

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

UNIVERSITÉ AMMAR TELIDJI À LAGHOUAT



Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil

Mémoire De Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
Option : Matériaux de Construction

Présenté par: **Nahoui Kheira & Barkati Fatima Zahra**

Thème

Etude de l'effet de type de sables sur la
durabilité des mortiers de ciment vis -à vis des
sulfates de magnésium

Membres de Jury:

Mr. Bederina Madani

Pr

Président

Mr. Makhloufi Zoubir

M C.A

Examineur

Mme. Bendjillali Khadra

M.C.B

Directrice de mémoire

Promotion 2017

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier dieu qui nous a donné le courage et la volonté d'achever ce travail.

*Nous exprimons toute notre profonde gratitude à Madame le Docteur **Bendjillali Khadra**, nôtre Directrice de mémoire, de nous avoir fait confiance pour mener à bien ce présent travail. Nous lui témoignons également nos profondes reconnaissances pour l'aide qu'elle nous a apporté, pour ses conseils et son soutien indéfectible tout au long de ce travail.*

*Nous remercions également Monsieur le Professeur **Bedérina Madani** d'avoir accepté de présider nôtre jury de soutenance.*

*Nous remercions aussi Monsieur le Docteur **Makhloufi Zoubir** d'avoir accepté d'examiner notre mémoire de Master.*

Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil, pour tout l'effort qui ont fait pour le bien de nôtre formation.

Nos vifs remerciements et notre sincère gratitude à tout le personnel du laboratoire de Génie Civil.

Enfin nous tenons à remercier, tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Kheira et Fatima

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A celle qui a veillé sur moi toujours, ma chère mère,

A mon très cher père,

A toute ma famille, mes frères et mes sœurs,

A tous mes amis,

A tous les enseignants du département de génie civil.

Kheira

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Chapitre I : Etude Bibliographique

Tableau (I-1) : Epaisseur des unités Litho-Stratigraphique Carbonatées du Mésozoïque dans la région de Laghouat	07
Tableau (I-2) : Valeurs limites pour les classes d'exposition en cas attaque chimique	11
Tableau (I-3) : Solubilité des différents sulfates dans l'eau à 20°C	15

Chapitre II : Caractérisation et Essais Expérimentaux

Tableau (II-1) : Masses volumiques des matériaux	21
Tableau (II-2) : Valeurs d'équivalent de sable	21
Tableau (II-3) : Propriétés des matériaux utilisés	23
Tableau (II-4) : Analyse granulométrique des différents sables utilisés.....	24
Tableau (II-5) : Coefficients des sables utilisés.....	25
Tableau (II-6) : Propriétés physiques du ciment	27

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre I : Etude Bibliographique

Figure (I-1) : Absorption massique des différents mortiers.....	09
Figure (I-2) : Influence de mouillage- séchage sur la résistance des mortiers.....	10
Figure (I-3) : Schéma des couches du gypse et de l'ettringite Causées par une attaque par les sulfates externes.....	13
Figure (I-4) : Ettringite secondaire massive mal cristallisée expansive formée topo chimiquement	17

Chapitre II : Caractérisation et Essais Expérimentaux

Figure (II-1) : Essai de l'équivalent de sable	21
Figure (II-2) : Moule et dame pour mesure du coefficient d'absorption.....	23
Figure (II-3) : Courbes granulométriques des sables utilisés	25
Figure (II-4) : Analyse minéralogique des sables et du ciment	27
Figure (II-5) : Malaxeur à mortiers	28
Figure (II-6) : Maniabilimètre B à mortiers	29
Figure (II-7) : Moules prismatiques (4×4×16) cm ³ et machine de vibration.....	29
Figure (II-8) : Conservation des éprouvettes	30
Figure (II-9) : Essai d'absorption capillaire	32
Figure (II-10) : Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques	33
Figure (II-11) : Essai de flexion à 3 points	33
Figure (II-12) : Essai de compression	34

Chapitre III : Résultats et Interprétations

Figure (III-1) : Variation du temps d'écoulement des mortiers en fonction d'E/C	36
Figure (III-2) : Coefficient d'absorption des mortiers.....	37
Figure (III-3) : Absorption d'eau par capillarité des mortiers.....	38
Figure (III-4) : Evolution du gain en masse en fonction de l'âge.....	39
Figure (III-5) : Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge.....	40
Figure (III-6) : Résistance à la compression en fonction de l'âge.....	42
Figure (III-7) : Eprouvettes du mortier immergées dans l'eau+chaux.....	43
Figure (III-8) : Eprouvettes du mortier immergées dans sulfate de magnésium MgSO ₄	44

RÉSUMÉS

Résumé

L'objectif de notre travail expérimental est l'étude de l'effet de la nature minéralogique du sable sur la durabilité des mortiers et sur leur résistance mécanique. Trois types de sables sont employés, un sable alluvionnaire, un sable dunaire et un sable concassé calcaire. Les mortiers sont soumis à une attaque chimique extérieure de sulfate de magnésium (de 5 % de concentration) accélérée par un essai de vieillissement produit par des cycles alternatifs de mouillage-séchage. Les échantillons sont exposés pendant trois mois à la solution sulfatique. Des essais de durabilité sont réalisés sur les échantillons, tels que l'essai d'absorption totale d'eau, l'essai de capillarité, l'essai de suivi de la perte de masse des mortiers et les essais mécaniques déterminant la résistance à la flexion et à la compression des mortiers après leur exposition au milieu agressif sulfatique.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que l'absorption des mortiers de sable de dune MSD et du sable calcaire MSC est plus grande que celle du mortier de sable alluvionnaire MSA .

Le mortier à sable calcaire MSC a donné la meilleure résistance à la traction par flexion dans le sulfate de magnésium MgSO_4 ; et le sable alluvionnaire MSA a présenté le meilleur comportement en compression dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .

ملخص

الهدف من العمل التجريبي هو دراسة تأثير الطبيعة المعدنية على ديمومة الملاط , ثلاث أنواع من الرمل إستعملنا : رمل الواد و الرمل الجيري و رمل الكتبان هذه العينات وضعت في محلول سيلفات المغنزيوم (ذو تركيز 5 %) لمدة ثلاثة أشهر, تسارعت بواسطة اختبار دورات الترتيب والتجفيف البديلة.

وقمنا بإجراء اختبارات الاستدامة على العينات بعد وضعها في محلول سيلفات المغنزيوم مثل اختبار امتصاص الماء الكلي، واختبار الشعيرات، واختبار مراقبة خسارة كتلة ، والاختبارات الميكانيكية .

وعلى ضوء النتائج المتحصل عليها وجدنا أن كل من الملاط المحضر من رمل الكتبان و الرمل الجيري له خاصية امتصاص ماء كبيرة مقارنة برمل الواد , أما التجارب الخاصة بالاختبارات الميكانيكية بينت من جهتها أن الرمل الجيري يعطي أفضل النتائج في الشد بينما رمل الواد أظهرت مقاومته الجيدة لإختبارات الضغط وذلك في سيلفات المغنزيوم ($MgSO_4$)

Abstract

The purpose of the experimental work is to study the effect of mineral nature on the durability of mortar. Three types of sand were used: river sand, limestone sand and dune sand. These samples were placed in a solution of magnesium sulfate (5% concentration) for three months, accelerated by alternative moisturizing and drying cycles.

We performed sustainability tests on samples (after placing them in magnesium sulfate solution) such as total water absorption test, capillary testing, mass loss control test, and mechanical testing.

In the light of the results obtained, the absorption of MSD dune sand mortars and MSC limestone sand is greater than that of MSA.

The limestone sand mortar MSC sand gives the best flexural tensile strength in magnesium sulphate MgSO_4 ; and alluvial sand MSA exhibited the best compression behavior in magnesium sulphate MgSO_4 .

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction Générale

Le béton est sans aucun doute été depuis longtemps, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction, il demeure le matériau privilégié pour la fabrication d'éléments structuraux. Mais il se dégrade sous l'effet de l'agressivité de l'environnement tel que les facteurs climatiques de température et d'hygrométrie et les attaques chimiques dans les milieux agressifs.

Les structures de béton en contact avec les milieux agressifs peuvent être sensiblement attaquées. Une pluie acide, un sol de fondation agressif ou des produits chimiques stockés dans le béton, présentent souvent des problèmes de durabilité dus aux attaques chimiques, ce qui justifie les dégradations importantes des ouvrages en béton et même conduire à leurs ruines. L'attaque par les acides provoque des dissolutions et des érosions, tandis que l'attaque saline provoque des fissurations et des éclatements. Tous ces mécanismes à la limite compromettre l'aptitude au service des ouvrages concernés.

A l'état solide, un agent agressif ne peut pénétrer à l'intérieur des mortiers et des bétons qu'à l'aide de l'eau qui facilite sa pénétration à travers les pores capillaires existants dans le matériau. Afin de prévenir la dégradation des structures en béton sous l'effet de ces attaques, il est important de réaliser une analyse rugueuse de la porosité, de l'absorption et de la perméabilité du matériau.

Généralement, les études expérimentales des phénomènes liés à la durabilité des matériaux nécessitent un temps très long, disant des années et les résultats obtenus sont souvent difficiles à interpréter et à exploiter dans le champ pratique.

Nous avons essayé dans ce travail de s'attacher à l'étude de durabilité des mortiers par l'élaboration d'une étude expérimentale testant leur tenue vis-à-vis d'une attaque chimique de sulfates de magnésium (MgSO_4), accompagnée de cycles répétitifs de mouillage-séchage. Les mortiers testés sont confectionnés à base de différents sables, sable alluvionnaire, sable dunaire et sable calcaire, afin d'analyser l'effet de la minéralogie des granulats sur leur durabilité.

Pour atteindre cet objectif, nous avons partagé le travail en trois chapitres principaux:

- Dans le premier chapitre, une synthèse bibliographique a été établie sur les diverses sources des sables utilisés dans la construction et sur les paramètres qui doivent être analysés pour évaluer la durabilité des mortiers et des bétons préparés à base de ces matériaux.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une identification générale des constituants utilisés pour la confection des mortiers étudiés, soit les sables, le liant et l'eau de gâchage. Les formulations choisies des mortiers ainsi que les différents essais de caractérisation physico-mécanique des mortiers sont aussi détaillés dans ce chapitre.
- Le troisième chapitre s'attache alors à l'étude des compositions retenues des mortiers à travers les essais de maniabilité, à l'étude des différents paramètres de durabilité des mortiers, tels que l'absorption, la capillarité et la perte en poids et le suivi de l'évolution des résistances mécaniques à la flexion et à la compression sous l'effet d'une attaque sulfatique (Sulfate de Magnésium) accélérée par un cycles de mouillage-séchage.
- Enfin, on a présenté une conclusion générale sur l'étude élaborée et cela d'après les résultats expérimentaux obtenus.

CHAPITRE I

Etude Bibliographique

I-1/ Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus employé grâce à ses nombreuses qualités. Il est formé à partir d'un squelette granulaire lié par une pâte de ciment hydraté. Généralement, le béton est un matériau durable qui résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe, mais la durabilité des ouvrages en béton peuvent être menacée dans certaines situations, ce qui nécessite des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou pour leur offrir de nouvelles fonctionnalités [1]. La durabilité d'un ouvrage en béton est conditionnée par de nombreux paramètres, tels que la qualité des matériaux utilisés, la qualité de sa réalisation, les diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Les granulats qui occupent plus de 70 % du volume total du béton affectent directement sa qualité. Pour assurer la durabilité du béton et par la suite la longévité des structures, nous devons connaître la provenance des granulats utilisés dans sa composition. Les granulats peuvent être naturels employé, tels qu'ils sont comme les granulats alluvionnaires, naturels recevant une opération de concassage comme les granulats concassés ou artificiels comme les granulats issus des opérations industrielles comme les granulats de laitier.

Dans cette recherche bibliographique, nous intéressons aux granulats sable, car le matériau testé dans notre étude est le mortier.

I-2/ Provenance des sables

Le sable est le granulat fin dont le diamètre est inférieur à 5 mm, qui forme avec le ciment la pâte liante. Selon sa nature minéralogique, sa granulométrie et sa grosseur, le sable conditionne la consistance du mortier et par suite influe sur ses caractéristiques à l'état durci. Deux types de sables sont distingués, les sables naturels et les sables artificiels.

I-2-1/ Sables naturels

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives: la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à dépôt ou ils demeurent sous différentes formes, on distingue :

I-2-1-1/ Les sables marins littoraux

Ils sont présents dans les régions littorales et ils sont affectés par l'action fluviatile, parviennent à la mer et s'y trouvent au fond. Ils sont mélangés à d'autres éléments provenant de l'action d'arrachement de la mer aux cotes et finissent par se déposer après avoir subi un long frottement .Ils sont caractérisés par leurs

grains fins et leur forme anguleuse [2]. Ils qui peuvent contenir de grandes quantités de minéraux rares et de fortes teneurs en calcaire et ils possèdent une granularité uniforme.

I-2-1-2/ Les sables fluviatiles

Ils se trouvent dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes; il s'agit des restes d'altération transportés par les cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer. En raison de la courte distance de transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux.

I-2-1-3/ Les sables éoliens

Ils se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes, en occupant de vastes surfaces comme le cas du Sahara en Algérie. Leur origine est très différente et ils sont transportés par le vent. Ils sont composés de grains de taille fine, arrondis et dépolis à cause de nombreux chocs entre eux et possède une granularité uniforme. En fonction de la force des vents, de l'abondance du matériel sableux disponible et de la topographie il se forme des dunes organisées en champs plus ou moins réguliers et stables [3].

▪ **Sable de dunes:** est l'un des matériaux les plus abondants au Sahara et parfois le seul dans de vastes zones. Il est le résultat de l'érosion provoquée par le vent et la température particulièrement dans les déserts, ces sables se déposent en édifices dunaires constitués d'une succession de crêtes couloirs qui ressemblent à des vagues. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire des sables dunaires, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation. Selon certains auteurs, la dune la plus dorée est la plus ancienne, chaque grain ayant au contact de l'air le temps de s'oxyder et de roussir. La couleur du sable est affectée par les proportions en minéraux lourds colorés: Amphibole, Pyroxène, Topaze, Zircon [1]. D'après plusieurs études réalisées dans des régions sahariennes, les sables dunaires ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermiques et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens fleuves. Les matériaux détritiques superficiels sont débarrassés des particules limoneuses emportées en suspension dans l'air à des grandes distances. Les sables restés sur places sont à leur tour soumis à la déflation et déplacés par saltation et roulage sur des distances plus courtes.

Le sable dunaire qui est en abondance, occupe presque 60% de la superficie du territoire Algérien. L'épaisseur moyenne de la couche sableuse est de 6m. Cette énorme quantité a amené les chercheurs à s'interroger sur les propriétés physico-chimiques de ces sables afin de les valoriser dans le domaine de la construction. Des études, de compositions granulométriques, minéralogiques, chimiques et autres ont été effectuées sur différents gisements par plusieurs organismes, tels que l'unité de recherche et d'étude géologique [4], dont les résultats ont permis de tirer les constatations suivantes:

- Les gisements sont constitués par la formation de sable éolien, sous forme de dunes, de couleur variable et finement grenu. Ces sables ont une granulométrie fine, avec quelques nuances non significatives (les plus gros grains n'atteignent pas 1mm de taille) [4].
- 85% du sable est du quartz qui possède des grains généralement arrondis et parfois anguleux.
- Au voisinage de 5% de la calcite (ne dépassant en aucun cas les 10%) caractérisée par des grains de couleurs différentes.
- Des pourcentages ne dépassant pas les 2 à 3% du gypse sous forme de grains fins, de couleur blanchâtre.
- Un pourcentage qui ne dépasse pas les 4% du feldspath qui se trouve dans certains gisements.

I-2-1-4/ Les sables alluvionnaires

Les sables de rivière sont rencontrés soit dans des oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (dépôts actuels), soit dans des lits d'anciens oueds dont l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures. Les principaux types retenus pour les usages routiers sont les suivants:

- Sable graveleux ou non à granulométrie assez étalée et avec fines (15 à 30 %).

On l'utilise pour la couche de fondation et la couche de base (technique du sable-argile)

- Gros sable de préférence graveleux à granulométrie étalée pour enrobés (enrobés à froid lorsqu'il y a assez de grossiers ou sable enrobé à chaud) [5].

I-2-1-5/ Les sables gypso-calcaires

Dans les plateaux entre Ouargla et Hassi Messaoud, on trouve sous une dalle de calcaire assez dure de surface, un mélange de cailloux calcaires mi-durs et de sable gypso-calcaire. Ce tout venant a été utilisé pour la route Ouargla-Hassi Messaoud. Ces sables ne sont pas utilisés seuls jusqu'ici [4].

I-2-2/ Sables issus d'une chaîne d'élaboration

Ce sont des matériaux naturels ou non produits par une chaîne d'élaboration de granulats tels que les sables naturels de concassage qui résultent de la production des carrières et qui sont de plus en plus utilisés en travaux routiers.

I-2-2-1/Les sables calcaires

Le sable calcaire est un nouveau matériau qui a fait l'objet de plusieurs recherches actuelles, dont les résultats obtenus, montrent l'effet bénéfique des granulats et des ajouts calcaires sur la maniabilité, la résistance mécanique et la durabilité des bétons et des mortiers. Il s'agit donc d'un produit fin résultant d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires. Les roches calcaires sont des roches carbonatées qui contiennent au moins 50% de carbonates de calcium

(CaCO_3) et qui peuvent être accompagnés de Dolomite, d'Aragonite, de Sidérites et de Minéraux Argileux [6]. La production des sables de concassage de roches massives est toujours accompagnée d'une grande quantité de fines ($< 0.080\text{mm}$) plus ou moins important. Ces fines peuvent être inertes ou actives:

a) Fines inertes

Elles adhèrent peu à la surface des grains de sable, ce qui permet de les éliminer par la ventilation à l'air par exemple, elles améliorent la maniabilité, si elles sont employées en proportions limitées, elles assurent l'homogénéité des bétons et empêchent la ségrégation de ses granulats. Elles ont aussi des effets physico-chimiques favorables à savoir:

- La création de liaisons entre les réseaux des éléments du ciment et de la calcite à l'échelle des assemblages cristallins.
- L'activité pouzzolanique: la combinaison avec la chaux du ciment et certaines fines siliceuses.
- L'accélération des réactions due à la dispersion de la pâte de ciment par des fines de mêmes dimensions et création de germes cristallins.

b) Fines actives

Elles présentent des propriétés colloïdales, dues à leur microstructure et leurs charges électriques, Ce phénomène est défini comme l'activité superficielle d'une minérale c-à-d toute manifestation physique et chimique de la charge superficielle. Le comportement colloïdal se manifeste au-dessous de 2 microns, c'est-à-dire dans les argiles. Parmi les propriétés colloïdales on distingue:

- Flocculation (capacité de s'agglutiner sous forme de flocons).
- Echange ionique
- Thixotropie (propriétés des suspensions argileuses de se prendre en masse au repos).

I-2-2-2/ Les sables artificiels

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée, ils peuvent être soit cendres volantes, déchet de briques, laitier); leurs méthodologies d'étude et d'utilisation sont comparables [7].

I-3/ Formations géologiques de la région de Laghouat

Les séries sédimentaires de la région de Laghouat et des régions avoisinantes sont constituées par des formations Mésozoïques qui sont déposés, à l'origine, dans un sillon subsidence. Il existe aussi des formations Cénozoïques et Quaternaires [8], Les formations Mésozoïques se trouvent selon quatre ensembles principaux:

- * Jurassique inférieur avec des argiles gypso-salines, accompagnées de roches éruptives attribuées au trias, et n'affleurant généralement qu'à la faveur de diapirs et de quelques accidents locaux.
- * Jurassique supérieur caractérisé par une alternance de calcaires, degrés et de marno-calcaires, de marnes et d'argiles.
- * Crétacé inférieur connu par les puissantes séries d'étriqués gréco-argileux avec des passées carbonatées, il s'agit de formations Barrémien-Aptien-Albien. Ces séries occupent de vastes zones de dépression entre les Anticlinaux et les Synclinaux.
- * Crétacé supérieur, ce sont des argiles à gypses et banc dolomitiques (Cénomaniens Turoniens Sénoniens), constituent des Synclinaux perchés. Les terrains tertiaires sont à dominante Silico-Calcaïque, souvent Azoïques et constituent les principaux dépôts du tertiaire continental et prennent une position souvent discordante sur les formations secondaires, tandis que les formations quaternaire sont représentées par des terrasses qui témoignent des oscillations climatiques ou cours du quaternaire dans les vallées.

Les sols ont une origine alluviale, tandis que les dunes de sable quaternaire occupent les zones déprimées et les flancs des reliefs. L'étude géologique montre la puissance des formations carbonatées à l'échelle verticale et particulièrement à l'échelle horizontale, présentées principalement par des calcaires qui peuvent être regroupées en plusieurs unités lithologiques, comme il est illustré sur le tableau (I-1) ci-dessous:

Tableau (I-1): Epaisseur des unités Litho-Stratigraphiques Carbonatées du Mésozoïque dans la région de Laghouat [8]

<i>Litho-Stratigraphiques de la formation géologique</i>	<i>Epaisseur (m)</i>
Calcaire du sénonien	×10
Bonne Calcaire Dolomitique du Turonien	Plus de 20
Calcaire fin blanc de l'Albien Supérieur	60
Bonne Calcaire Intra Gréseuse Aptienne	15-20
Bonne Calcaire Portlandienne	160-250
Marno-Calcaires bleutés du Kimméridgien Supérieur	200-350
Repérés Calcaire massifs du Kimméridgien Inférieur	50-130
Calcaires Lumachelliques du Kimméridgien Inférieur	200
Calcaires à Polypiers du Kimméridgien Inférieur	Plus de 100

I-4/ Durabilité

La durabilité d'un mortier n'est pas une caractéristique, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales; elle dépend de multiples paramètres liés aux propriétés du matériau, aux cycles de vieillissement, à l'agressivité de son environnement et aux agents agressifs extérieurs. Ces agents pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées et peuvent par la suite, réagir avec les hydrates de ciment pour diminuer la capacité portante de l'élément [9]. L'étude de la durabilité a fait le sujet des documents de COMITEE Euro-International du béton [10, 11]

I-4-1/ Propriétés du matériau affectant la durabilité

La porosité des granulats, leur imperméabilité et leur absorption influencent sur certaines de leurs propriétés comme la liaison avec la pâte de ciment, leur stabilité chimique et leur résistance à l'abrasion ainsi que la résistance du matériau au gel-dégel.

I-4-1-1/ Porosité

La porosité d'un granulat est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains. La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats et effectivement les caractéristiques de ces pores sont très importantes dans l'étude des propriétés des granulats. Le volume poreux du mortier facilite le passage des fluides qui peuvent être nuisibles au béton. La taille des pores des granulats est très variable, les plus gros peuvent être vus au microscope ou même à l'œil nu et les plus petits sont à peine plus gros que les pores de la pâte de ciment. Les pores inférieurs à 4 mm sont d'un intérêt particulier, car il est admis qu'ils affectent la durabilité des granulats soumis à des cycles de gel dégel [9].

I-4-1-2/ Absorption

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de la masse exprimée en pourcentage de la masse sèche [12]. La mesure de la capacité d'absorption qui permet de mesurer la porosité ouverte du matériau 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 de l'éprouvette de mortier après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'éprouvette. Cette imbibition est obtenue par l'immersion du matériau dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. L'absorption d'eau ou la porosité accessible à l'eau qui est un paramètre étroitement lié à la durabilité du matériau permet de quantifier le volume relatif des vides mais non sa connectivité. La porosité

accessible à l'eau est la première caractéristique qu'il convient de représenter en fonction de la résistance mécanique du béton [13, 14].

Généralement, l'augmentation de la quantité des fines augmente le taux d'absorption d'eau par immersion des bétons, comme il était constaté dans les bétons à base de la poudre de marbre [15]. Selon certaines recherches [12], la capacité d'absorption d'eau des mortiers à base de sable concassé calcaire est plus élevée que celle des mortiers préparés avec le sable alluvionnaire ou dunaire figure (I-1). Ceci est dû au coefficient d'absorption important du sable concassé et de la teneur importante de ses fines. 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. D'après la même étude [12], il était constaté que l'absorption d'eau est la plus faible dans le cas du sable mélange (alluvionnaire, calcaire et dunaire) grâce à sa bonne distribution granulométrique. D'autres auteurs [15] ont confirmé aussi que le coefficient d'absorption d'eau par immersion totale des bétons augmente avec l'ajout du sable dunaire dans leur composition. Par rapport aux bétons à base de sable calcaire, les bétons avec sable alluvionnaire ont présenté l'absorption d'eau la plus faible après 24 heures d'immersion [16].

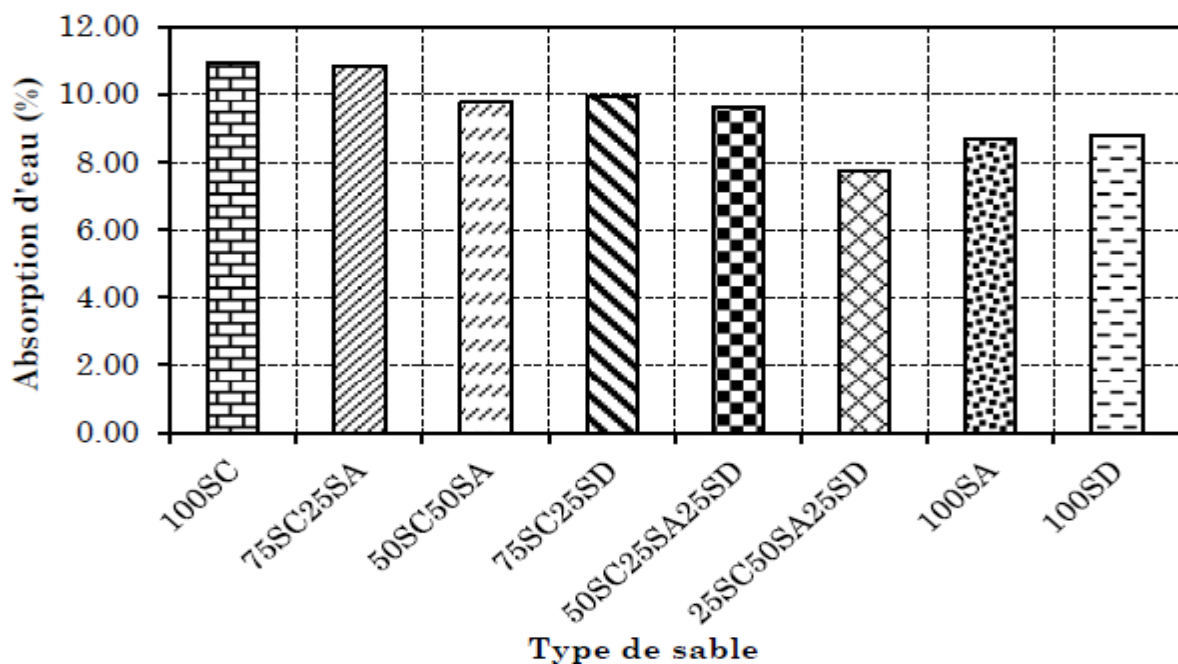


Figure (I-1): Absorption massique des différents mortiers [12].

I-4-1-3/ Capillarité

C'est un autre mode de fixation de l'eau qui n'intervient que si la structure poreuse, dont la taille des pores est bien limitée, est mise en contact avec une nappe d'eau en phase liquide. L'eau en masse présente souvent un comportement mouillant par rapport aux solides constituant les structures poreuses.

Ce phénomène se traduit par une tendance à l'étalement du liquide sur la surface des pores et conduit à la formation d'interfaces courbes entre le fluide mouillant liquide et non mouillant gazeux constitué en l'occurrence par l'air humide [17].

I-4-2/ Cycles de vieillissement de séchage-mouillage

L'essai de mouillage-séchage qui est réalisé conformément la norme ASTM D 559-57[18], permet de vérifier la tenue dans le temps d'un béton exposé à un environnement humide ou marin, en suivant la variation de sa résistance mécanique avant et après les cycles.

Les résistances mécaniques des éprouvettes de 28 jours d'âge conservées à l'air du laboratoire et soumises à 12 cycles de mouillage-séchage accélérés restent pratiquement inchangées [12]. Les auteurs [12] ont constaté pour les mortiers à base du sable mélange (MSAD) ont présenté une légère amélioration de la résistance à la compression, contrairement aux mortiers du sable dunaire (MSD) qui ont subi une légère diminution de leurs résistances à la compression figure (I-2).

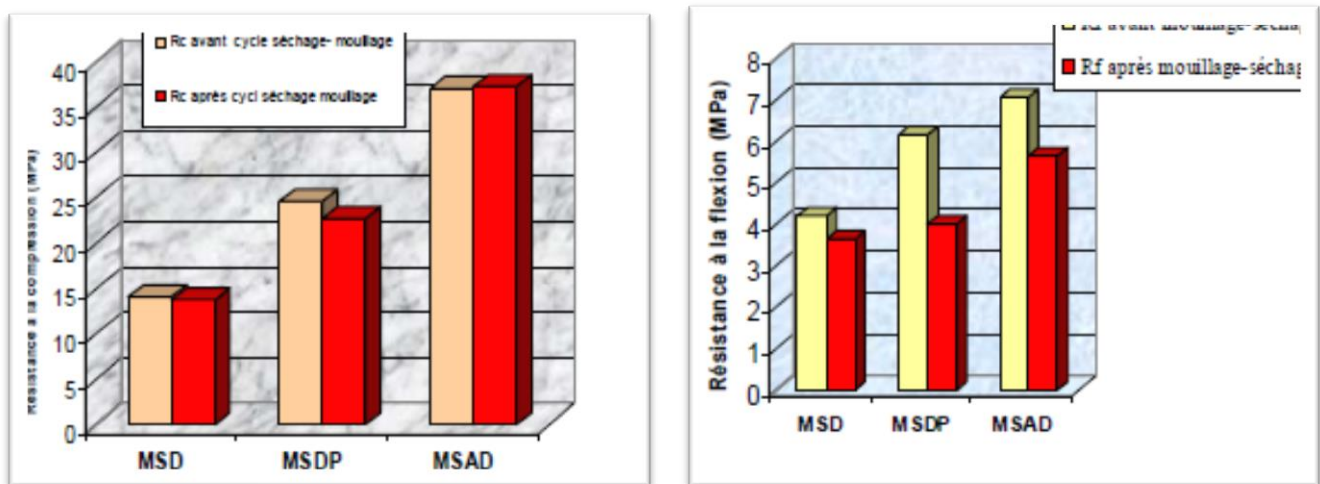


Figure (I-1): Influence de mouillage- séchage sur la résistance des mortiers [12]

I-4-3/ Agressivité chimique de l'environnement

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux industriels ou naturels agressifs pour le béton et pour l'acier des armatures. Le matériau, béton ou mortier doit présenter une résistance chimique, lorsqu'il est exposé à des attaques chimiques. Généralement les matériaux cimentaires résistent bien aux attaques chimiques si leurs compositions sont bien appropriées. L'ACI COMMITTEE 2012 a classé les attaques chimiques en une attaque acide, attaque par les sulfates, attaque par chlorures, carbonatation, lixiviation et attaque alcaline. La norme européenne EN 206 [19] a défini trois classes correspondant aux degrés d'attaques chimiques, faible ($\times A1$), modéré ($\times A2$) et forte ($\times A3$). Le tableau (I-2) regroupe les

sept caractéristiques chimiques, lorsque l'attaque chimique s'effectue par des sols naturels, des eaux de surface ou d'eau de mer.

Tableau (I-2): Valeurs limites pour les classes d'exposition en cas attaque chimique [20].

<i>Elément en béton</i>	<i>×A1</i>	<i>×A2</i>	<i>×A3</i>
SO_4^{-2} mg/l dans l'eau	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 300	> 300 et ≤ 6000
SO_4^{-2} mg/kg dans le sol	≥ 2000 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 12000	> 12000 et ≤ 240000
Ph de l'eau	≤ 6.5 et ≥ 5.5	≤ 5.5 et ≥ 4.5	≤ 4.5 et ≥ 4
Degré d'acidité du sol	$> 20^\circ \text{C}$ Baumann Gully		
CO_2 mg/l dissolution de calcaire dans l'eau	≥ 15 et ≤ 40	≥ 40 et ≤ 100	> 100
NH_4^+ mg/l dans l'eau	≥ 15 et ≤ 30	≥ 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 60
Mg_2^+ mg/l dans l'eau	≥ 3000 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000

I-4-3-1/Attaque par les sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Ils sont présents naturellement dans les sols, ou ils constituent un élément nutritif important de plantes. Leurs concentration y est généralement faible, elle varie en moyenne entre 0.01 et 0.05% du sol sec. Toutefois, il n'est pas rare de rencontrer des valeurs beaucoup plus élevées (supérieure à 5%) dans certaines régions où le sous-sol contient du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou CaSO_4 , c'est le cas par exemple du bassin Parisien ou l'Afrique du Nord.

Les sols Algériens particulièrement dans le sud contiennent des sulfates dont les concentrations les 1.5%. Les sulfates présents dans les sols peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre, en engrais, plantes ou à la surface du sol.

Le sulfate d'ammonium, particulièrement agressif, résulte de l'utilisation intensive des engrais dans l'agriculture dans les environnements industriels tels que les industries chimiques, fabrication des engrais, etc. La pollution des eaux souterraines peut conduire à des concentrations très supérieures aux limites d'agressivité généralement admise. Par ailleurs, à côté des sites industriels et dans les grandes agglomérations urbaines, la combustion des charbons et des fiouls, plus ou moins chargés en soufre, dégage du dioxyde de soufre qui en présence d'oxygène et d'humidité mène à la formation d'acide sulfurique.

En effet l'action des sulfates peut se manifester assez rapidement en fonction du type de sulfate et de l'intensité de l'attaque. La norme ACI 1997 [10] 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

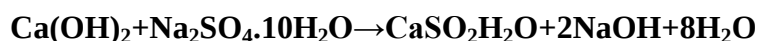
sévère que le taux de concentration dépasse les 10000ppm dans les eaux souterraines et 2% dans les sols [18].

I-4-3-2/Sources d'attaque sulfatique

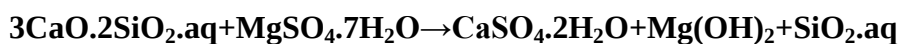
a) Source externe

A l'état sec, les roches présentes dans la nature ne présentent aucune agressivité envers les matériaux cimentaires, ce n'est que lorsque les sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure. En plus des sulfates de calcium et de magnésium se retrouvent également, dissous dans les eaux souterraines. Certaines roches contenant de la pyrite (mal cristallisée) peut être libérée, s'oxyder par la suite et se retrouver dissous dans l'eau. Les réactions chimiques de ces différents sulfates avec la pâte de ciment durci sont les suivantes.

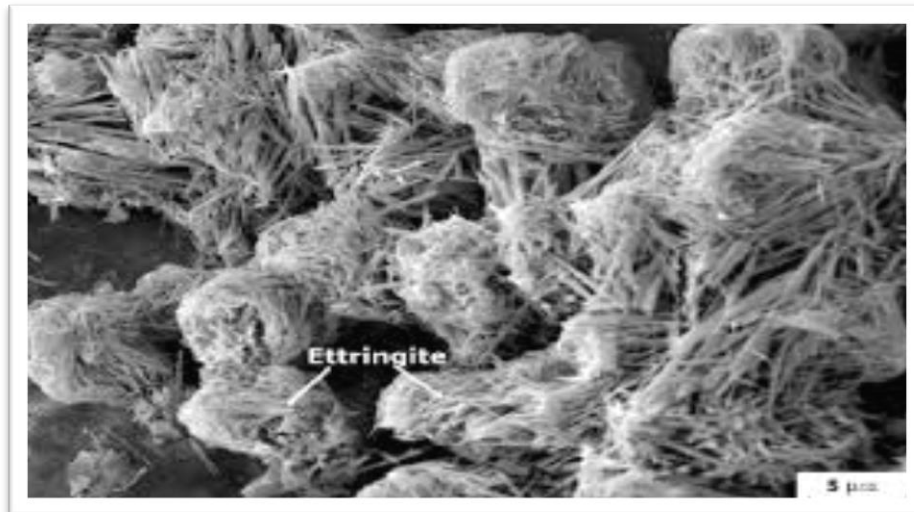
Le sulfate de sodium attaque le $\text{C}_a(\text{OH})_2$:



Ce qui constitue une attaque de type acide, sous de l'eau ruisselante, le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, peut être complètement lessivé, mais, si le NaOH s'accumule, l'équilibre est atteint, une partie seulement du SO_3 précipitant sous forme de gypse. Par ailleurs, le sulfate de magnésium attaque les hydrates de silicate de calcium aussi bien que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et hydrate l'aluminat de calcium. La réaction est du type:



Étant 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. La conséquence finale de l'attaque au sulfate de magnésium est la détérioration des C-S-H, comme le montre la figure ci-dessous [21].



**Figure (I-3): Schéma des couches du gypse et de l'ettringite
Causées par une attaque par les sulfates externes**

b) Source interne

C'est le cas d'une attaque chimique où la source des sulfates est interne. En raison de la libération retardée du sulfate, l'ettringite se forme à l'état durci du béton provoquant une expansion et une fissuration. Ce phénomène est souvent désigné par le terme formation retardée d'ettringite. Ce phénomène a été rencontré dans les produits du béton contenant un ciment de teneur élevée en sulfate et durcissement accéléré par le biais de vapeur d'eau. Étant donné que l'ettringite est un élément instable à des températures supérieures à 65°C , elle se décompose lorsque $T > 65^{\circ}\text{C}$. Les ions de sulfate libérés sont absorbés par le C-S-H durant cette phase puis émis durant la phase de service pour reformer de l'ettringite.

I-4-3-3/Facteurs influençant les mécanismes de dégradation du béton dans les sulfates

Les attaques sulfatiques mettent en jeu plusieurs mécanismes de dégradation. Pour le même béton l'importance relative de ces phénomènes peut varier de façon très sensible en fonction des conditions de l'attaque sulfatique. Parmi les facteurs dont l'influence a été étudiée, la nature du cation associé aux ions sulfate, la concentration en sulfates, le pH (contrôlé ou non) de la solution d'immersion, la température, et les variations de taux d'humidité (cycles d'humidification-séchage) et qui sont des paramètres intéressants dans les mécanismes de dégradation du béton.

a- Nature du cation associé aux ions sulfates

La nature du cation influe à la fois sur la cinétique et sur le mode de dégradation du béton. En effet les réactions chimiques peuvent différer, car elles impliquent non seulement l'anion sulfate SO_4^{2-} mais aussi

le cation, ainsi les produits de réaction peuvent varier, en qualité et en quantité. On distingue alors les types suivants de sulfates:

- **Sulfate de magnésium**

Les conséquences visibles d'une attaque de sulfate de magnésium sont l'écaillage, le délitage du béton et la perte de sa cohésion et également la baisse de sa résistance en compression. C'est un sulfate qui réagit avec tous les produits d'hydratation du ciment d'une part, la portlandite pour former du gypse et de l'hydroxyde de magnésium, d'autre part les C-S-H pour former des silicates de magnésium hydratés, sans caractère liant. Ces réactions peuvent se produire même si le taux de C_3A est faible. D'autre part la dégradation est plus rapide que dans des solutions de sulfate de sodium ou de calcium [21,22].

- **Sulfate de sodium**

Le sulfate ($2Na^+$, SO_4^{-2}) en solution entraîne la formation de gypse et d'étringite expansive, mais celle-ci n'est pas stable dans des milieux pauvres en hydroxyde de calcium et dont le pH est inférieur à 11 [21, 22]. Elle peut alors se décomposer en gypse en surface. La dernière étape peut être dans ce cas la formation de thaumasite, si les conditions du milieu le permettent. Les causes de dégradation sont donc lixiviation et la portlandite, formation d'étringite expansive et perte des propriétés liantes par dégradation des C-S-H (par formation de thaumasite ou lixiviation). Si l'apport en sulfates et lessivage sont maintenus, ce qui peut être complètement dissoute et la lixiviation peut atteindre les C-S-H, qui se dégradent par perte de leur contenu calcique et formation de gypse [21,22], le béton peut ainsi être complètement dégradé. Mais si l'apport en sulfates est limité et si la fraction lessivée reste dans la solution environnante, cas de certains essais de laboratoire par exemple, un état d'équilibre est atteint.

- **Sulfate de calcium**

Le sulfate (Ca^{+2} , SO_4^{-2}) provient dans les milieux naturels de la dissolution de gypse ou d'anhydrite, il réagit principalement avec l'aluminate tricalcique C_3A pour former de l'ettringite expansive mais également avec les hydroxydes de sodium et de potassium [21].

b- Concentration en sulfates

La concentration de la solution en sulfates peut intervenir au niveau de la vitesse de réaction, le gonflement et la dégradation sont plus rapides dans la solution la plus concentrée [23]. La concentration influe sur les produits de la dégradation de façon quantitative, mais aussi qualitative, ainsi, le gypse primaire n'apparaît que pour des concentrations élevées en sulfates. La concentration en sulfates dépend des conditions naturelles ou artificielles du milieu dans lequel se trouve le béton, mais également de la solubilité des différents précipités. Ainsi les plus fortes concentrations seront atteintes pour des sulfates

de magnésium, de sodium ou de fer, tandis que le sulfate de calcium a une solubilité relativement faible. Mais la présence de plusieurs couples d'ions modifie ces concentrations maximales, la solubilité du sulfate de calcium est bien plus élevée dans une solution de chlorure de sodium, par exemple. Le tableau (I-3) donne la solubilité des différents sulfates dans l'eau à 20 °C.

Tableau (I-3): Solubilité des différents sulfates dans l'eau à 20 °C [21].

<i>Cation</i>	<i>Formule</i>	<i>Solubilité (g/l)</i>
Potassium	K ₂ SO ₄	111
Sodium	Na ₂ SO ₄	58
Sodium	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	194
Magnésium	MgSO ₄ .6H ₂ O	440
Fer	FeSO ₄ .7H ₂ O	260
Calcium	CaSO ₄	2.1
Calcium	CaSO ₄ .2H ₂ O	1.2

c- pH de la solution environnante

La valeur du pH a un rôle important dans le processus de dégradation. La diminution de pH réduit la résistance de béton à l'attaque des sulfates; en effet l'étringite n'est pas stable si le pH est inférieur à 10.7, elle se décompose alors en gypse. Ainsi il a été souvent observé que le maintien de la solution d'immersion à un pH de l'ordre de 7 accélère la dégradation par les sulfates, par rapport à une solution non renouvelée [23].

d- Température

La température a un effet sensible sur la solubilité de tous les composés dans les attaques sulfatiques, surtout sur la formation de thaumasite qui se forme à une température comprise entre 0 et 5 °C, mais elle a été observée aussi pour des températures supérieures ou égales à 20 °C [21].

e- Variations du taux d'humidité

Les variations climatiques ou les marées peuvent induire des variations importantes d'humidité au voisinage d'ouvrage en béton. Alors que le mode de pénétration des agents agressifs varie de façon sensible en fonction du taux d'humidité et de son évolution dans le temps. Si les ions pénètrent par diffusion dans le cas d'une immersion permanente, les cycles d'humidification-séchage induisent des mouvements d'eau et des ions qu'elle contient par absorption qui facilitent leur pénétration. En fait, sa formation semble aussi dépendre de l'humidité ambiante, c.-à-d. elle est favorisée par des taux d'humidité supérieurs à 90% du pH et des concentrations des divers composés impliqués dans les réactions qui conduisent à sa formation [21].

I-4-3-4/ Processus de dégradation des matériaux par les sulfates

La résistance du béton à l'attaque des sulfates peut être évaluée en laboratoire en conservant des éprouvettes dans une solution de sulfate de sodium ou de magnésium, ou dans un mélange des deux. Des cycles alternés de séchage accélèrent les dommages causés par la cristallisation des sels dans les pores du béton. Les effets de cette exposition peuvent être évalués par la perte de résistance des éprouvettes, par la variation de leur module d'élasticité dynamique, par leur allongement, par leur perte de masse ou peuvent même être évalués visuellement [23].

a) Gonflement ettringitique

Le mécanisme du gonflement ettringitique qui intervient dans le processus d'attaque sulfatique des bétons a fait l'objet de plusieurs recherches [24]. L'expansion peut être liée aux propriétés colloïdales de l'ettringite, lesquelles seraient dues à l'extrême petitesse des cristallites, dont la taille est de l'ordre du micromètre et d'autre part, à leur caractère hautement hydrophile. Le système formé par les microcristaux et l'eau constitue un gel qui gonfle par absorption d'eau, à la façon d'une éponge [25]. L'expansion peut être aussi provoquée par la croissance des aiguilles d'ettringite, dont la morphologie aciculaire des cristaux élémentaires et leur disposition rayonnante évoque l'aspect d'un oursin [23]. Certains auteurs [25] ont étudié la durabilité des matériaux du génie civil dans leur environnement, et ils se sont penchés principalement sur les problèmes liés à la dégradation des matériaux cimentaires soumise à des attaques de sulfate. Ils ont abouti à la constatation du développement d'une pression sur la surface interne des pores de la pâte de ciment qui selon eux lorsqu'elle dépasse la résistance en traction du matériau, provoque l'apparition de fissures dans la microstructure. Ils ont conclu que le comportement du matériau cimentaire est fortement lié à l'évolution des propriétés de la microstructure.

b) Ettringite

Le gypse produit peut réagir avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{30-32}$ (ou C est utilisé pour désigner CaO , A pour Al_2O_3 et H pour H_2O), à partir de C_3A anhydre tétra-calcique hydraté $C_4A \cdot H_{13}$ ou du monosulfo-aluminate de calcium $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$ (figure I-3).



Il existe quatre formes cristallographiques de C_3A dans le ciment avec des réactivités différentes, mais sans que cela influe sur la quantité totale d'ettringite formée [20]. Si elle joue souvent un rôle majeur dans ces phénomènes, sa présence n'est ni nécessaire, ni suffisante pour expliquer le gonflement et les dégradations de béton soumis à des attaques sulfatiques. Plusieurs types d'ettringite ou trisulfo-aluminate de calcium hydraté sont distingués [26]:

- **Ettringite primaire**

C'est le produit des réactions entre les sulfates de calcium introduits dans le ciment comme régulateur de prise et l'aluminat tricalcique C_3A . Elle se décompose ensuite pour former du monosulfo-aluminate de calcium. Elle n'est jamais expansive ni pathologique et se présente le plus souvent sous forme d'aiguilles.

- **Ettringite secondaire**

Elle se développe quand le béton est déjà durci. Si les sulfates sont d'origine externe, elle peut générer de l'expansion. C'est celle qui est en cause dans le cas des attaques sulfatiques externes.

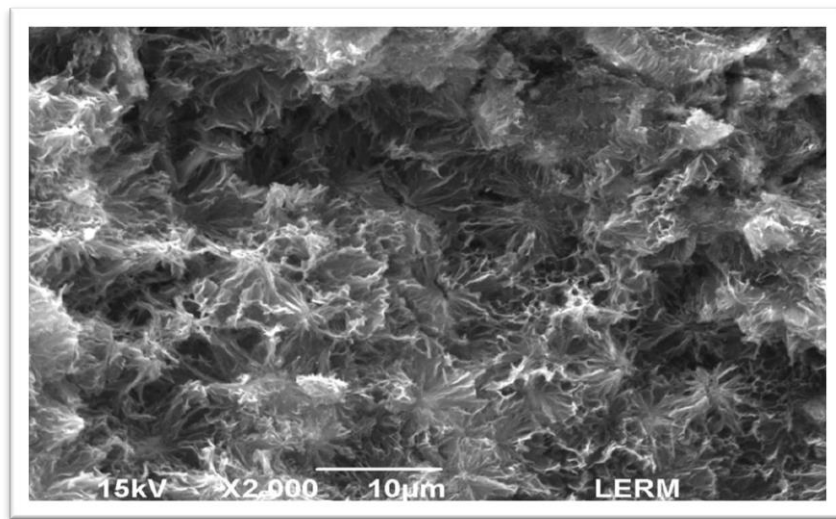


Figure (I-4): Ettringite secondaire massive mal cristallisée expansive formée topo chimiquement [26]

- **Ettringite différée**

Elle est formée lors d'attaques sulfatiques internes et peut provoquer ou non de l'expansion. Elle concerne des bétons où l'ettringite primaire n'a pas pu se former pendant les premiers instants de l'hydratation. Sa formation engendre des contraintes qui peuvent mener au gonflement et à la fissuration du béton. Cette pathologie est rare, car de nombreuses conditions doivent être réunies, tant au niveau des constituants que de l'humidité et de la température du béton et de son environnement. Ensuite, le caractère expansif ou non de l'ettringite, lié à sa façon de cristalliser, peut dépendre de la composition de la solution et en particulier de sa teneur en chaux CaO . En effet la solubilité de l'ettringite se forme in situ au contact des aluminates de calcium, en présence d'une très petite quantité de solution sursaturée. La vitesse de germination est alors supérieure à la vitesse de croissance cristalline et conduit à la formation d'agglomérats de très petits cristaux de nature plus ou moins colloïdale. Les produits formés ont un volume molaire trois à huit fois plus élevé que celui des réactifs (C_3A ou $C_4A.H_{13}$), d'où le

développement de contraintes élevées. Dans les bétons dont le liant libère moins de portlandite (ciments de haut fourneau par exemple). L'ettringite précipite à partir de la solution dans les vides interstitiels du béton et la cristallisation en aiguilles bien formées n'est pas expansive. Enfin, la formation d'ettringite est souvent liée à la formation de gypse, lequel peut aussi avoir des effets délétères et expansifs.

a) Thaumasite

La thaumasite, $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, se forme préférentiellement lors des attaques sulfatiques à des températures assez basses (entre 0 et 5°C). Elle est le produit des réactions entre les C-S-H, les ions sulfates SO_4^{-2} et carbonates CO_3^{-2} . Elle peut aussi se former à partir d'ettringite et être associée à la formation de gypse [25]. La dégradation du béton liée à la formation de thaumasite provient donc de la dégradation des C-S-H. De tels phénomènes ont été identifiés sur des monuments historiques, sous des climats froids, restaurés avec des matériaux à rapport eau sur ciment élevé, et sur de nombreux autres ouvrages soumis aux sulfates. La probabilité de voir se produire ce type de dégradation augmente si des granulats ou des fillers calcaires sont utilisés sous des climats froids, car ces matériaux sont essentiellement constitués de carbonate de calcium, et les ions carbonates interviennent dans les réactions de formation de la thaumasite. Cependant la formation de thaumasite a aussi été constatée dans des climats qui excluent des températures aussi basses. Par ailleurs la thaumasite n'est pas facile à identifier, souvent associée à l'ettringite et de manière similaire, sa formation n'est pas toujours préjudiciable à la durabilité du béton [22]. Son mécanisme de formation n'est donc pas encore bien connu, de même que l'influence de la température sur les attaques sulfatiques.

I-5 / Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives au comportement des différents types de sable tel que le sable alluvionnaire, dunaire et calcaire, et leurs performances physico-mécaniques.

Afin de compléter la caractérisation des mortiers préparés à base de différents sables, spécialement les sables qui existent dans la région de Laghouat, une partie de cette synthèse a été consacrée à l'étude de la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques d'origine sulfatique accompagnées de cycles répétitifs de mouillage/séchage.

CHAPITRE II

Caractérisation et Essais Expérimentaux

II -1/ Introduction

Dans cette partie, nous allons caractériser les différents matériaux (sable alluvionnaire, sable dunaire, sable calcaire et ciment) utilisés dans la formulation des mortiers d'étude et nous allons présenter les différents protocoles d'essais réalisés sur ces mortiers.

II -2/ Matériaux

Notre mortier est composé de sable, de ciment et d'eau.

II -2-1/ Sable

Le sable est le composant principal du mortier, qui lui offre sa cohésion participe donc à sa résistance mécanique. Dans notre étude, nous avons utilisé pour la confection des mortiers trois sables, chaque sable est employé séparément, un sable de dunes, un sable alluvionnaire et un sable calcaire. Il s'agit de sables naturels locaux, qui se trouvent dans la région de Laghouat, deux d'origine naturelle, c.-à-d. utilisés tels qu'ils sont, sans aucune opération mécanique de concassage et le dernier d'origine artificielle, c.-à-d. obtenu après concassage des roches calcaires, soient:

- Un sable alluvionnaire de oued M'Zi, noté «SA»,
- Un sable de dune d'Oasis Nord, noté «SD»,
- Un sable fin calcaire qui n'est qu'un résidu de concassage de la station de concassage d'Ouazzane située au Nord de la ville de Laghouat, il est noté «SC».

II -2-2/ Ciment

Le ciment utilisé est un ciment composé **CPJ-CEM II/A** produit par la cimenterie de M'Sila **Algérien Cement Company**, de classe de résistance de 42.5 MPa. La fiche technique de ce ciment est donnée en annexe.

II-2-3/ Eau de gâchage

L'eau utilisée dans ce travail expérimental est l'eau de robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, c.-à-d. une eau potable, dont l'analyse chimique est donnée en annexe.

II -3/ Caractéristiques des matériaux

II -3-1/ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente qui est définie comme étant la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume apparent (volume du matériau et des vides) est déterminée pour le sable et le ciment selon la norme NF P18-555 [27] par la formule ci-dessous.

$$\gamma_{app} = \frac{M - M_0}{V_{app}}$$

Avec :

γ_{app} : Masse volumique apparente du matériau (g/cm³)

M : Masse du récipient plein du matériau (g)

M_0 : Masse du récipient vide (g)

V_{app} : Volume de récipient (cm³)

II -3-2/ Masse volumique absolue

La masse volumique absolue du sable qui est la masse de l'unité de volume absolue sans vides est déterminée selon la norme NF P18-555 [27], par la relation suivante:

$$\gamma_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Avec :

γ_{abs} : Masse volumique absolue du matériau (g/cm³)

M : Masse du sable (g)

V_1 : Volume d'eau (cm³)

V_2 : Volume total (eau + sable) (cm³)

La masse volumique absolue du ciment est mesurée par le densimètre de le Chatelier selon la norme NF P18-592 [28], par la formule suivante:

$$M_{vabs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$$

Avec :

M_1 : Poids (cellule+benzène) (g)

M_2 : Poids (cellule+benzène+ciment) (g)

V_1 : Volume initial de benzène (cm³)

V_2 : Volume initial de benzène (cm³)

Tableau (II -1) : Masses volumiques des matériaux

<i> Masse volumique</i>	<i> Unité</i>	<i> Sable Alluvionnaire</i>	<i> Sable de Dune</i>	<i> Sable Calcaire</i>	<i> Ciment</i>
<i>Apparente</i>	(g/cm ³)	1.53	1.50	1.499	1.05
<i>Absolue</i>	(g/cm ³)	2.58	2.65	2.65	3.06

II -3-3/ Equivalent de sable

L'essai sert à mesurer la propreté des sables employés afin de voir si nous pouvons les utilisés pour la fabrication des mortiers étudiés. L'essai consiste à plonger une quantité de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavant; après agitation, ou laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (soit h_2) et du sédiment + flocculant (soit h_1) selon la norme NF P 18-598 [29]. L'équivalent de sable est donné par la relation ci-dessous:

$$ES_v = \frac{h_2}{h_1} \times 100\%$$

$$ES_p = \frac{h_2}{h_1} \times 100\%$$

Avec :

h_1 : Sable propre + élément fins

h_2 et h'_2 : Sable propre seulement

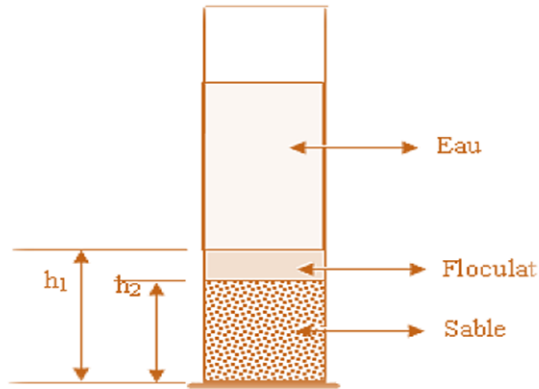


Figure (II-1) : Essai de l'équivalent de sable

Tableau (II-2): Valeurs d'équivalent de sable

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unité</i>	<i>Sable Alluvionnaire</i>	<i>Sable de Dune</i>	<i>Sable Calcaire</i>
<i>Equivalent de sable ES à piston</i>	%	77	80	73
<i>Equivalent de sable ES visuel</i>	%	82	90	82
<i>Commentaires [29]</i>		70 > ES _p < 80 75 > ES _v < 85 Sable propre	ES _p ≥ 80 ES _v ≥ 85 Sable très propre	70 > ES _p < 80 75 > ES _v < 85 Sable propre

II -3-4/ Compacité des sables

La compacité est déterminée par la relation ci-dessous:

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}}$$

Avec:

C: Compacité

γ_{app} : Masse volumique apparente du sable (g/cm³)

γ_{abs} : Masse volumique absolue du sable (g/cm³)

II -3-5/ Porosité des sables

La pénétration de l'eau dans les pores du matériau réduit d'une façon très grande la durabilité du mortier, principalement dans des milieux agressifs. Il est donc très important de mesurer la porosité des sables conformément à la norme française NF P18-555 [27] par la relation suivante:

$$P = 100 - C$$

Avec:

P: Porosité du sable(%)

C: Compacité du sable(%)

II -3-6/ Coefficient d'absorption des sables

Il s'agit du rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon du sable après imbibition dans l'eau pendant 24 heures à 20°C, à sa masse sèche. Le coefficient d'absorption est déterminé par la relation ci-dessous selon la norme française NF P18-555 [27].

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec:

Ab : Coefficient d'absorption

Ms : Masse à l'état sec (g)

Ma : Masse de l'échantillon imbibé à la surface sèche en gramme, déterminée comme suit:

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains secs, en plaçant le matériau dans un moule tronconique **figure (II-2)**, posé sur surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement, on vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant.

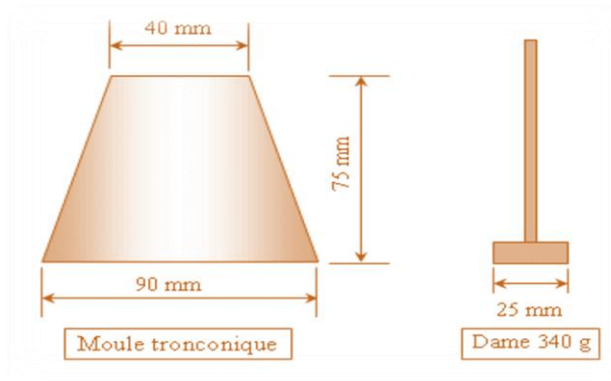


Figure (II-2): Moule et dame pour mesure du coefficient d'absorption

Tableau (II-3): Propriétés des matériaux utilisés

<i>Caractéristique</i>	<i>Unité</i>	<i>Sable Alluvionnaire</i>	<i>Sable de Dune</i>	<i>Sable Calcaire</i>
<i>Compacité du sable (C)</i>	%	59.30	56.60	56.56
<i>Porosité du sable (P)</i>	%	40.70	43.40	43.44
<i>Coefficient d'absorption (Ab)</i>	%	3.2	4.2	4.5

II -3-7/ Analyse granulométrique des sables

L'analyse granulométrique qui est réalisée selon la norme NF P18-555 [27] permet de donner les proportions de différents diamètres de granulat. Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de cet essai qui sont schématisés aussi sur la courbe granulométrique de la **figure (II-3)**.

Tableau (II-4) : Analyse granulométrique des différents sables utilisés

AFNOR	Tamis (mm)	Sable alluvionnaire				Sable de dune				Sable calcaire			
		Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
38	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	4	6	6	0,4	99.6	-	-	-	-	-	-	-	-
36	3.15	9	15	1	99	-	-	-	-	-	-	-	-
35	2.5	11.3	26.3	1.75	98.25	-	-	-	-	-	-	-	-
34	2	83,2	109.5	7.3	92.7	0	0	0	100	0,6	0,6	0,04	99,96
33	1.60	25,8	135.3	9.02	90.98	0	0	0	100	72,8	73,4	4,893	95,106
32	1	65,1	195,4	13.027	86.973	4,1	4,1	0,273	99,726	235,6	309	20,6	79,4
31	0.80	40,5	235,9	15.727	84.273	6,8	10,9	0,726	99,273	89	398	26,533	73,466
30	0.63	170,2	406,1	27.073	72.927	54,6	65,5	4,366	95,633	129,7	527,7	35,18	64,82
29	0.50	82,7	488,8	32.587	67.413	54,9	120,4	8,026	91,973	29,1	556,8	37,12	62,88
28	0.40	210,8	699,6	46.64	53.36	163,1	283,5	18,9	81,1	66,4	623,2	41,546	58,453
27	0.315	513	1212,6	80.84	19.16	576,7	860,2	57,34	42,653	72,4	695,6	46,373	53,626
26	0.25	71,6	1284,2	85.613	14.387	232,2	1092,4	72,82	27,173	60,6	756,2	50,413	49,586
25	0.20	40,2	1324,4	88.293	11.707	146,9	1239,3	82,62	17,38	75,9	832,1	55,473	44,526
24	0.16	66,8	1391,2	92.747	7.253	128,7	1368	91,2	8,8	122,3	954,4	63,626	36,373
23	0.125	26,1	1417,3	94.487	5.513	69,7	1437,7	95,84	4,153	163,8	1118,2	74,546	25,453
22	0.1	14,3	1431,6	95.44	4.56	26	1463,7	97,58	2,42	137,8	1256	83,733	16,266
20	0.08	33,2	1464,8	97.653	2.347	0	0	0	100	0,6	0,6	0,04	99,96
-	fond	25,8	1490,6	99.373	0.627	0	0	0	100	72,8	73,4	4,893	95,106

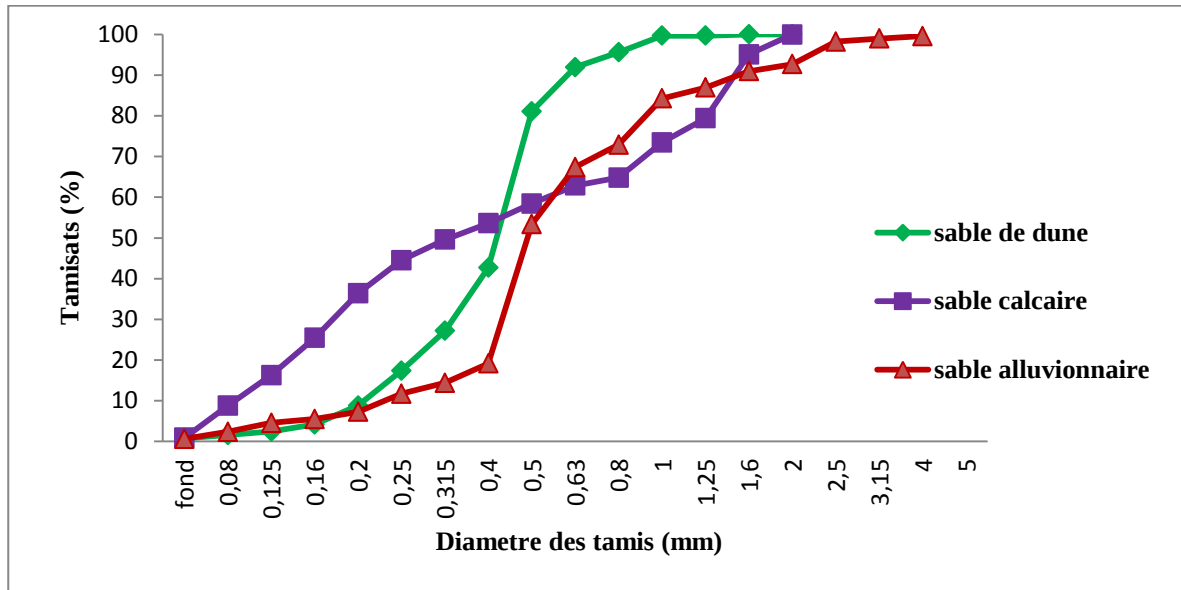


Figure (II-3): Courbes granulométriques des sables utilisés

- Le **Module de finesse** correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés ramenée à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35 et 38.

$$M_f = \sum \text{des refus sur les tamis (0,16; 0,315; 0,63; 1,25; 2,5; 5 mm)} / 100$$

- Les coefficients d'uniformité (C_u) et (C_c) sont donnés par les relations suivantes:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Avec:

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% de passants

D_{60} : Diamètre correspondant à 60% de passants

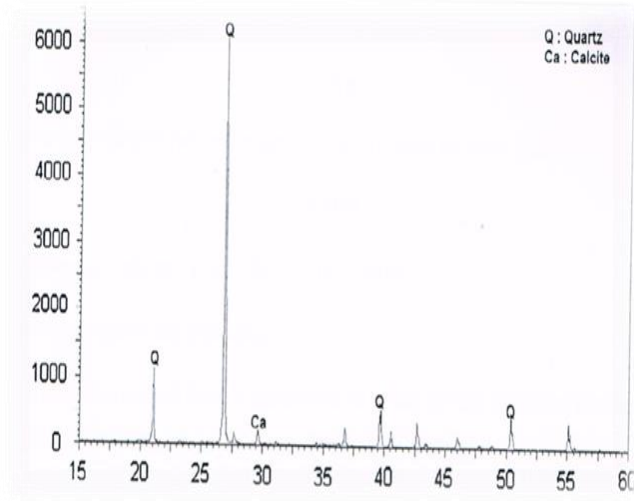
D_{30} : Diamètre correspondant à 30% de passants

Tableau (II-5): Coefficients des sables utilisés

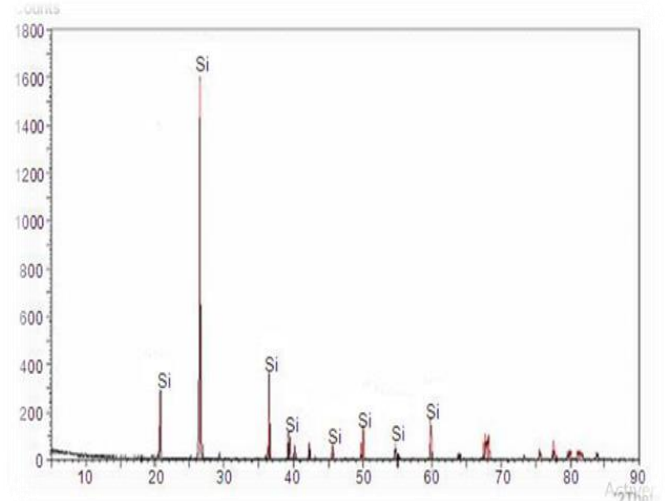
Caractéristiques	M_f	C_u	C_c	Commentaires
SA	$1.7 < 1.97 < 2.3$	$5.73 \geq 2$	3.83	Sable granularité étalée et bien graduée
SD	$1.7 < 1.8 < 2.3$	$2.5 \geq 2$	1.0	Sable fin à granularité étalée et uniforme et bien graduée
SC	$1.7 < 1.8 < 2.3$	$6.3 \geq 2$	1.0	Sable fin à granularité étalée et uniforme et bien graduée

II -3-8/ Analyse minéralogique

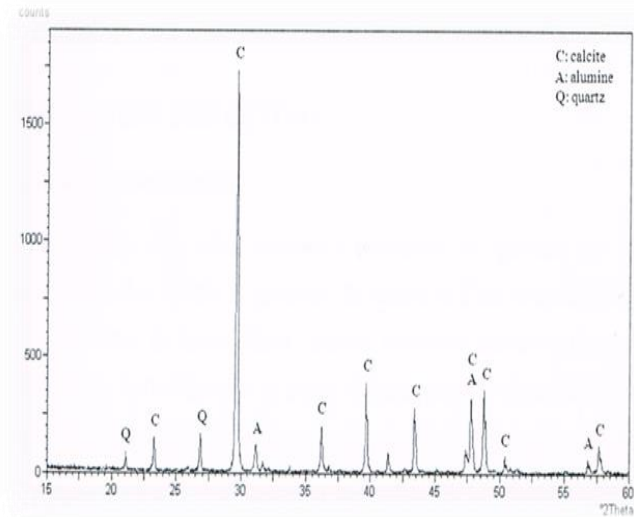
Les différents minéraux constituant les sables utilisés et le ciment sont donnés par les diffractogrammes DRX suivants:



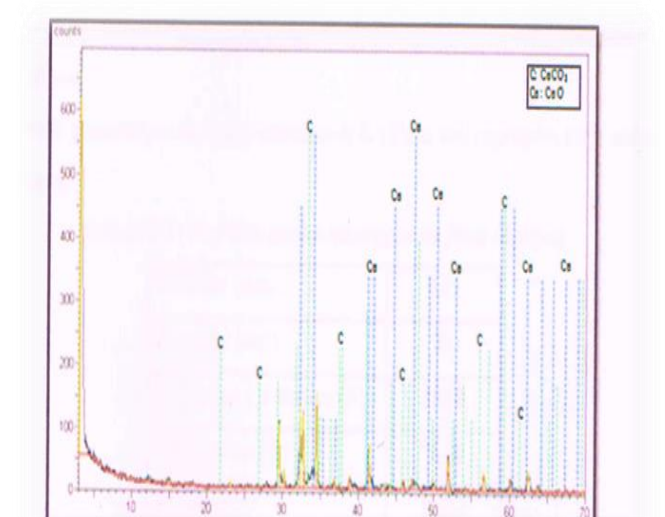
a: SA



b: SD



c: SC



d: Ciment

Figure (II-4): Analyse minéralogique des sables et du ciment [30]

II -3-9/ Surface spécifique du ciment

La surface spécifique d'une poudre qui est définie comme étant la surface étendue exprimée en cm^2 d'un gramme de cette poudre est déterminée à l'aide de l'appareil de Blaine suivant la norme EN196-6 [31], par la formule:

$$A = \frac{K\sqrt{e^3}\sqrt{t}}{\gamma(1-e)\sqrt{n}}$$

Avec:

K: Constante de l'appareil

t: Temps mesuré en seconde

e: Porosité de ciment

γ : Masse volumique du ciment exprimée en (g/cm^3)

n: Viscosité de l'air à la température de l'essai.

II -3-10/ Essai de prise du ciment

Afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers, il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des pâtes de ciment.

Les mesures s'effectuent à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique selon la norme EN 196-3 [32].

Tableau (II -6): Propriétés physiques du ciment

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unité</i>	<i>Ciment</i>
<i>Durée de prise</i>	h	2h25min
<i>Surface spécifique</i>	(cm^2/g)	3061

II -4/ Formulation des mortiers

Nous avons travaillé la formulation donnée par la norme NFP18-452 [33] pour les mortiers normalisés et qui consiste à:

- Prendre un rapport C/S (ciment/sable) = 1/3.
- Prendre C = 400 (g)
- Varier le rapport E/C jusqu'à l'obtention d'une bonne maniabilité des mortiers.

Nous avons procédé par les étapes suivantes citées par la norme NFP18-452 [33]:

- Introduire la moitié de la quantité de l'eau en premier dans la cuve du malaxeur, y verser ensuite le ciment, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30s.
- Introduire le sable avec le reste de l'eau et malaxer à vitesse lente pendant 30s, puis passer à un malaxage rapide pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxage pendant 1min30s, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.

Le malaxage du mélange a été effectué selon la même norme EN 196-1 [34], par un malaxeur à mortier (**figure II-5**) ci-dessous. Les mortiers préparés sont notés comme suit:

- Mortier à sable alluvionnaire **MSA**
- Mortier à sable dunaire **MSD**
- Mortier à sable calcaire **MSC**



Figure (II-5): Malaxeur à mortiers

II -5/ Mesure de la maniabilité

La maniabilité qui caractérise le temps que fait le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration est mesurée selon la norme NFP18-452 [33] en utilisant un maniabilimètre B **figure (II-6)**. Il s'agit d'un boîtier parallélépipédique métallique ($18 \times 9 \times 9$) cm³, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible et employé pour les matériaux de $D < 12.5$ mm.



Figure (II-6):Maniabilimètre B à mortiers

II -6/ Préparation des éprouvettes

Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4×4 cm et de longueur 16 cm sont confectionnées, remplies en deux couches, en utilisant une table vibrante (**figure II-7**).



Figure (II-7): Moules prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm³ et machine de vibration

II-7/ Conservation des mortiers

Après 24 heures de leur démoulage, les éprouvettes sont immergées dans une solution (eau+chaux). Au terme du 28^{ème} jour, un nombre des échantillons est conservé dans de l'eau + chaux (**figure II-8-a**) et le même nombre dans une solution de sulfate de magnésium (MgSO_4) (**figure II-8-b**).



a: Dans l'eau + chaux



b: Dans le sulfate de magnésium (MgSO_4)

Figure (II-8): Conservation des éprouvettes

La solution d'attaque utilisée pour l'expérimentation est une solution de sulfate de Magnésium (MgSO_4) de concentration de 5%, dont sa préparation est faite selon la norme ASTM1012 [35]. La solution est renouvelée chaque mois pour maintenir son pH constant ($\text{pH} = 8$).

II-8/ Essai réalisés sur les mortiers

II -8-1/ Essais d'absorption d'eau par immersion

L'essai consiste à mettre les éprouvettes de mortier 4x4x16 cm³ âgées de 28 jours dans l'étuve et les peser jusqu'au poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau jusqu'à saturation. Le coefficient d'absorption par immersion déterminé par la relation ci-dessous [27] donne une idée sur la porosité interne des mortiers.

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} 100$$

Avec:

A_b : Absorption (%)

M_a: Masse de l'éprouvette saturée (g)

M_s: Masse de l'échantillon sèche (g)

II -8-2/Essais d'absorption d'eau par capillarité

L'essai de capillarité permet de suivre l'évolution de la porosité globale des éprouvettes 4x4x16 cm³ du mortier soumises à une absorption d'eau unidirectionnelle (**figure II-9**). Les surfaces latérales des éprouvette sont préalablement recouverts d'une couche de résine afin d'éviter l'évaporation d'eau. Le coefficient d'absorption capillaire est donné par la relation ci-dessous conformément à la norme européenne NF EN 480-5 [36].

$$Ca = \frac{Mj - M0}{S}$$

Avec:

Ca : Capillarité

M₀: Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau (g)

M_j: Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption (g)

S: Section de la base de l'éprouvette (cm²).



Figure (II-9) : Essai d'absorption capillaire

II -8-3/Essai de mouillage-séchage

L'essai est effectué selon la norme ASTM D 559-57[18], sur les éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³ après leur conservation pendant 28 jours dans l'eau saturée de la chaux. Il consiste à soumettre les mortiers à des cycles de vieillissement accélérés, ou chacun est caractérisé par deux jours d'immersion totale des échantillons dans l'eau, suivi par deux jours de séchage à l'étuve à 71⁰C. Les éprouvettes sont pesées durant chaque cycle, après l'immersion et après le séchage.

II -8-4/Essais de la masse des échantillons

Variation de la masse se fait par pesée de l'éprouvette à l'aide d'une balance de résistance égale au dixième de gramme .Les échantillons après leurs immersions sortent donc nécessairement ruisselantes d'eau.

Afin de limiter l'incertitude liée à la masse d'eau présente sur la surface de l'éprouvette, cette dernière est brièvement épongée à l'aide d'un tissu sec absorbant avant de procéder à la pesée. Cette variation relative de masse est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{m - m_0}{m_0} * 100$$

Avec :

Δm : Variation de masse (%)

m : Poids de l'éprouvette après l'immersion dans la solution d'attaque (g)

m_0 : Poids de l'éprouvette avant l'immersion dans la solution d'attaque (g)

II -8-5/Essais mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés selon la norme EN 196-1 [34], sur des échantillons de mortier ($4 \times 4 \times 16$) cm³ moyennant un appareil de marque CONTROLS de charge maximale de 100 kN (**figure II-10**). La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.



Figure (II-10) : Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques

a- Résistance à la traction par flexion

L'essai de flexion est effectué à 3 points avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$. Le résultat pris est la moyenne de trois essais (**figure II-11**).

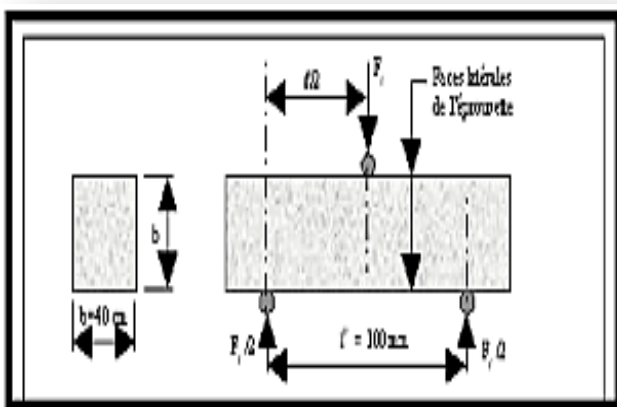


Figure (II-11) : Essai de flexion à 3 points

La contrainte en flexion du mortier étudié est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3F_f l}{2b^3}$$

Avec :

σ_f : Contrainte de flexion (MPa)

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N)

L : Longueur totale de l'éprouvette ($L = 160$ mm) (mm)

l : Longueur qui sépare les deux appuis ($l = 100$ mm) (mm)

b : Coté de l'éprouvette ($b = 40$ mm) (mm)

b- Résistance à la compression

L'essai de compression est effectué sur les demi-prismes issus de l'essai de flexion avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$. Le résultat prise est la moyenne de six lectures (**figure II-12**).

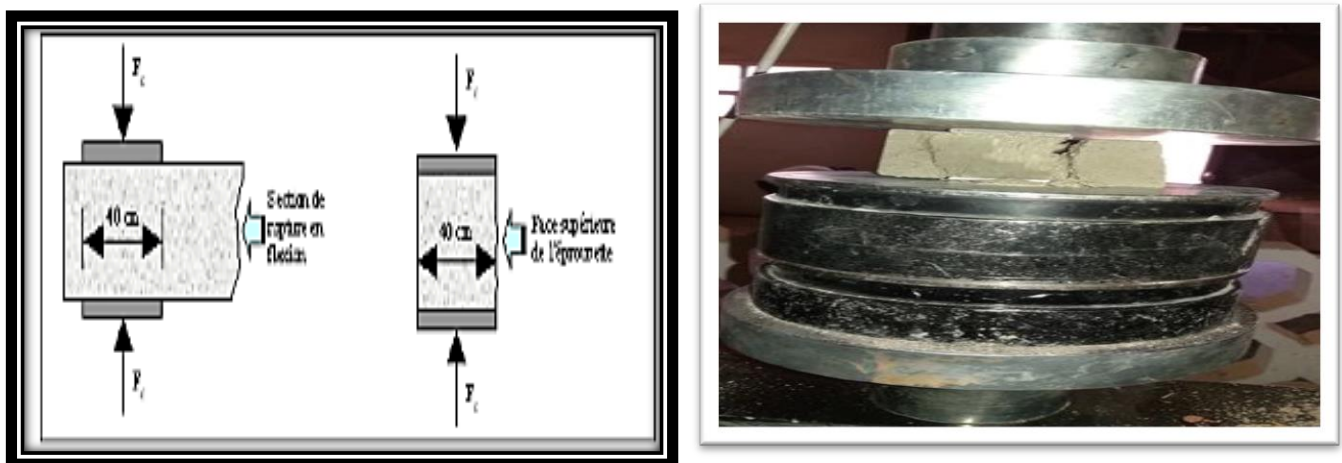


Figure (II-12) : Essai de compression

La contrainte de compression est calculée par la relation suivante:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S}$$

Avec :

σ_c : Contrainte de compression (MPa)

F_c : Charge de rupture de l'éprouvette à la compression (N)

S : Section transversale de l'éprouvette (mm^2)

II -9/ Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons donné une présentation détaillée des caractéristiques des matériaux utilisés dans notre projet, soient physiques, chimiques et minéralogiques, ce qui va nous permettre de justifier le comportement rhéologique, mécanique et durabilité des mortiers étudiés. Nous avons présenté aussi dans cette partie de mémoire les différentes procédures expérimentales réalisées au laboratoire sur les mortiers préparés. Par ces essais, nous pouvons évaluer en valeurs les propriétés demandées des matériaux confectionnés, et établir une discussion sur les paramètres étudiés et une interprétation scientifique en comparant nos résultats avec ceux de la littérature.

Dans ce chapitre on a caractérisé les matériaux utilisés, ciment, sable de dune, alluvionnaire et sable calcaire.

- Le ciment utilisé est un ciment Algérien Portland composé CPJ-CEM II/A de classe de résistance 42.5 MPa qui existe sur le marché et qui est le plus utilisé dans les chantiers.
- Un sable alluvionnaire provenant d'Oued M'Zi, caractérisé par un module de finesse de l'ordre de 1.97.
- Un sable de dune provenant de la région d'Oasis nord de la wilaya de Laghouat, caractérisé par un module de finesse de 1.8.
- Un sable fin obtenu de la station de concassage qui se trouve à la wilaya de Laghouat, son module de finesse est de l'ordre de 1.8.
- Les trois sables employés sont caractérisés par leur granularité bien étalée.
- L'absorption en eau du sable alluvionnaire est légèrement inférieure ($= 3.2$) à celle des autres sables qui varie entre 4.2 pour le sable dunaire et 4.5 pour le sable calcaire.
- Le sable de dune est très propre ($ES = 90$) par rapport aux autres sables qui possèdent un équivalent de sable de l'ordre de 82.
- Pour la formulation des mortiers, nous avons mélangé une part de ciment ($= 400g$) avec trois parts de sable, et pour le dosage en eau nous avons mesuré le temps d'écoulement des mortiers sous vibration en utilisant le maniabilimètre B, qui correspond à un mortier plastique de mise en œuvre facile.

CHAPITRE III

Résultats et Interprétations

III-1/ Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de notre étude expérimentale qui consiste à voir l'effet de la nature minéralogique du sable (sable alluvionnaire, sable dunaire et sable calcaire) sur l'ouvrabilité du mortier, sur son comportement mécanique à la compression et à la flexion et sur sa tenue physique et mécanique sous l'effet des agressions chimiques sulfatiques.

III-2/ Optimisation du dosage en eau dans les mortiers

L'optimisation du dosage en eau est faite selon les essais de maniabilité. Les résultats de cette étape expérimentale sont montrés sur la figure (III-1) qui donne le temps d'écoulement en fonction du rapport E/C pour les différents mortiers.

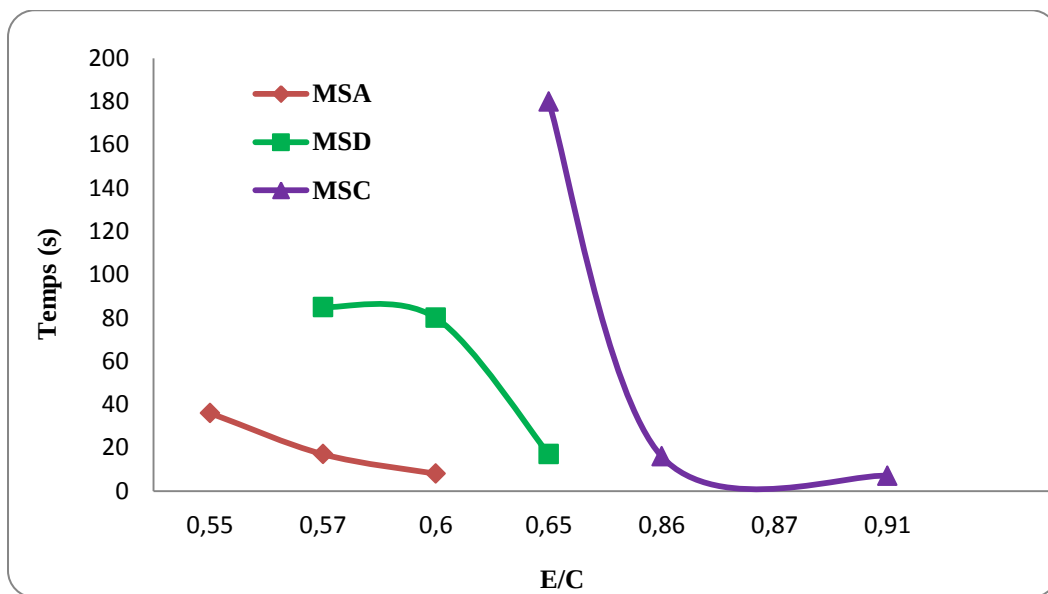


Figure (III-1): Variation du temps d'écoulement des mortiers en fonction d' E/C

Selon la figure (III-1), le temps d'écoulement diminue avec l'ajout d'eau. Cette conclusion est confirmée par toutes les études de la bibliographie, car ce n'est que par l'addition de l'eau qu'on peut améliorer la plasticité des matériaux cimentaires. Le rapport E/C qui donne la meilleure plasticité est égale à 0,57, 0,65 et 0,86 respectivement pour les mortiers MSA, MSD et MSC. Cela signifie que le mortier à sable calcaire MSC a besoin de plus d'eau pour être maniable et facile à confectionner, par rapport aux autres mortiers à base de sables naturels (MSA et MSD). Cette grande demande d'eau est certainement due au taux d'absorption élevé du sable calcaire. Selon [37] les sables concassés possèdent toujours des valeurs importantes d'absorption d'eau, à cause du taux élevé d'éléments fins dans leur granulométrie, et par conséquent ces éléments nécessitent beaucoup d'eau pour leur mouillage. L'excès en eau de gâchage peut s'interpréter pratiquement par un risque de retrait La

demande en eau du mortier à sable alluvionnaire MSA est raisonnable ($E/C = 0.57$) selon toutes les règles de confection des matériaux cimentaires.

III-3/ Résultats des essais de durabilité

III-3-1/ Absorption d'eau par immersion

Pour estimer le pouvoir des mortiers à absorber l'eau, on a mesuré leurs coefficients d'absorption à l'âge de 28 jours. Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion sont illustrés sur la figure (III-2).

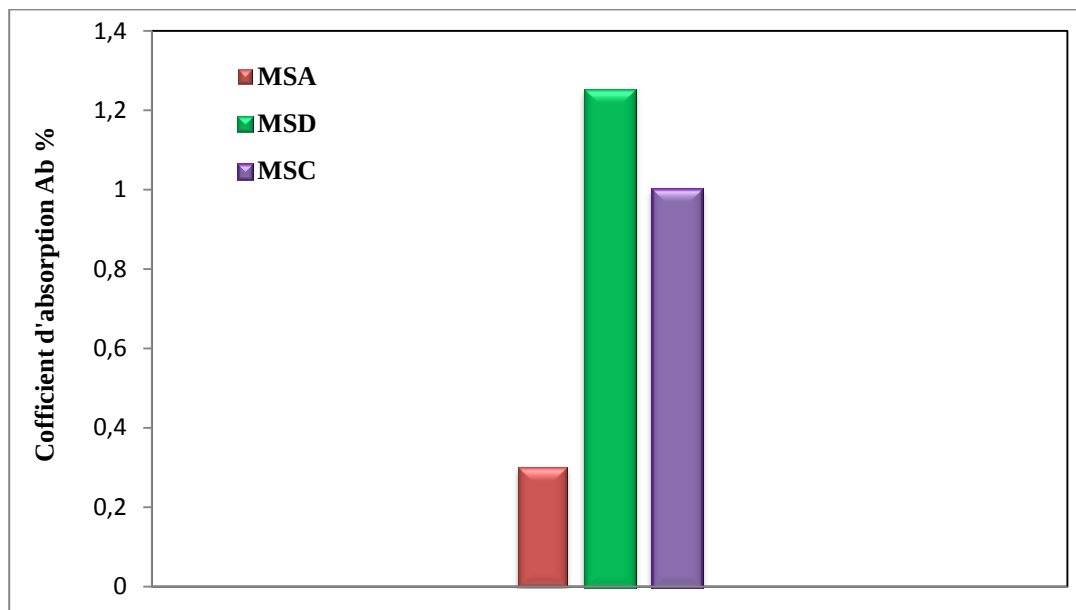


Figure (III-2) : Coefficient d'absorption des mortiers

Nous remarquons d'après la figure (III-2), que l'absorption des mortiers de sable de dune MSD et du sable calcaire MSC est plus grande que celle du mortier de sable alluvionnaire MSA; cela peut être justifié par les coefficients d'absorption élevés des deux sables (dunaire et calcaire) et qui égale à 4.5% pour le sable calcaire et 4.2% pour le sable dunaire.

III-3-2/ Absorption capillaire

La figure (III-3) ci-dessous schématise la variation de la capillarité des mortiers âgés de 28 jours en fonction du temps (jusqu'à 24 heures). Il est remarqué selon la même figure que l'allure d'absorption d'eau par capillarité a la même cinétique pour tous les mortiers. Elle est en croissance avec le temps, lente au début, par la suite, elle se stabilise pour augmenter après 24 heures particulièrement avec le mortier à sable calcaire MSC. Comme pour l'absorption totale d'eau, le mortier à sable alluvionnaire MSA a présenté l'absorption capillaire la plus faible; ceci est dû à l'absorption faible du sable alluvionnaire (qui est égale à 3.2 seulement) par rapport aux autres sables (dunaire et calcaire).

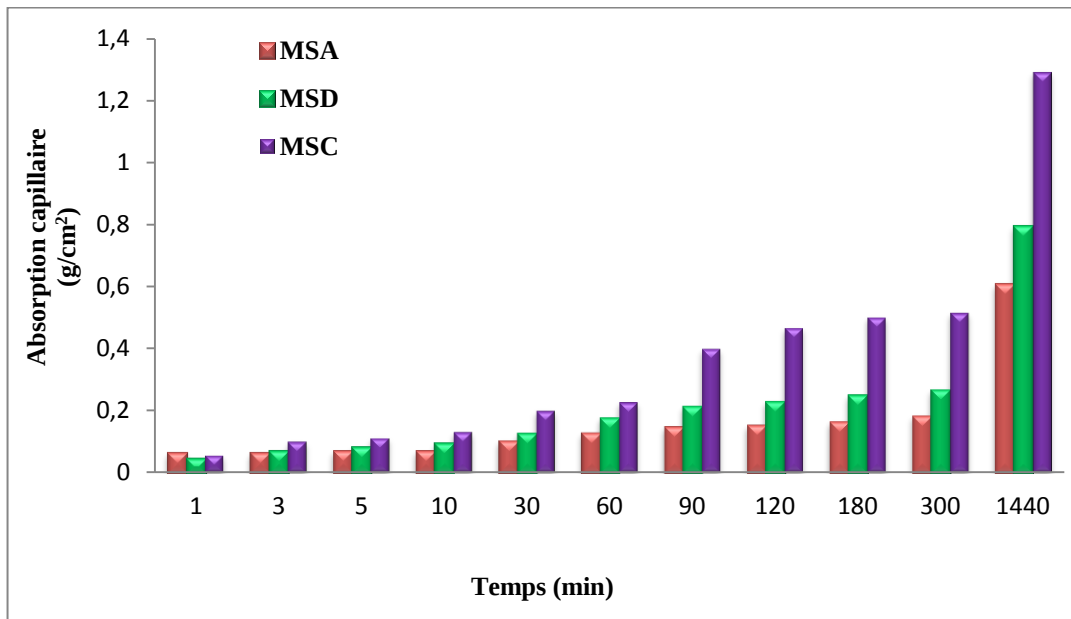


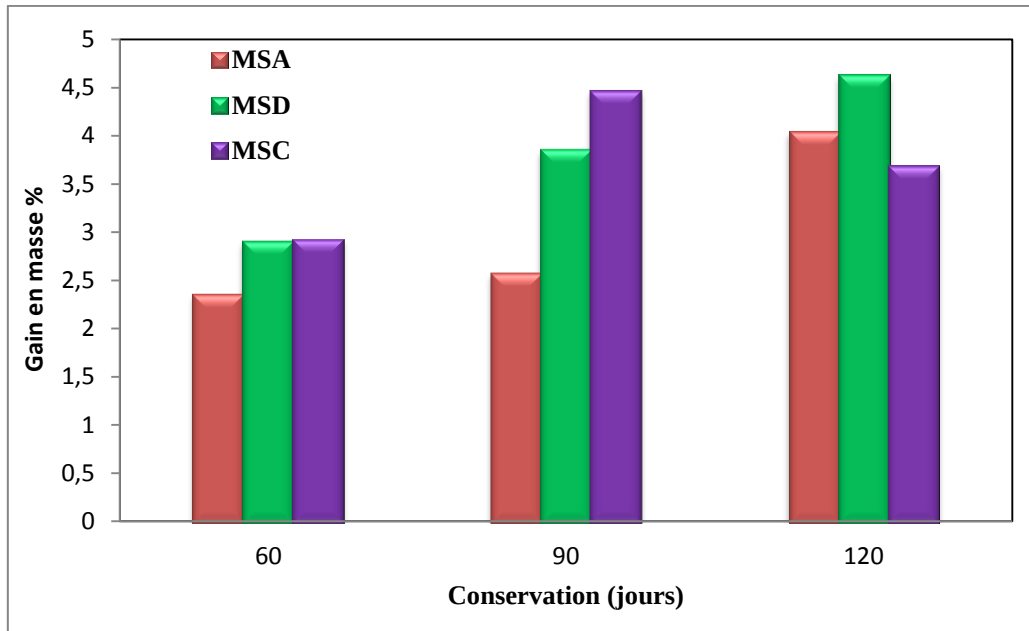
Figure (III-3): Absorption d'eau par capillarité des mortiers

III-3-3/ Variation de poids

La variation de masse des échantillons avant chaque écrasement est illustrée sous forme graphique sur les figures (III-4-a et III-4-b) respectivement dans l'eau saturée de chaux et dans la solution sulfatique.

On remarque d'après la figure (III-4) que le gain en masse est généralement une fonction croissante avec le temps de conservation dans les trois mortiers. Dans un travail réalisé avec les mortiers de sable calcaire, il était constaté que les mortiers continuent à gagner de poids dans l'eau et dans le sulfate de magnésium [37]. L'auteur de ce travail a justifié ce gain de masse par les nouvelles formations, telles que l'ettringite et le gel C-S – H pendant l'hydratation du ciment.

On remarque aussi selon la figure (III-4), que le mortier à sable dunaire MSD a atteint le gain le plus important après une conservation de 120 jours, dans l'eau et dans la solution sulfatique, contrairement au mortier de sable calcaire MSC qui a enregistré le gain le plus faible.



a- Dans (l'eau + chaux)

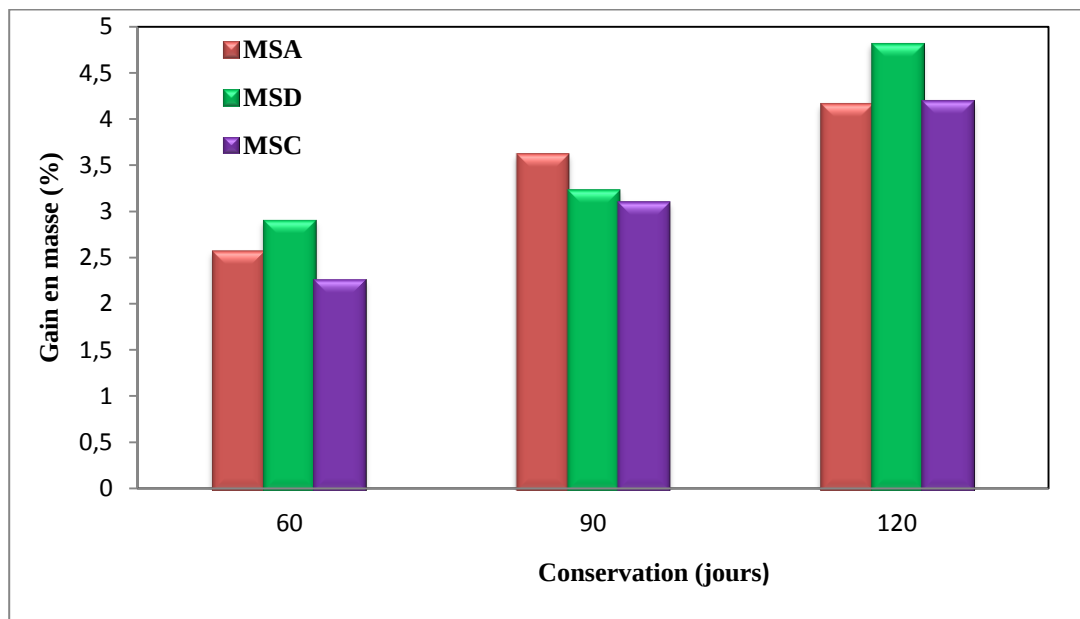
b- Dans le sulfate de magnésium ($MgSO_4$)

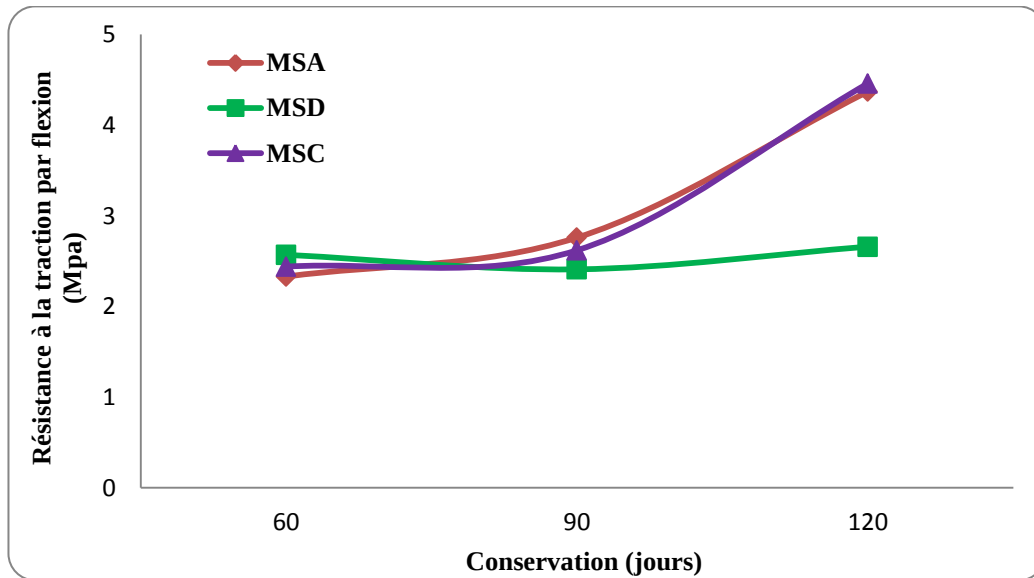
Figure (III-4) : Evolution du gain en masse en fonction de la durée de conservation

III-3-4/ Résistance mécanique

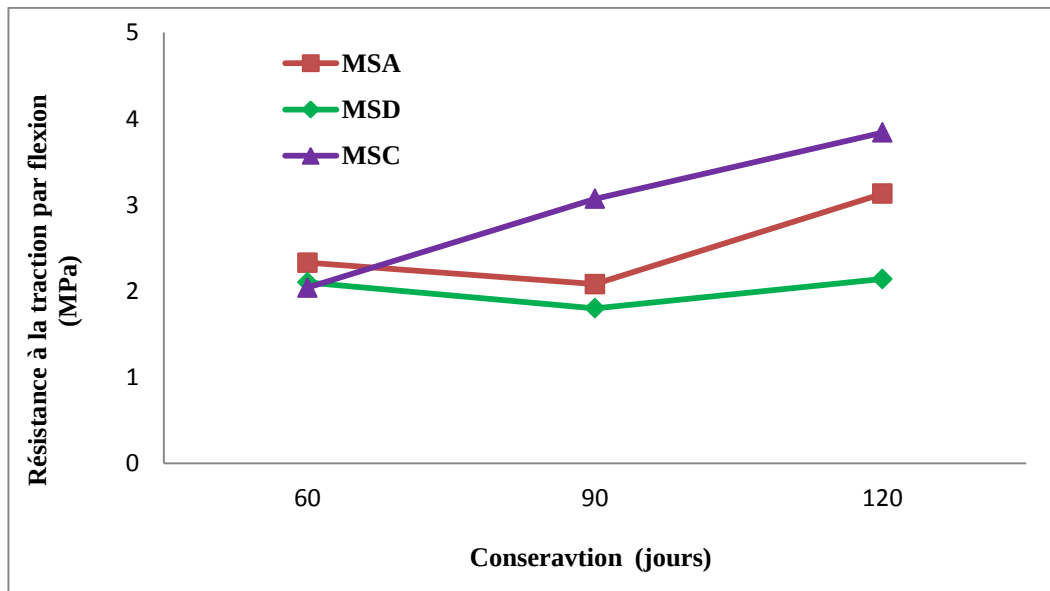
Une série des éprouvettes est conservée dans l'eau saturée de chaux, et une deuxième série des éprouvettes conservée dans le sulfate de magnésium $MgSO_4$ (de concentration égale à 5 %). Les éprouvettes sont âgées de 28 jours (temps zéro), préalablement conservées dans l'eau saturée de chaux.

III-3-4-1/ Résistance à la traction par flexion

Les figures (III-5-a) et (III-5-b) représentent la variation de la résistance à la traction par flexion des différents mortiers en fonction de la durée d'immersion dans l'eau et dans le sulfate de magnésium MgSO_4 respectivement.



a- Dans (l'eau + chaux)



b- Dans le sulfate de magnésium (MgSO_4)

Figure (III-5): Résistance à la traction par flexion fonction de la durée de conservation.

D'après les figures (III-5-a et III-5-b), une augmentation de la résistance est généralement observée en fonction de la durée de conservation, quel que soit le type du mortier et dans les deux milieux d'exposition. Ceci est dû au développement de l'hydratation de ciment. Cette conclusion est trouvée dans un autre travail réalisé sur les mortiers à sable calcaire [38]. Le mortier à sable dunaire a enregistré l'évolution la plus faible par rapport aux autres mortiers dans les deux milieux.

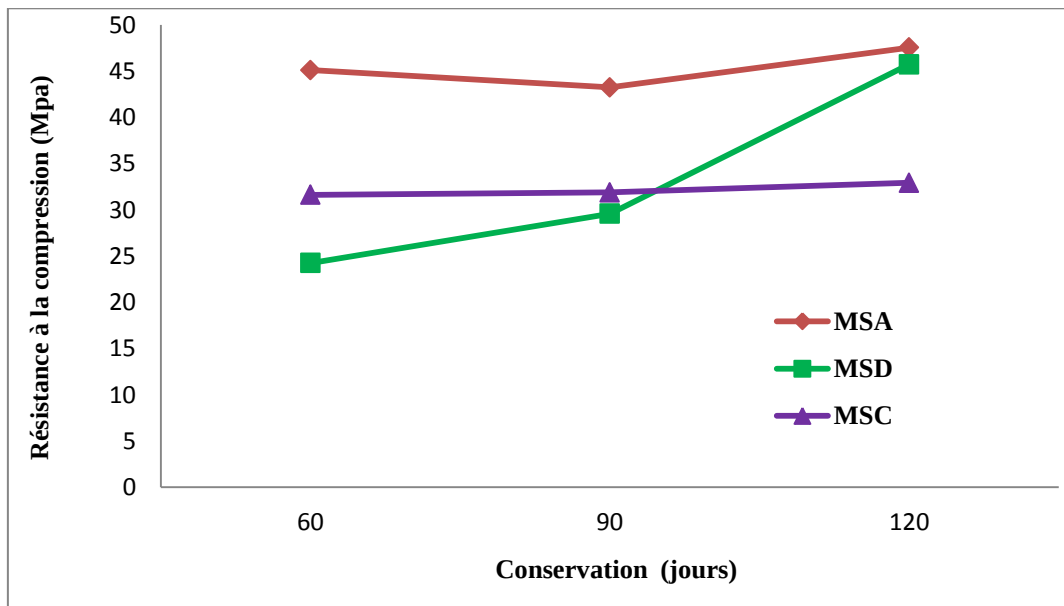
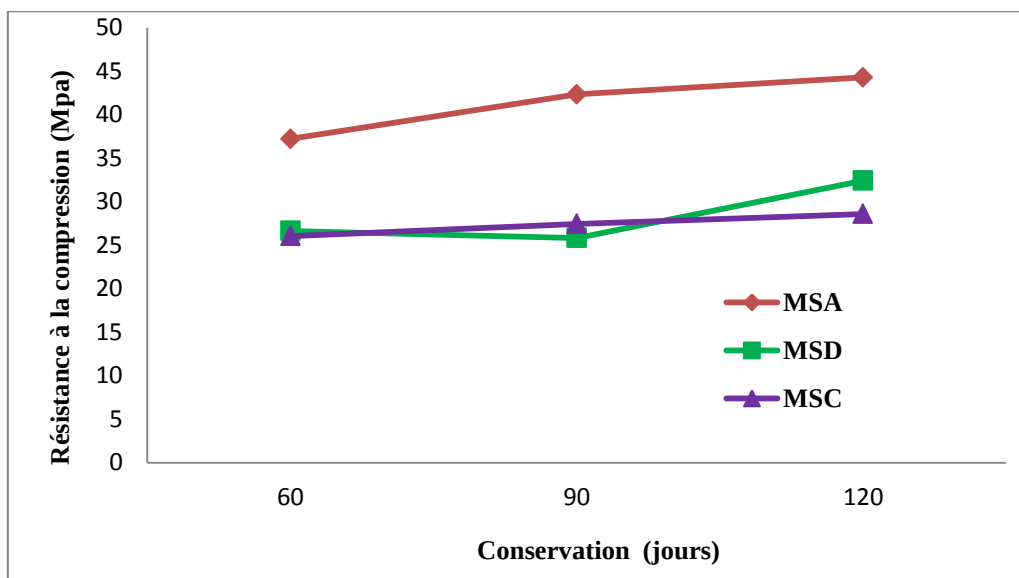
On a constaté aussi que la résistance à la traction par flexion des mortiers conservés dans l'eau + chaux est plus élevée que celle atteinte dans le sulfate de magnésium. Il est remarqué que les mortiers MSA et MSC ont présenté un comportement en flexion très similaire dans l'eau + chaux. En général l'emploi des granulats concassés conduit à une amélioration des résistances à la traction. Par rapport aux sables siliceux, les sables calcaires offrent les résistances à la traction par flexion les plus importantes [39].

La meilleure résistance obtenue dans le sulfate de magnésium est celle du mortier de sable calcaire MSC qui est de l'ordre de 3.84 MPa après une conservation de 120 jours. Cela peut être obtenu grâce à la nature calcaire du sable utilisé qui améliore le comportement du béton soumis à une attaque sulfatique [37]. Certains chercheurs [40] voient que les bétons à sable calcaire donnent des bonnes performances vis-à-vis des attaques sulfatiques en comparaison avec les bétons à sable siliceux.

III-3-2-2/ Selon la résistance à la compression

Les résultats obtenus des essais de compression sont montrés sur les figures (III-6-a et III-6-b). Les figures donnent la variation de la résistance à la compression des différents mortiers en fonction de la période de conservation, respectivement dans l'eau et dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .

D'après les figures (III-6-a et III-6-b), on remarque aussi que la résistance à compression des mortiers conservés dans l'eau + chaux est la plus élevée par rapport à celle des mortiers conservés dans le sulfate de magnésium. On constate d'après ces résultats que, quel que soit le type du mortier et quel que soit le milieu d'immersion, la résistance à la compression évolue positivement avec la durée de conservation. D'autre part on observe que les mortiers du sable alluvionnaire MSA ont présenté des résistances à la compression supérieures à celles des autres mortiers, qui sont de l'ordre de 45.13 MPa à 60 jours et 47.56 MPa après 120 jours de conservation dans l'eau + chaux et 37.22 MPa après 60 jours de conservation et 44.28 MPa après 120 jours dans le sulfate de magnésium (MgSO_4). Ces résultats confirment le rôle positif du sable alluvionnaire, qui est un sable roulé siliceux dans le comportement mécanique à la compression des mortiers. L'augmentation de la résistance est affectée aussi par la présence des gros éléments dans le sable alluvionnaire, ceci veut dire que le sable alluvionnaire a une meilleure granulométrie et par conséquence il offre aux mortiers une meilleure résistance à la compression. Ce résultat est confirmé par d'autres études [39].

**a- Dans l'eau + chaux****b-Dans le sulfate de magnésium (MgSO_4)****Figure (III-6): Résistance à la compression en fonction de la durée de conservation**

III-4/ Observations visuelles

Des observations visuelles sont faites sur les éprouvettes de mortiers depuis le premier jour d'exposition à l'attaque chimique du sulfate de magnésium jusqu'aux 120^{ème} jours de conservation.

- a) Les éprouvettes conservées dans l'eau saturée de chaux (figure III-7) n'ont présenté aucun changement visuel de leurs surfaces sauf leur couleur est devenue un peu plus foncée par rapport à leur couleur d'origine c.-à-d. avant l'immersion. L'eau est considérée par toutes les normes et les règles techniques comme étant le meilleur milieu de conservation pour les bétons et les mortiers [37].

a) MSA



b) MSD



c) MSC

Figure (III-7): Eprouvettes du mortier immergées dans l'eau+chaux

b) Les éprouvettes conservées dans le sulfate de magnésium (figure III-8) se sont manifestées d'une couleur marron dans tous les mortiers, ce changement de couleur n'est apparu qu'après quatre mois de conservation. Cette couleur est due à des nouvelles formations résultantes de la réaction entre le sulfate et les mortiers.



a) MSA

b) MSD

c) MSC

Figure (III-8): Eprouvettes du mortier immergées dans sulfate de magnésium $MgSO_4$

III-5/ Conclusion

D'après les essais physico- mécaniques effectués sur les mortiers conservés dans les différents milieux de conservation, dans l'eau + chaux et dans le sulfate de magnésium $MgSO_4$ et à la suite des résultats obtenus nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- Le mortier à sable calcaire MSC a nécessité plus d'eau pour sa bonne maniabilité, par rapport aux autres mortiers à base de sables naturels (MSA et MSD).
- Le coefficient d'absorption des mortiers de sable de dune MSD et du sable calcaire MSC est plus important que celui du mortier de sable alluvionnaire MSA.
- La capillarité du mortier de sable alluvionnaire MSA est la plus faible que celle des mortiers MSD et MSC.
- Les trois mortiers gagnent plus de poids avec la durée de conservation.
- Une augmentation de la résistance à la traction par flexion et à la compression est enregistrée en fonction de la durée de conservation dans tous les mortiers et dans les deux milieux de conservation (dans l'eau + chaux et dans le sulfate de magnésium $MgSO_4$).

- Les résistances à la traction par flexion et à la compression dans tous les mortiers sont plus élevées dans l'eau saturée de chaux que celles obtenues dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le comportement à la traction par flexion des mortiers MSA et MSC est très similaire.
- Le mortier à sable calcaire MSC a donné la meilleure résistance à la traction par flexion dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le mortier à sable alluvionnaire MSA a présenté le meilleur comportement en compression dans les deux milieux de conservation et plus particulièrement dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le milieu eau saturée de chaux n'a aucun effet négatif sur l'aspect extérieur des trois types de mortiers.
- Sous l'effet de l'attaque chimique par le sulfate de magnésium, tous les mortiers sont devenus marron.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusions Générale

Notre travail s'est porté sur l'étude de l'effet de la nature minéralogique du sable sur la durabilité et le comportement mécanique des mortiers. Les sables employés sont le sable alluvionnaire, de dune et calcaire. L'attaque chimique testée est l'attaque au sulfate de magnésium qui est accélérée par des cycles de mouillage-séchage.

Plusieurs conclusions ont été tirées à travers ce travail expérimental et qui sont les suivantes:

- Les sables utilisés, le sable alluvionnaire et le sable de dune et calcaire possèdent des modules de finesse de l'ordre de 1.97, 1.8, respectivement.
- L'absorption en eau du sable alluvionnaire est légèrement inférieure à celle des autres sables.
- Le sable de dune est très propre par rapport aux autres sables.
- Le mortier à sable calcaire MSC a besoin de plus d'eau pour être maniable et facile à confectionner, par rapport aux autres mortiers à base de sables naturels (MSA et MSD)
- L'absorption des mortiers de sable de dune MSD et du sable calcaire MSC est plus grande que celle du mortier de sable alluvionnaire MSA
- Le gain en masse est généralement une fonction croissante avec l'âge dans les trois mortiers
- Une augmentation de la résistance est généralement observée en fonction de l'âge, quel que soit le type du mortier et dans les deux milieux d'exposition. Ceci est dû au développement de l'hydratation de ciment
- Une augmentation de la résistance à la traction par flexion et à la compression est enregistrée dans les mortiers immergés dans l'eau + chaux et dans les mortiers exposés à l'attaque du sulfate de magnésium MgSO_4
- Aucun changement visuel de leurs surfaces sauf leur couleur pur les éprouvettes conservées dans l'eau saturée de chaux
- Les éprouvettes conservées dans le sulfate de magnésium se sont manifestées d'une couche marron dans le mortier, ce changement de couleur n'est apparu qu'après quatre mois d'âge et il est dû à nouvelles formations résultantes de la réaction entre le sulfate et le mortier.
- Une augmentation de la résistance à la traction par flexion et à la compression est enregistrée en fonction de la durée de conservation dans tous les mortiers et dans les deux milieux de conservation (dans l'eau + chaux et dans le sulfate de magnésium MgSO_4).

- Les résistances à la traction par flexion et à la compression dans tous les mortiers sont plus élevées dans l'eau saturée de chaux que celles obtenues dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le comportement à la traction par flexion des mortiers MSA et MSC est très similaire.
- Le mortier à sable calcaire MSC a donné la meilleure résistance à la traction par flexion dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le mortier à sable alluvionnaire MSA a présenté le meilleur comportement en compression dans les deux milieux de conservation et plus particulièrement dans le sulfate de magnésium MgSO_4 .
- Le milieu eau saturée de chaux n'a aucun effet négatif sur l'aspect extérieur des trois types de mortiers.
- Sous l'effet de l'attaque chimique par le sulfate de magnésium, tous les mortiers sont devenus marron.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- **Neville.A.M.**« Propriétés du béton » traduit par le CRIB et Edition Eyrolles,Paris,2000
- [2]- **Hachani. I et Khelif. R.** «Etude de l'effet de la géométrie des fibres synthétiques sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers à sable calcaire», mémoire d'ingénieur encadré par Mme Bendjillali Khadra, Université de Laghouat, 2009
- [3]- **Kettab Ratiba .**« contribution à la valorisation du sable de dunes », Mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique ,2003
- [4]- **Bendhia M.H .**« Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routier», **U.R.E.G** Boumerdes ; Domec ;1980 et Chemrouk ;2000 »
- [5]- **Domec M .** « Construction des chaussées au Sahara »,Rapport technique du laboratoire Central des travaux Public, Alger,Sep1980
- [6]- **Bemgoucha F.Z.** « Amélioration des propriétés de mortier à base de sable de dunes avec ajout « Sable granulé de haut fourneaux » Mémoire de fin études, Ecole National Des Travaux Publics, 2005
- [7]- **Bounoua. A et Moulay. B. A.** «Effets des ajouts cimentaires sur le comportement physico-mécanique des mortiers à base de sable calcaire en milieux agressifs», mémoire d'ingénieur, Université de Laghouat, 2009
- [8]- **Makhloufi. Z.** «Etude du béton calcaire du Turonien de Laghouat», Thèse de magister C.U .Laghouat, 2001
- [9]- **Norme ACI .**« classification du type d'agression par les sulfates »,1997
- [10]- **Neville.A.M.** « Propriétés du béton » Edition Eyrolles,Paris,1983
- [11]- **Bederina.M.**« Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois »,Thèse de doctorat,Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2007
- [12]- **Benchaa .B , Azzouz1. L, El-hadj Kadri, Belaidi1 A. S, Soualhi .H,** « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes », XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, Département de génie civil, Université Amar Telidji de Laghouat, Algérie,6 au 8 juin 2012
- [13]- **Assié S,** « Durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004, p. 254
- [14]- **Bessa A., Bigas J.P., Gallias J.L,** « Evaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers»,XXIIIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil, France, 3 – 4 Juin 2004

- [15]- **R'mili A., Ben Ouezdou M.**, «Incorporation du sable de concassage et du sable de désert dans la composition des bétons »,Séminaire international, Innovation et Valorisation en génie civil et matériaux de construction, N10-271, Rabat, Maroc, 2011.
- [16]-**Boukhalkhal A.**, « Rhéologie, caractérisation physico-mécanique et durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre», Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2012
- [17]- **Shaikh M. G., Daimi S. A.**, « Durability studies of concrete made by using artificial sand with dust and natural sand», International Journal of Earth Sciences and Engineering,2011
- [18]- **ASTM D 559 - 57**, « Wetting-and-Drying Tests of Compacted Soil - Cement Mixtures»
- [19]-**EN206**, « Béton-part1 : spécification, performances, production et conformité » Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, 1999
- [20]- **Santhanam.M,COhen.M.D,Olek.J** , « Sulfate attack research-whither now » , Cement and Concrete Research 31,pp845-851,2001
- [21]- **Irassar.E.F,Bonavetti.V.L,Gonzale.Z.M**, « Microstructural study of sulphate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient température », Cement and Concrete Research 33,31 et 41, 2003
- [22]- **Higgins.D.D**, « Increased sulfate resistance of GGBS concrete in the présence of carbonate »,Cement and Concrete Composites,pp913-919,2003
- [23]- **Mme Zineb Damene**, « Comportement physico-Mecanique et Resistance Aux sulfates de mortier à base de ciments algeriens » Mémoire de magistère, centre universitaire Amar Tlidji de Laghouat 2005
- [24]- **P.K.Mehta** ,« Mechanism of expansion associated with ettringite formation »,Cement Res,Vol3,1973,pp1-6
- [25]- **E.Rozière,f.Grondin,A.loukili et E.Wenger**, « Etude expérimentale et modélisation des attaques de sulfate dans les matériaux cimentaires »18ème Congrès Français de Mécanique
- [26]- **LCPC**, « Recommandations pour la durabilité des béton durci soumis au gel »,guide technique,Décembre 2003
- [27]- **Norme Française AFNOR NF P18-555** , « Granulat : Analyse granulométrique par tamisage »,paris1990
- [28] - **Norme française AFNOR NF P18-592**, « Granulats essai au bleu de méthylène méthode à la tâche», déc 1990
- [29] - **Norme Française AFNOR NF P18-598** , « Granulat : équivalent de sable »,paris, 1990

- [30] - **Maouche. y et Laouiret .m**,« Etude de l'effet de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique des poutres en béton armé renforcées par un déchet de fibres synthétique »,Mémoire de Master ,Laghouat 2015/2016
- [31] – **EN196-6**,« méthode d'essai-des-ciments-détermination-de-la-finesse»
- [32]- **Norme Européenne NF EN 196-3**,«Méthodes d'essais des ciments –Partie 3: Prise de Ciment», Paris 1990
- [33]- **Norme française AFNOR NF P18-452 Bertrand. M**, « Travaux réalisés au CEBTPT, Maroc».
- [34]- **Norme française AFNOR EN 196-1**, «Ciment, essais mécanique/ compression et flexion», paris 1994.
- [35]- **ASTM C 1012-04**, « Standard test methods for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution», 2004
- [36]- **Norme Européenne NF EN 480-5**, « Méthodes d'Essai –Partie 5 : Détermination de l'Absorption », 1996
- [37]- **Bendjillali. K**, « Etude de l'influence du renforcement fibreux en polypropylène sur les performances physico-mécaniques et sur la durabilité des mortiers de ciment à base de sable calcaire» Thèse de Doctorat, USTHB, Alger. 2015
- [38]- **Bendjillali. K, Chemrouk. M et Goual. M. Sayeh** , «Durabilité des mortiers calcaires renforcés de fibres de polypropylène vis-à-vis des sulfates de magnésium», The 3rd International Congress on Concrete Technology and Durability CITEDUB3. Alger. Algérie. pp 328-334. 2016
- [39]- **Bendjillali. K et Makhloufi. Z**, « Study of the effect of the nature of aggregates on the mechanical behaviour of the concrete in hot and dry zones 'Contribution of the curing'»,. MATEC Web of Conferences Journal. 2. 2012
- [40]- **Skaropoulou. A, Kakali. G et Tsivilis. S**, «Thaumasite form of sulfate attack in limestone cement concrete, The effect of cement composition, sand type and exposure temperature», Construction and Building Materials. 36. pp 527-533. 2012

ANNEXES



Photo 01 : Préparation, Confection et Démoulage des éprouvettes



Photo 02 : Pesés des éprouvettes avant écrasement



Photos 03: Conservation des échantillons sous l'eau avec chaux



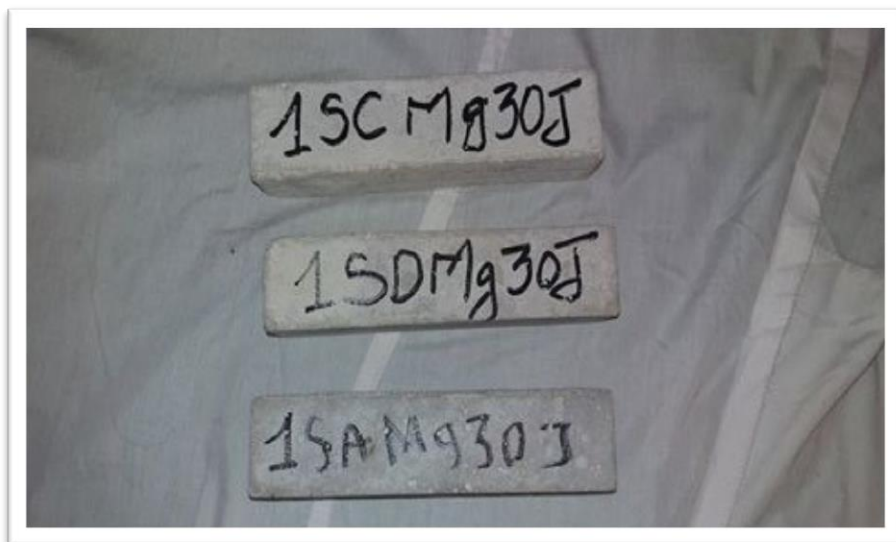
Photos 04 : Conservation des échantillons sous MgSO_4



Photos 05: Ecrasement à la traction par flexion
Traction par flexion



Photos 06: Ecrasement à la compression
compression



Phot07 : Eprouvettes du mortier soumise à sulfate de magnésium MgSO_4 à 30jours



Photo8 : Eprouvettes du mortier soumise à sulfate de magnésium MgSO_4 à 60jours



Photo9 : Eprouvettes du mortier soumise à sulfate de magnésium MgSO_4 à 90jours

a)MSA



b)MSD



c)MSC



Photo10 : Eprouvetttes du mortier soumise à l'eau sature aux chaux à 120jours