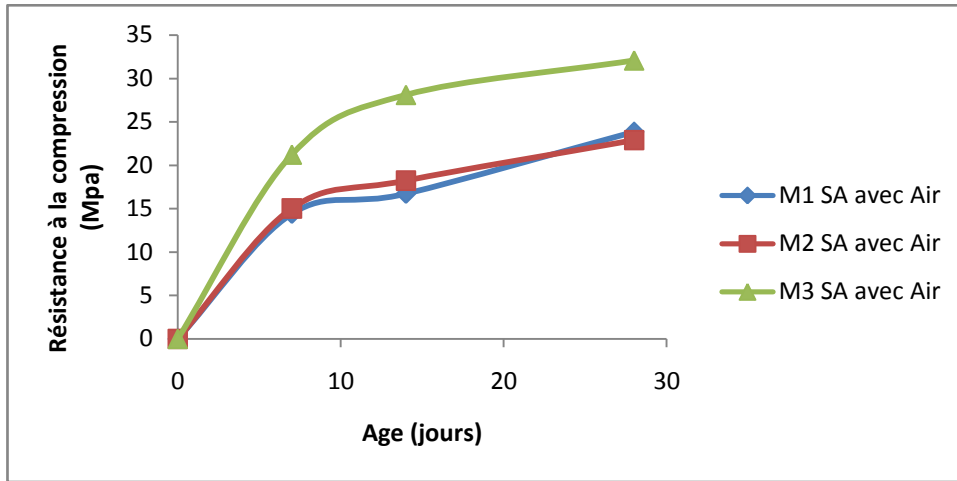


Figure III. 12. La résistance à la compression du mortier SA avec air

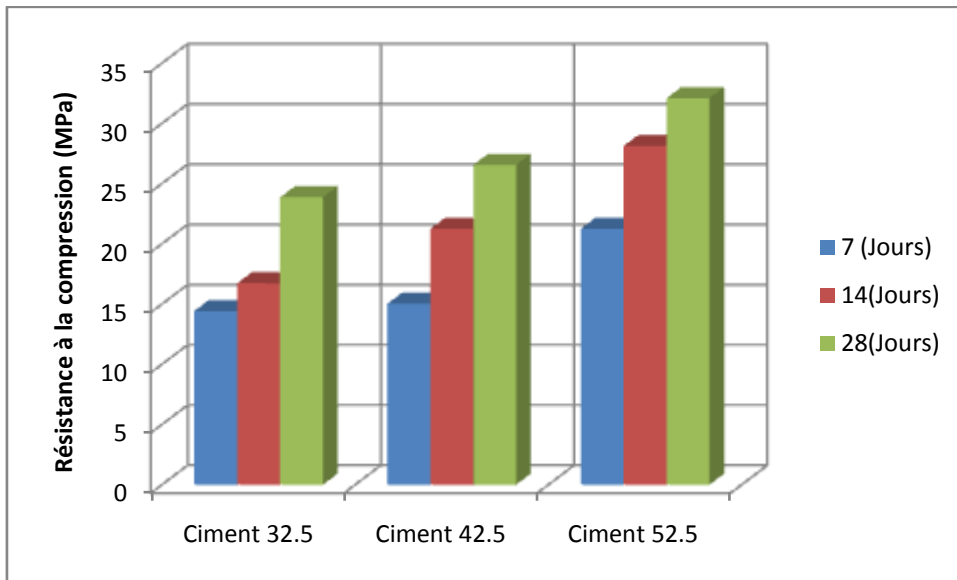


Figure III. 13. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec air (Mortier SA)

La (figure III.12 et 14) permet de relever les points suivants :

Cure 1 : à l'air

Le Mortier M3 SA à 28 jours avec 32.08 MPa la résistance la plus élevée comparativement aux mortiers similaires SA. Avec l'effet de l'adjuvant c'est encore le même mortier qui affiche la résistance la plus élevée avec 30.22 MPa. Par ailleurs nous notons que l'adjuvant diminue la résistance contrairement au cas de M1 et M2.

Tableau III. 4.La résistance à la compression de mortiers AA (MPa)

	M1	M2	M3
7(Jours)	20.2	17.84	24.66
14(Jours)	25.11	20.45	25.52
28(Jours)	29.07	26.56	30.22

Cure 1: Air (Mortier AA)

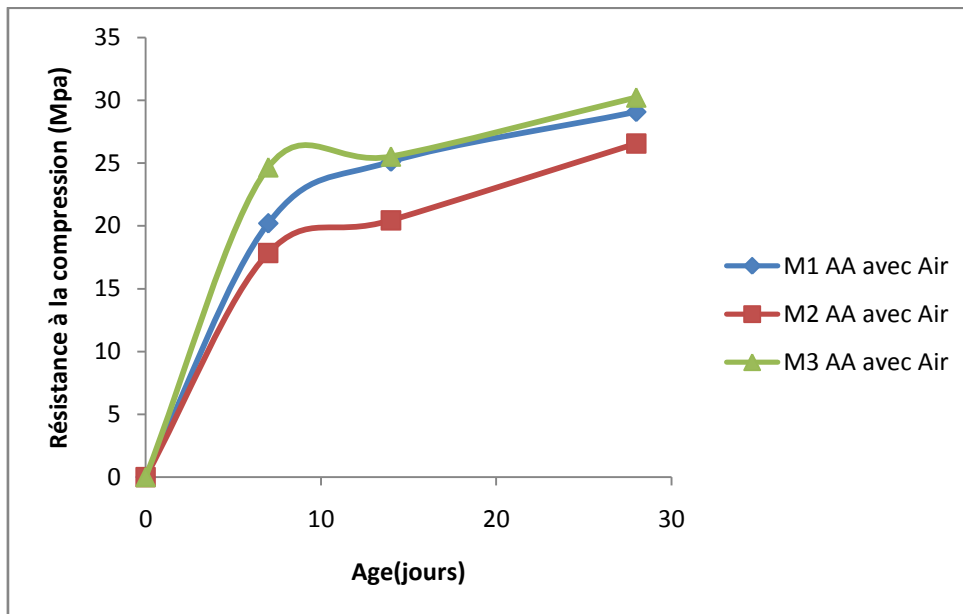


Figure III. 14.La résistance à la compression du mortier AA avec air

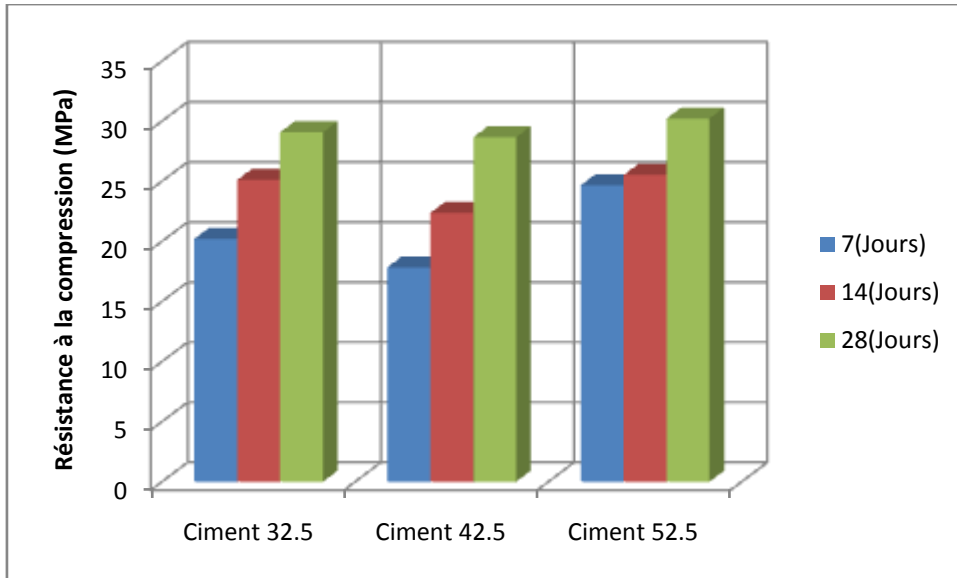


Figure III. 15. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec air (Mortier AA)

Cure 2 : Eau (Mortier SA)

Tableau III. 5. La résistance à la compression de mortiers SA(MPa)

	M1	M2	M3
7(Jours)	21.23	15.39	11.75
14(Jours)	25.10	18.45	22.31
28(Jours)	26.06	22.88	28.24

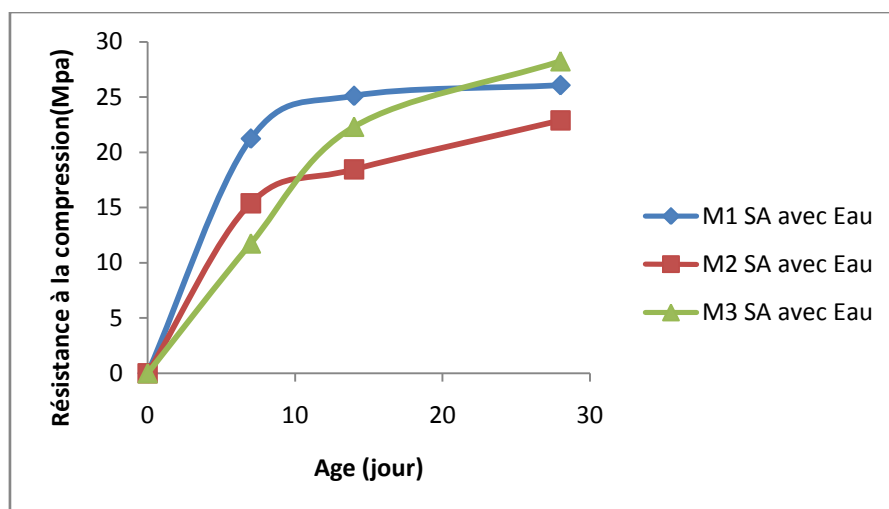


Figure III. 16. La résistance à la compression du mortier SA avec eau

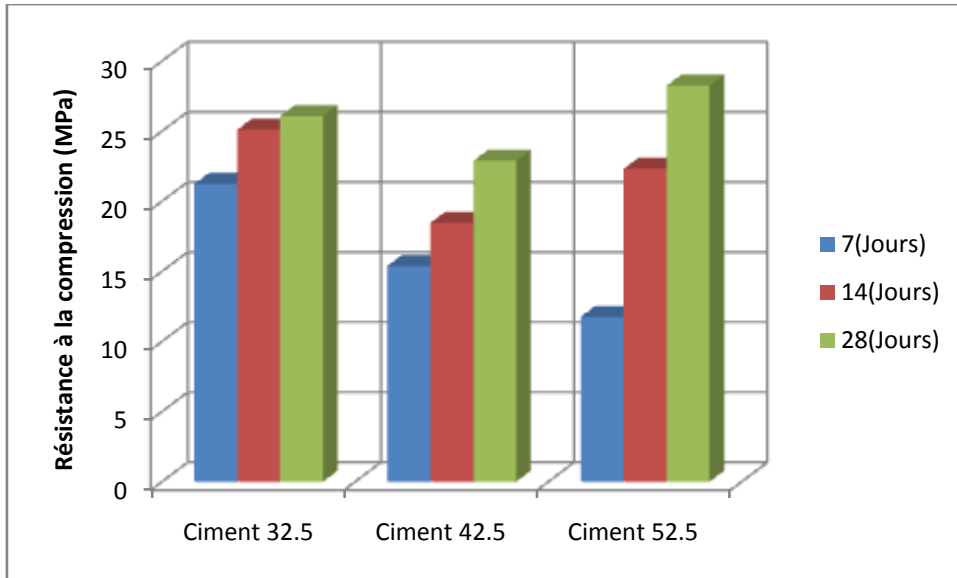


Figure III. 17. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec eau (Mortier SA)

Cure 2 : Eau (Mortier AA)

Tableau III. 6. La résistance à la compression de mortiers AA(MPa)

	M1	M2	M3
7(Jours)	33.10	18.09	13.51
14(Jours)	36.49	26.28	29.04
28(Jours)	38.13	26.31	31.95

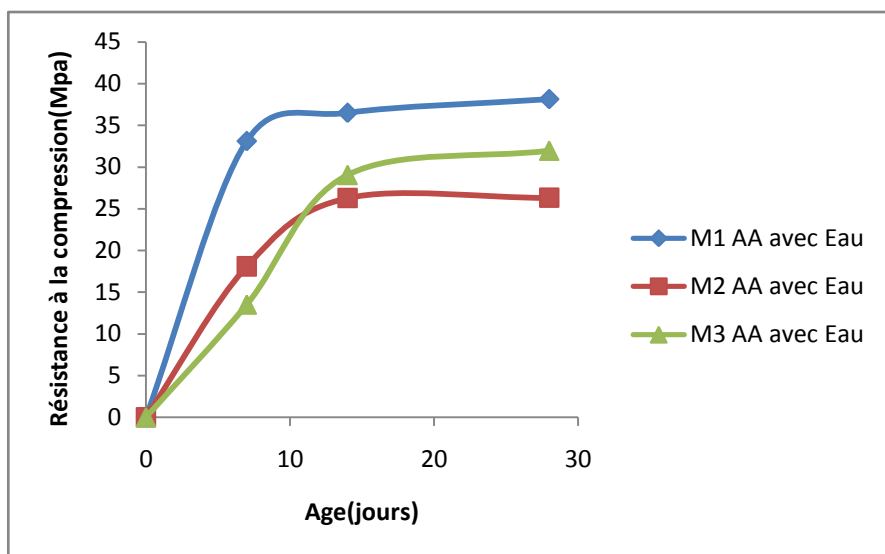


Figure III. 18. La résistance à la compression du mortier AA avec eau

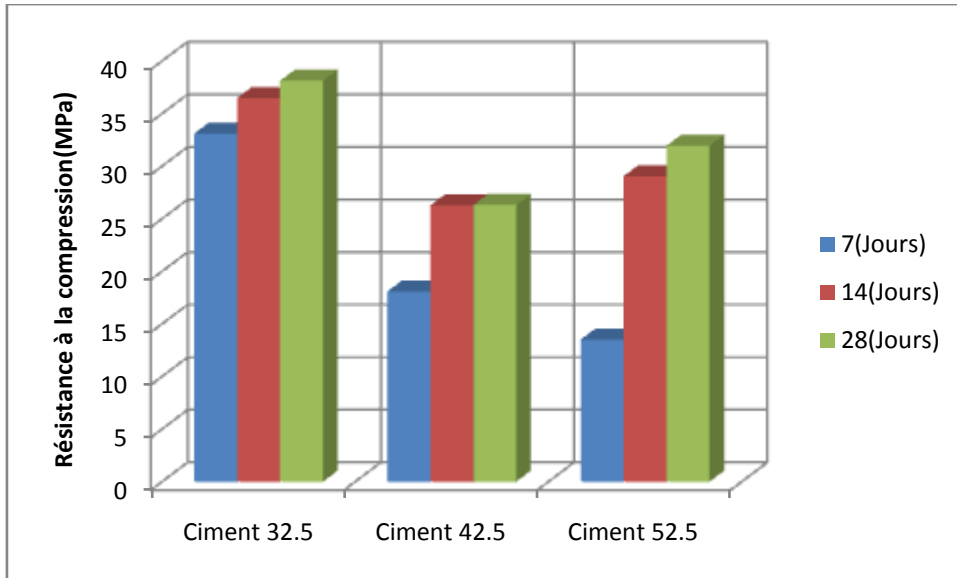


Figure III. 19. Evolution de la résistance en compression du type des mortiers avec eau (Mortier AA)

La (figure III.16 et 18) permet de relever les points suivants :

Cure 2 : à l'eau

Le Mortier M3 SA exhibe à 28 jours avec 28.24MPa la résistance la plus élevée comparativement aux mortiers similaires SA succédant au mortier M1 avec 26.06MPa.

Avec adjuvant c'est M1 qui enregistre la valeur la plus élevée avec 38.13MPa suivi par M3 avec 31.95MPa ensuite par M2 avec 26.31MPa

III.4 Essai d'absorption

III.4.1 Mortier SA

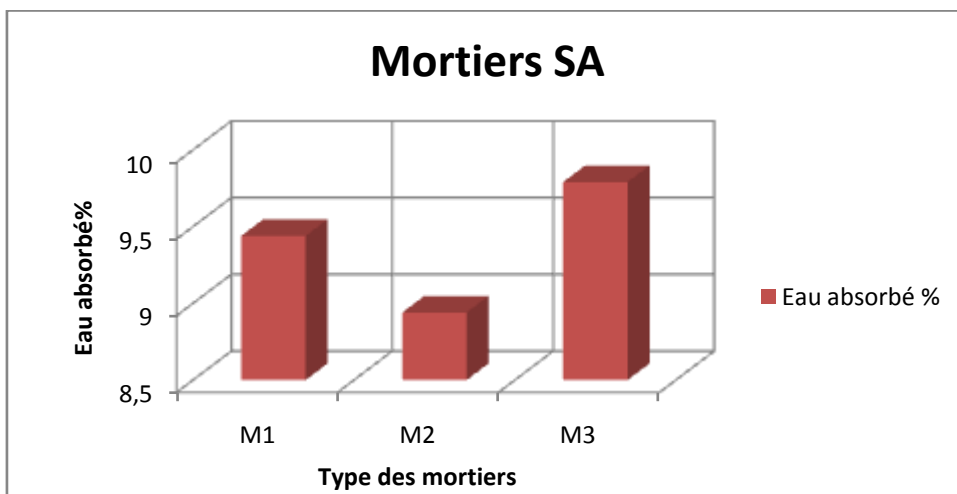


Figure III. 20. L'absorption d'eau en fonction de type de mortiers

III.4.2 Mortier AA

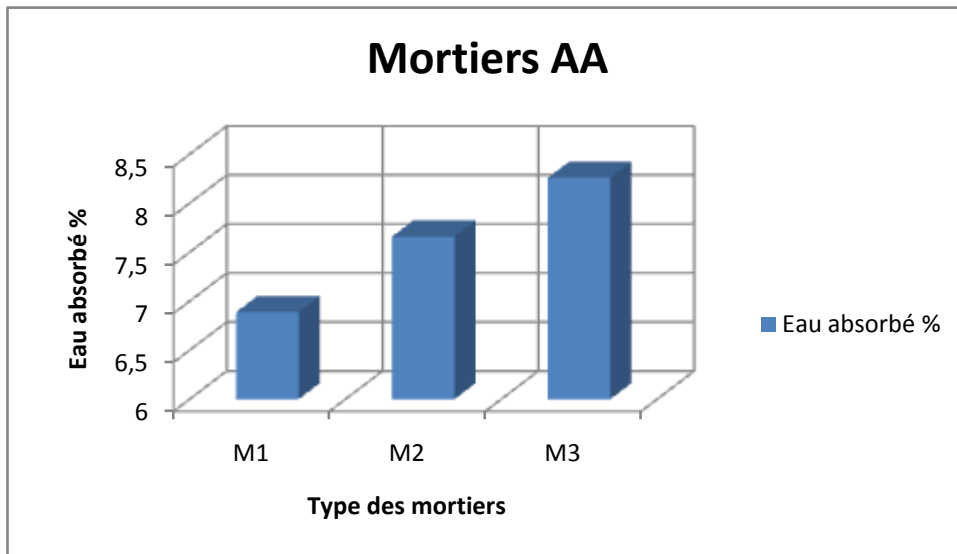


Figure III. 21.L'absorption d'eau en fonction de type de mortiers

Les deux (figures III.20 et III.21) montrent que le mortier M3 qui à l'absorption la plus forte signe probable d'une porosité ouverte importante.

III.5 Synthèse des résultats

Cure 1: Air

Tableau III. 7. Les différents paramètres de formulation (Air)

		Maniabilité (E/C)	Réduction d'eau (%)	Résistance (MPa)	Retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Absorption (%)
M1	AA	0.48	27	29.07	1180	6.89
	SA	0.61		23.85	1118	9.44
M2	AA	0.52	23	28.66	1400	7.66
	SA	0.64		26.55	1240	8.94
M3	AA	0.55	15	32.08	800	8.26
	SA	0.63		30.22	780	9.79

Le (tableau III.7) de synthèse ci-dessus établit une corrélation entre les différents paramètres de formulation. Il permet de tirer les principaux enseignements:

-Le Super plastifiant améliore la maniabilité et la résistance en compression dans tous les cas.

-Le mortier M1 adjuvant exhibe la meilleure maniabilité et l'absorption la plus faible avec cependant un retrait plus important. La résistance est pour sa part améliorée comparativement à celle du mortier sans adjuvant. Ces observations permettent de considérer que le mortier M1 possède une faible porosité alliée à une bonne microstructure procurée par une hydratation bien entretenue. Ce résultat illustre l'importance du choix de l'adjuvant en fonction de la qualité recherchée.

-L'absorption est comparable pour les trois types de mortier

Cure 2: Eau

Tableau III. 8. Les différents paramètres de formulation (Eau)

		Maniabilité (E/C)	Reduction d'eau (%)	Résistance (MPa)	Expansion (%)	Absorption (%)
M1	AA	0.48	27	38.13	1.66	6.89
	SA	0.61		26.06	1.02	9.44
M2	AA	0.52	23	26.31	1.55	7.66
	SA	0.64		22.88	1.26	8.94
M3	AA	0.55	15	31.95	1.44	8.26
	SA	0.63		28.24	1.37	9.79

De manière similaire le tableau permet de tirer les conclusions suivantes par mortiers :

M1 : meilleure maniabilité, meilleure résistance, absorption la plus faible, mais expansion la plus élevée

Matrice bien structurée avec une faible porosité c'est le résultat d'une bonne hydratation entretenue par un milieu saturé. L'expansion peut être due à la saturation de la porosité dans un volume de pate facilement déformable car la formation d'hydrates expansifs est peu probable dans ce cas précis.

M2 et M3 sous l'eau l'adjuvant améliore la résistance et l'absorption mais accentue l'expansion

Chapitre IV : Durabilité

IV.1 Introduction

La durabilité des matériaux cimentaires est un thème largement traité dans la littérature mais généralement avec une approche beaucoup plus axée sur le côté béton et mortiers conventionnels que sur le côté mortiers de sables dunaires. En effet et bien que de nombreuses études ont porté sur l'aptitude de tels mortiers à résister aux effets de situations d'attaques certains types d'attaque telles que celle des sulfates demeurent encore mal connus. Plus particulièrement l'influence de certains paramètres tels que la nature de l'agent d'attaque, celle de la structure interne du mortier et de sa composition, l'intensité de l'attaque pour ne citer que ces éléments nécessitent encore des recherches.

Par ailleurs, en Algérie, certaines régions telles que le Sahara sont réputées pour les teneurs élevées en sulfates et de nombreuses constructions ont subi de graves désordres en relation avec cette situation. Le travail que nous présentons porte justement sur le comportement de mortiers à base de sable dunaire vis-à-vis de l'attaque de deux types de sulfates à des intensités croissantes. Il est bien clair qu'une étude exhaustive de la durabilité nécessite un suivi permanent de l'ensemble des paramètres d'influence sur une durée suffisante de laquelle nous ne disposons pas et c'est pour des raisons liées au temps disponible (40jours), que nous nous sommes limités à une étude comparative sur l'effet des deux types d'attaque sur les caractéristiques physiques (Expansion et variation de masse).

Les essais utilisés pour étudier la résistance des mortiers aux attaques sulfatiques sont très divers [26]. Ils ont deux fonctions principales : dégrader le mortier et quantifier cette dégradation. Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans les solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste à immerger des éprouvettes en mortier dans des solutions sulfatiques ($MgSO_4$ et Na_2SO_4) à des teneurs croissantes. et à évaluer périodiquement les modifications subies par ces éprouvettes.

Milieus de conservation :

- 1-Solution à 2% de Na_2SO_4
- 2-Solution à 5% de Na_2SO_4
- 3-Solution à 10% de Na_2SO_4

4-Solution à 2% de $MgSO_4$

5-Solution à 5% de $MgSO_4$

6-Solution à 10% de $MgSO_4$

Les principaux paramètres de durabilité étudiés sont le suivi de la variation de masse et celui de la variation dimensionnelle sur des prismes (2,5 x 2,5 x 28,5 cm)

Dans ce qui suit nous dressons le bilan des attaques sous forme de tableaux. Il faut d'abord noter que l'examen visuel de toutes les éprouvettes a révélé des dépôts de calcite sur les faces externes visuelle de l'état Une analyse sommaire et des tentatives de discussion et d'exploitation de ces résultats sont données.

IV.2 Attaques sulfatiques externes

Présentation

Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de magnésium (2%,5% et 10% $MgSO_4$) et sulfate de sodium (2%,5% et 10% Na_2SO_4) ont été effectuées. Mortier on a réalisé des essais physiques sur des éprouvettes de mortiers immergés pendant 43 jours. Pour cela on a procédé comme suit :

- Suivi de la variation de masse ;
- Suivi de la variation dimensionnelle sur des prismes (2,5 x 2,5 x 28,5 cm) (Expansion) selon la norme ASTM C1012 [24].
- Analyse visuelle de l'état des éprouvettes.

IV.3 Suivi de la variation de la masse

IV.3.1 La solution de Na_2SO_4

La variation de la masse de la solution Na_2SO_4 , $MgSO_4$ est ulster dans les tableaux suivant Tableau IV. 1 et Tableau IV. 2 respectivement

IV.3.1 La solution de Na₂SO₄

Tableau IV. 1.Variation de masse de la solution de Na₂SO₄ (%)

Type de mortier	Na ₂ SO ₄ 2%						Na ₂ SO ₄ 5%						Na ₂ SO ₄ 10%					
	M1		M2		M3		M1		M2		M3		M1		M2		M3	
	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA
3 jours	1.5	0.6	4.8	0.4	0.7	1.9	0.4	1.6	4.8	0.8	0.6	2.2	0.6	3.05	3.7	1.97	0.7	3.3
18 jours	1.5	4.9	6.14	1.7	2.3	5.18	2.6	4.7	8.16	0.4	2.5	5.3	0.8	5.07	7	4.9	0.8	6.3
43 jours	2.8	5.07	8.8	2.9	3.5	6.5	3.08	6.01	9.5	1.2	4.04	6.6	2.06	6.3	8.3	6.3	8.7	7.5

IV.3.2 La solution de MgSO₄

Tableau IV. 2.Variation de masse de la solution de MgSO₄ (%)

Type De mortier	MgSO ₄ 2%						MgSO ₄ 5%						MgSO ₄ 10%					
	M1		M2		M3		M1		M2		M3		M1		M2		M3	
	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA
3 jours	0.6	3.6	3.8	0.17	1.4	0.4	1.2	2.9	0.6	1.07	0.55	2.3	5.05	1.2	4.3	4.3	1.03	0.6
18 jours	2.5	6.7	7.07	1.4	1.7	3.5	4.5	6.07	2.6	1.9	2.5	5.5	1.8	4.4	7.5	1.6	2.13	3.5
43 jours	3.8	7.8	8.4	4.6	3.08	4.8	5.8	7.35	4	2.3	4.07	6.7	0.5	5.6	8.9	0.3	2.3	3.7

IV.4 Suivi de la variation dimensionnelle

La détermination des variations dimensionnelles est réalisée sur des échantillons prismatiques (2,5 x 2,5 x 28,5 cm) immergés dans la solution de sulfates. Quatre échantillons de chaque formulation sont étudiés. Cet essai est effectué selon le mode opératoire recommandé par la norme ASTM C1012 [24]. La variation de longueur de l'échantillon à l'échéance i est donnée par la formule

Suivante :

$$\Delta L_i = \left(\frac{L_i - L_0}{L_g} \right) \times 100$$

Avec :

- changement de longueur à l'échéance i en %
- L_i Lecture prise à l'échéance i en mm
- L_0 Lecture initiale en mm
- L_g Longueur de la tige étalon, en général $L_g = 250$ mm

IV.4.1 La solution de Na₂SO₄

Tableau IV. 3.Variation dimensionnelle de la solution de Na₂SO₄ (%)

Type de mortier	Na ₂ SO ₄ 2%						Na ₂ SO ₄ 5%						Na ₂ SO ₄ 10%					
	M1		M2		M3		M1		M2		M3		M1		M2		M3	
	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA
3jours	1.2	0.64	1.04	0.96	0.37	0.75	0.83	0.80	1.16	0.75	1.12	0.87	1.10	0.48	0.82	0.95	0.6	1.3
18 jours	1.74	1.06	1.52	1.4	0.83	1.23	1.10	1.27	1.6	1.4	1.6	1.35	1.5	0.95	1.6	1.43	1.11	1.74
43 jours	1.98	1.3	1.71	1.66	1.05	1.43	1.34	1.45	1.8	1.7	1.88	1.55	1.78	1.2	1.8	1.67	1.3	1.94

IV.4.2 La solution de MgSO₄Tableau IV. 4. Variation dimensionnelle de la solution de MgSO₄ (%)

Type de mortier	MgSO ₄ 2%						MgSO ₄ 5%						MgSO ₄ 10%					
	M1		M2		M3		M1		M2		M3		M1		M2		M3	
	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA	AA	SA
3 jours	0.98	0.9	1	0.6	0.52	1.08	1.04	1.26	1.2	1.04	0.73	0.48	0.9	0.7	1.36	0.64	1.29	0.45
18 jours	1.5	1.42	1.48	1	1	1.60	1.52	1.75	2	1.87	1.20	0.96	1.38	1.15	1.84	1.12	1.77	0.7
43 jours	1.7	1.5	1.98	1.24	1.20	1.84	1.77	1.9	2.16	2.04	1.4	1.15	1.56	1.30	2.02	1.3	2	0.9

IV.5 Inspection visuelle

L'examen visuel de toutes les éprouvettes a révélé des dépôts de calcite sur les faces externes. Ce fait est conforme avec la littérature qui explique ce phénomène par la cristallisation consécutive à la dissolution de la Portlandite suite à l'attaque



Figure IV. 1. Effet de la solution de $MgSO_4$ (%) Effet de la solution de Na_2SO_4 (%)

IV.6 Absorption massique

La mesure de la capacité d'absorption permet de mesurer la porosité ouverte du mortier. La capacité d'absorption varie en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions (micropores et pores capillaires). On détermine un coefficient d'absorption massique, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse (poids) de l'éprouvette de mortier après imbibition par l'eau, à la masse (poids) sèche de l'éprouvette. Cette imbibition est obtenue par l'immersion du matériau dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption (A_m) est défini par la relation suivante:

$$A_m = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100$$

P_s : poids de l'éprouvette sèche après passage à l'étuve à 105 °C.
 P_h : poids de l'éprouvette imbibée.

Les résultats de l'essai d'absorption massique sont illustrés. D'après les résultats obtenus. L'ajout de sable alluvionnaire ou sable dunaire dans des mélanges binaires ou ternaires à diminuer la capacité d'absorption par diminution de la porosité, c'est-à-dire, la diminution du nombre de vides et des pores existants dans le mortier qui devient ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau. Les résultats montrent que l'introduction de sable dunaire conduit à une

IV.7 Absorption d'eau

IV.7.1 Type de ciment

diminution de l'absorption et donc la porosité, ce qui confirme le remplissage de pores existants par les types des ciments. La substitution du ciment (CMII 42.5 et 32.5 et CPJ 52.5) permet de réduire le pourcentage des fines existant dans le ciment, ces fines sont responsables à l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau. Étudié l'absorption des mortiers à base de différents sables ; un sable alluvionnaire, un sable dunaire et un sable mélange alluvionnaire dunaire. Il a constaté que l'absorption d'eau diminue avec l'utilisation de sable mélange. Ceci est dû à la bonne distribution granulométrique, qui donne des mortiers moins poreux par rapport les mortiers de sable dunaire qui sont caractérisés par une structure poreuse vu le manque de fines dans le sable dunaire. [25]

IV.8 Valeur maximale de ΔL et ΔM en fonction de pourcentages (%)

IV.8.1 La solution de Na_2SO_4

Tableau IV. 5. Valeur maximale de ΔL et ΔM de Na_2SO_4 (%)

		2%		5%		10%	
		ΔM	ΔL	ΔM	ΔL	ΔM	ΔL
M1	AA	2.8	1.98	3.08	1.34	2.06	1.78
	SA	5.07	1.3	6.01	1.45	6.3	1.2
M2	AA	8.84	1.71	9.5	1.8	8.3	1.8
	SA	2.9	1.66	1.2	1.7	6.3	1.67
M3	AA	3.5	1.05	4.04	1.88	8.7	1.3
	SA	6.5	1.43	6.6	1.5	7.5	1.94

Les valeurs indiquées dans le tableau permettent de relever les observations suivantes:

Le mortier M2 exhibe à 5% simultanément une augmentation de masse et une expansion maximale ce qui peut indiquer qu'il y'a formation de produits à la fois expansifs et massifs.

IV.8.2 La solution de $MgSO_4$

Tableau IV. 6. Valeur maximale de ΔL et ΔM de $MgSO_4$ (%)

		2%		5%		10%	
		ΔM	ΔL	ΔM	ΔL	ΔM	ΔL
M1	AA	3.8	1.7	5.8	1.77	5.05	1.56
	SA	7.8	1.5	7.35	1.9	5.6	1.3
M2	AA	8.4	1.98	4	2.16	8.9	2.02
	SA	4.6	1.24	2.3	2.04	4.3	1.3
M3	AA	3.08	1.2	4.07	1.4	2.3	2
	SA	4.8	1.84	6.7	1.15	3.7	0.9

Le tableau permet de remarquer que globalement l'attaque au $MgSO_4$ est plus sévère que celle du Na_2SO_4 . Il fait ressortir que l'attaque est plus marquée pour le mortier M1 avec et sans adjuvant

IV.9 Synthèse des résultats

Les tableaux récapitulatifs (Tableau IV.5 et IV.6) permettent de tirer les conclusions suivantes :

Attaque à 2% :

Pour M1 et M2 l'attaque la plus sévère est celle du $MgSO_4$ du point de vue variation de masse et pour l'expansion.

Pour M3 c'est le $NaSO_4$ qui est le plus nocif

Attaque à 5%

C'est le Mg qui donne les effets les plus sévères pour M1 et M2.

Pour M3 les effets sont du même ordre et il n'est pas possible de conclure.

Attaque à 10%

Les résultats nécessitent de distinguer les effets pour chaque cas

Pour M3 c'est le Na_2SO_4 qui est le plus nocif

Pour M1 AA C'est le MgSO_4 pour ΔM et Na pour ΔL

Pour M1 SA C'est le Na_2SO_4 pour ΔM et Mg pour ΔL

Pour M2 AA C'est le MgSO_4 pour ΔM et pour ΔL

Pour M2 SA C'est le Na_2SO_4 pour ΔM et pour ΔL

A noter que pour M1 et M2 l'adjuvant a pour effet de permuter entre les agents d'attaque car on voit que sans Adjuvant c'est l'attaque au Sodium qui est la plus sévère pendant qu'avec L'adjuvant le Mg devient plus agressif.

L'interprétation de ces résultats nécessitent des moyens d'analyse microstructurale qui ne sont pas disponibles néanmoins la littérature décrits des mécanismes semblent être conformes à ceux auxquels nous avons abouti pour M1 et M2 [14]

Conclusion Générale

Le travail que nous avons effectué et du quel nous présentons la conclusion avait pour objectif l'étude de la durabilité d'un mortier de sable dunaire et de sable alluvionnaire vis-à-vis des attaques de sulfates d'intensité croissante. En plus de la recherche bibliographique et de la caractérisation des matériaux et avant d'aborder la durabilité proprement dite, nous avons étudié l'influence de la variation des types de ciment sur les performances physico-mécaniques des mortiers. En effet plusieurs chercheurs ont rapporté que le degré d'agressivité des attaques des sulfates dépendait des types de ciment et plus particulièrement de leurs teneurs en Aluminate tricalcique C_3A et de certains alcalins. Il est donc naturel de connaître au préalable les valeurs de référence des caractéristiques physico-mécaniques des différents mortiers. Dans ce qui suit nous présentons les principales conclusions en deux volets à savoir formulation et durabilité:

Formulation :

1-Les différents mortiers ont exhibé des comportements distincts selon la situation considérée que nous détaillons comme suit :

Pour ce qui est de la maniabilité dans chaque cas le SP a permis d'avoir une réduction de l'eau avec cependant une efficacité variable détaillée dans le corps du texte. Le mortier avec le ciment 32.5 exhibe un meilleur gain en termes de réduction d'eau c'est-à-dire une meilleure maniabilité suivie par le 42.5 le moins performant étant le 52.5.

Retrait

Pour tous les types de ciment l'évolution du retrait suit deux phases principales :

-Une première se caractérisant par un développement rapide pendant laquelle le retrait atteint pratiquement 90 % de sa valeur maximale.

-La deuxième phase se caractérise par une nette diminution du taux de croissance

-Pour chaque type de ciment L'adjuvant a pour effet d'accentuer le retrait.

-Le mortier M3 confectionné avec le CEM 52.5 exhibe le retrait le plus faible avec une valeur de $845\mu\text{m/m}$ à 40jours. Cette valeur est comparable à celle d'un béton conventionnel $900\mu\text{m/m}$. Donc on peut conclure que ce type de mortier peut être envisagé pour la réparation du béton compte tenu du fait qu'il satisfait au critère de compatibilité.

Expansion

Sous l'eau les résultats font ressortir un contraste par rapport au retrait, c'est-à-dire que l'adjuvant n'accentue pas l'expansion d'une part et d'autre part c'est le mortier M3 qui montre le taux d'expansion le plus marqué pendant que le mortier M1 exhibe le taux d'expansion le plus faible. Une explication possible de ce comportement en déformation réside probablement dans les mécanismes d'hydratation des constituants des ciments qui conditionnent la structuration de la matrice donc celle de sa porosité car celle-ci influence le volume d'eau susceptible de s'évaporer dans le cas de la cure dans l'air ou au contraire de saturer encore plus la porosité dans le cas de l'immersion dans l'eau.

Les contraintes

La cure influence de manière marquée les contraintes :

-Cure 1 : à l'air

Le Mortier M3 SA exhibe à 28 jours avec 32.08MPa la résistance la plus élevée comparativement aux mortiers similaires SA. Avec l'effet de l'adjuvant c'est encore le même mortier qui affiche la résistance la plus élevée avec 30.22MPa . Par ailleurs nous notons que l'adjuvant diminue la résistance contrairement au cas de M1 et M2.

-Cure 2 : à l'eau

Le Mortier M3 SA exhibe à 28 jours avec 28.24MPa la résistance la plus élevée comparativement aux mortiers similaires SA succédant au mortier M1 avec 26.06MPa .

Avec adjuvant c'est M1 qui enregistre la valeur la plus élevée avec 38.13MPa suivi par M3 avec 31.95MPa ensuite par M2 avec 26.31MPa

Essai d'absorption

Le mortier M3 qui à l'absorption la plus forte signe probable d'une porosité ouverte importante.

Durabilité

Les résultats obtenus attirent les observations suivantes :

-Attaque à 2% :

Pour M1 et M2 l'attaque la plus sévère est celle du $MgSO_4$ du point de vue variation de masse et pour l'expansion.

Pour M3 c'est le Na_2SO_4 qui est le plus nocif

Attaque à 5%

C'est le Mg qui donne les effets les plus sévères pour M1 et M2.

Pour M3 les effets sont du même ordre et il n'est pas possible de conclure.

Attaque à 10%

Les résultats nécessitent de distinguer les effets pour chaque cas

Pour M3 c'est le Na_2SO_4 qui est le plus nocif

Pour M1 AA C'est le Mg pour ΔM et Na pour ΔL

Pour M1 SA C'est le Na pour ΔM et Mg pour ΔL

Pour M2 AA C'est le Mg pour ΔM et pour ΔL

Pour M2 SA c'est le Na pour ΔM et pour ΔL

A noter que pour M1 et M2 l'adjuvant a pour effet de permuter entre les agents d'attaque car on voit que sans Adjuvant c'est l'attaque au Sodium qui est la plus sévère pendant qu'avec L'adjuvant le Mg devient plus agressif.

L'interprétation de ces résultats nécessite des moyens d'analyse microstructurale qui ne sont pas disponibles néanmoins la littérature décrits des mécanismes qui semblent être conformes à ceux auxquels nous avons abouti pour M1 et M2 [14]

Par contre pour M3 le fait que c'est l'attaque au Sodium qui donne les effets les plus marqués peut s'expliquer par la nature des composants du ciment et nécessite des investigations plus poussées. Enfin, pour ce qui est des caractéristiques mécanique et au stade actuel de l'expérience nous pensons que la durée n'est pas suffisante pour modifier ces caractéristiques. .

Recommandations et perspectives

Cette recherche a été limitée à l'étude de la durabilité des mortiers de sable dunaire vis-à-vis des attaques sulfatiques de sévérité croissante. D'autres aspects restent à élucider et enrichir dans des futurs travaux de recherche, nous recommandons ce qui suit :

- faire des essais avec un plan d'expérience pour avoir un modèle sur la durabilité des mortiers de sable dunaire vis-à-vis les attaques sulfatique .
- a prolongé la durée de suivi de ces attaques à long terme.
- faire une étude avec 3 types de super plastifiant et un type de ciment.
- variation d'autre type des acides et d'autre type de sable .

-

Références bibliographiques

- [1] Poinot. T, « influence des hydroxypropylguars sur les propriétés des mortiers de ciment à l'état frais » thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 Novembre 2013.
- [2] Chihaoui Ramdane : «Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif » (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [3] Saida Boualleg : « Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires» (Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiaf de M'sila-2004).
- [4] Azzouz. Hocine, « Etude des bétons à base des sables de dune » mémoire de magister, université Mohamed kheider Biskra, année 2009.
- [5] Bederina M., «Caractérisation mécanique et physique des bétons de sable à base de déchetsde bois», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, (2007), 166 p.
- [6] Kerbouche : «Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers» (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009).
- [7] Richard Gagné : GCI 714 - «Durabilité et réparations du béton» : Cours de génie civil (Université de Sherbrooke).
- [8] Adam M. Neville, « the confused world of sulfate attack on concrete » «Cement Concrete Research, 34, PP 1275-1296, 2002
- [9] Ahmed Soufiane Benosman «Performances Mécaniques et Durabilité des Matériaux Cimentaires Modifiés par Ajout de Polymère. These De Doctorat Présentée (PET) »2010.
- [10] Mekhermeche. A, « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes » mémoire de magister, université kasdi merbah Ouargla, année 2012.

- [11] J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ". (a.nonat :chapitre2 ; v. baroghel-bouny, b. capra, s. laurens : chapitre9 ; a. carles-gibergues, h.hornain :chapitre11 ; g. escadeillas, h. hornain: chapitre 12). (Edition : Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [12] R.J. Wig, G.M. Williams, «Investigations on the Durability of Cement Drain Tiles in Alkali Soils», Technological Papers of the Bureau of Standards, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., n. 44, p. 56, 1915.
- [13] R.J. Wig, G.M. Williams, A.N. Finn, «Investigations on the Durability of Cement Drain Tiles in Alkali Soils», Technological Papers of the Bureau of Standards, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., n° 95, p. 95, 1917.
- [14] Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie civil
Par : Melle: Soumaya Amina BENSALIR *Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs* 2009
- [15] AMMIHAMOU.H Et TALLIM « Amélioration de la capacité portante de poutres en béton arme endommagées et réparées par des mortiers cimentaires légers» mémoire de master 2014/2015
- [16] N.P. 18-560, Granulats Analyse granulométrique par tamisage, France, 1990.
- [17] Fiche technique "superplastifiant: Medaplast SP 40" GRANITEX, 2001, Oued Smar Alger
- [18] Ayachi Amor. M, « Etude des propriétés mécaniques du béton de sable de dunes » mémoire de master, université Kasdi Merbeh, Ouargla, année 2011.
- [19] NF P18-452 Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres
- [20] EN 196- 1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques .Indice de classement: P 15-471. Statut: Norme homologuée.
- [21] NF P 15 – 433, Février 1994: Méthodes d'essais des ciments: détermination du retrait et du gonflement. Indice de classement: P 15-433.

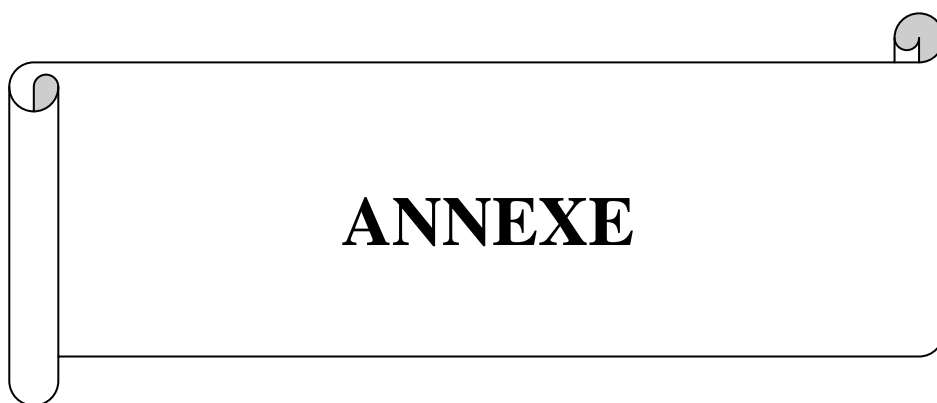
[22] AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », sous la direction de J.P. Ollivier, Toulouse, 1997, p. 283

[23] Grandubé, Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G.Arliguie et H. Hornain, Presses de l'ENPC, 2007, p. 437

[24] ASTM 2004, Standard test methods for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, ASTM C 1012-04, 2004

[25] Benabed B., Etude physico-mécanique et durabilité du mortier de sable dunaire de la région de Laghouat, Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2005, p. 130

[26] Rozière E., Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2007, p. 250



ANNEXE