



## Mémoire de Fin d'Études

Présenté au

Département : Génie Civil

Domaine : Techniques

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique et Matériaux

Réalisé par

**SAHOUANE Slimane & ZEBBARE Zakaria**

**Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique**

**Intitulé**

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts  
sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***

Soutenue le : 15/06/2017

Devant le jury de soutenance composé de :

Dr. <b>REBIH ZAITRI</b>		Univ Djelfa	Président
Mr. <b>Dif Fodil</b>	MAA	Univ Djelfa	Encadreur
Mr. <b>Omran mohamed</b>		Univ Djelfa	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicace

---

*Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux*

## SAHOUANE Slímane :

*À mes très chers parents*

*À mes deux familles : petite famille : abd errazak , sondos, naas ,rahma*

*Grande famille : La famille SAHOUANE.*

*: La famille KAROUSSE.*

*À tous mes amis .Surtout : rachid, belkasem, adel, kamel ,mbarek ,momamed s, bachire, hocine, benalaí, abderahmman, youcef ,omar, abdelkader, mohamed d ,khalil ,brahim et walid.*

## ZEBBARE Zakaría

*À mes très chers parents*

*À mes deux familles : petite famille : foued*

*Grande famille : La famille zebbare*

*À tous mes amis .Surtout :,momamed s, youcef ,omar, abdelkader, mohamed d ,khalil .*

---

**Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier**

# Remerciements

---

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le Clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur dif fodil pour les orientations et les conseils qu'il a su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

*Nous voudrions remercier tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.*

*Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de nos profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner le manuscrit.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*



# RÉSUMÉ

---

Pour l'évaluation des matériaux locaux en abondance dans notre pays, en particulier dans notre région nommée Al-Mosran (au nord de la ville de Djelfa à 30 Km) où la sable de, et pour l'évaluation des sable de dunes finement broyé , Nous avons utilisé plusieurs expériences.

L'objectif principal de ces expériences est d'étudier l'effet de la dune de sable finement broyée sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du mortier (changement de masse) dans l'environnement agressif.

Dans cette étude la correction de la granulométrie de sable de dune, qui est généralement mal étalée, a été faite par l'addition des fines calcaires. La méthodologie de la formulation des mélanges se base sur la substitution de sable de dune par les fines, à différentes teneurs pondérales 5, 10, 15, 20 et 25%. Les résultats obtenus montrent que l'introduction de fines calcaires aux mélanges rend le mortier moins poreux et plus résistant quel que soit en compression et l'effet est quelque peu acceptable pour la durabilité du mortier

**Mots-clés** : durabilité, mortier, propriétés mécaniques, Sable de dune finement broyé, fines calcaire, milieux agressifs.

---

*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier*

## ملخص

من أجل تقيم المواد المحلية الموجودة بكثرة في بلادنا و خاصة في منطقتنا المسماة المصران (شمال مدينة الجلفة حوالي ٣٠ كلم ) حيث الكثبان الرملية . ومن أجل تقيم الرمل الكثبان المسحوق ناعما ، استخدمنا عدة تجارب .

الهدف الرئيسي من هذه التجارب هو دراسة مدى تأثير الرمال الكثبان المسحوقة ناعما على الخصائص الميكانيكية (مقاومة الضغط) وديمومة الملاط (التغير في الكتلة) في البيئة العدوانية.

في هذه الدراسة تم تصحيح التحليل الحبيبي للرمل الكثبان عن طريق اضافة المسحوق الكلسي.

تستند منهجية صياغة نسب مكونات الخلائط على استبدال رمل الكثبان المسحوق بالمسحوق

الكلسي وفق نسب كتلية مختلفة 5%، 10%، 15%، 20%، 25%. اظهرت النتائج ان اضافة هذا

المسحوق تجعل الملاط اقل مسامية ، و اكثر قدرة على مقاومة قوى الضغط وتأثير مقبول على

ديمومة الملاط .

**الكلمات المفتاحية:** الاستدامة ، الملاط ، الخصائص الميكانيكية ، الرمل الكثبان المسحوق ناعما

،المسحوق الكلسي، الاوساط العدوانية.

# ABSTRACT

---

The work presented in this master thesis is part of the valorization of the dune sand addition of finely ground, which is found abundantly in our country of El Mosrane region (40 km north of Djelfa).

The main objective of this experimental work is to study the enhancement of dune sand addition of finely ground of on mechanical properties (compressive strength) and the durability of concrete (mass change) in the aggressive environment.

In this study the correction of the granulometry of the dune sand addition of finely ground, which is generally very tight, was made by the addition of calcareous fines. The methodology for the mixtures formulation is based on the replacement of dune sand with fines at different weight contents; 5, 10, 15, 20 and 25%. The results obtained show that the addition of these fines makes the mortar less porous and more resistant to the tensile and compression strength and the effect is somewhat acceptable for concrete durability

## **Keywords:**

Sustainability, mortar, mechanical properties, finely ground sand dune, calcareous fines and mechanical properties.

---

*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier*

# SOMMAIRE

<i>Dédicace</i> .....	i
<i>Remerciements</i> .....	i
<b>RÉSUMÉ</b> .....	iii
ملخص.....	iv
<b>SOMMAIRE</b> .....	vi
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : Recherche Bibliographique</b> .....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Définition du ciment .....	3
1.3 Les constituants du ciment.....	3
1.3.1 Le clinker.....	3
1.3.2 Le gypse (CaSO <sub>4</sub> ).....	5
1.3.3 Ajout minéral actif .....	5
1.4 Conclusion .....	6
1.5 Les Ajouts Minéraux.....	6
1.5.1 Introduction.....	6
1.6 Classification des ajouts minéraux .....	7
1.6.1 Ajouts minéraux inertes .....	7
1.6.1.1 La poussière .....	7
1.6.1.2 Additions calcaires .....	8
1.6.1.3 Les fillers.....	8
1.6.1.4 Sable de dune.....	8
1.6.2 Ajouts minéraux actifs .....	9
1.6.2.1 La pouzzolane.....	9
1.6.2.2 La fumée de silice .....	11
1.6.2.3 Laitier de haut fourneau .....	12
1.6.2.4 Les cendres volantes .....	13
1.7 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil .....	14
1.7.1 Intérêt du point de vue économique .....	14
1.7.2 Intérêt du point de vue technique .....	14
1.8 Conclusion .....	15
1.9 Différents types de dégradations chimiques .....	15
1.9.1 Revue bibliographique de l'effet des ajouts minéraux vis-à-vis des attaques chimiques ..	15
1.9.1.1 Leur rôle dans l'attaque par les acides : .....	15
1.9.1.2 Le rôle des ajouts minéraux dans l'attaque par les sulfates : .....	16
1.10 Conclusion .....	20
<b>CHAPITRE 2 : Matériaux utilisé et essais réalisé</b> .....	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans mortier .....	22
2.2.1 ciment.....	22

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier***

vi

2.2.2	Définition des sables utilisés.....	23
2.2.2.1	Les sables.....	23
2.2.2.1.1	Caractéristiques physiques :.....	24
2.2.2.2	Sable de dune finement broyé.....	25
2.2.3	Les fines.....	25
2.2.3.1	Définition.....	25
2.2.4	Eau de gâchage.....	28
2.3	Essai réalisés sur le Mortier.....	28
2.3.1	Préparation des Mortier.....	28
2.3.1.1	Méthode de formulation des mélanges.....	28
2.4	Essais réalisés à l'état durci.....	29
2.4.1	Essai de résistance à la compression.....	29
2.4.2	Essais de durabilité.....	30
2.4.2.1	Variation de la masse.....	30
2.5	Conclusion.....	30
<b>CHAPITRE 3 : Résultats et discussion.....</b>		<b>31</b>
3.1	Introduction.....	31
3.2	Evaluation de la résistance à la compression.....	32
3.2.1	Résultats et discussions.....	33
3.2.1.1	Résultats :.....	33
3.3	Résultats et commentaires sur les essais de la durabilité.....	34
3.3.1	Actions des acides.....	34
3.2.1.1	L'effet de l'ajout de sable de dune finement broyé et fine de calcaire.....	36
3.4	L'action des solutions sulfatiques :.....	38
3.5	Conclusion.....	41
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>		<b>42</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>44</b>

---

## ***LISTE DES FIGURES***

<b>Figure 1.1</b> : Microphotographie d'un clinker .....	04
<b>Figure 2.1</b> : Ciment utilisé .....	23
<b>Figure 2.2</b> : Les sables utilisés .....	24
<b>Figure 2.3</b> : Analyse granulométrique des sables.....	24
<b>Figure 2.5</b> : Le sable de dune avant et après broyage .....	25
<b>Figure 2.6</b> : Filler calcaire utilisé .....	26
<b>Figure 2.7</b> . Diffractogramme X des fillers calcaires .....	27
<b>Figure 2.8</b> : la presse hydraulique de compression pour béton (Laboratoire des LNHC Djelfa).....	30
<b>Figure 3.1</b> :Dispositif pour l'essai de résistance à la compression .....	32
<b>Figure 3.2</b> . Evolution de la résistance en compression des mélanges de mortier.....	33
<b>Figure 3.3</b> : Mortiers immergés dans la solution acide .....	35
<b>Figure 3.4</b> : Pesée des échantillons. Balance de précision 0.01g .....	36
<b>Figure 3.5</b> : Variation de la perte en poids en fonction de la période D'immersion en 5% HCl.....	36
<b>Figure 3.6</b> : Etat d'échantillon avant immersion dans la solution acide .....	37
<b>Figure 3.7</b> : Etat des éprouvettes après immersion de 28 jours dans Solutions : témoin, 5 %HCl .....	38
<b>Figure 3.8</b> : Etats d'échantillons immergés pendant 28 jours Dans 5% HCl .....	38
<b>Figure 3.9</b> : Immersion d'éprouvettes en solution de 5% MgSO <sub>4</sub> .....	39
<b>Figure 3.10</b> : Variation de la masse en fonction de la période D'immersion en 5 % MgSO <sub>4</sub> .....	40

## ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau 1.1</b> : composition chimique type de certaines fumées de silice .....	11
<b>Tableau 1.2</b> : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau .....	12
<b>Tableau 1.3</b> : Composition chimique type de certaines cendres volantes D'après Aitci.....	13
<b>Tableau 1.4</b> : résistance à la compression .....	17
<b>Tableau 2.1</b> : Propriétés physiques des ciments.....	22
<b>Tableau 2.2</b> : Analyse chimique de ciment .....	23
<b>Tableau 2.3</b> : Caractéristiques physiques des sables .....	24
<b>Tableau 2.4</b> : Analyse chimique du sable de dune finement broyé .....	25
<b>Tableau 2.5</b> : Analyse chimique de fillers calcaires.....	26
<b>Tableau 2.6</b> : Propriétés physiques des fines calcaires.....	22
<b>Tableau 2.7</b> : composition chimique de l'eau robinet .....	28
<b>Tableau 3.1</b> : valeurs de la résistance en compression des différentes formulations.....	33

# INTRODUCTION

---

La valorisation des matériaux locaux donne des solutions aux problèmes de la pénurie des granulats nobles et la pollution et peut contribuer à la diminution des coûts de constructions. Parmi ces matériaux, les sables de dune. Vu l'abondance de ces sables (ils couvrent près de 60% du territoire national), et leur taux de propreté élevé, ces sables ont beaucoup d'avantages pour substituer les granulats courants aux différents domaines d'application en génie civil, tels que les bâtiments et les routes.

L'objectif de cette contribution est d'étudier l'aptitude l'effet de la dune de sable finement broyée et fines calcaire sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du mortier (changement de masse) dans l'environnement agressif.

Dans cette étude la correction de la granulométrie de sable de dune, qui est généralement mal étalée, a été faite par l'ajout des fines calcaires. La formulation des mélanges adoptée se base sur la substitution de sable de dune par les fines calcaire, aux différentes teneurs pondérales 5, 10, 15, 20, 25%. Le dosage de ciment est fixé à 450 g.

Dans cette investigation, on s'intéresse en particulier à l'ouvrabilité, à la masse volumique apparente, à la résistance à la compression, et celle à la traction et la capacité d'absorption d'eau.

Le mémoire comporte quatre chapitres :

- Recherché Bibliographique.
- Matériaux utilisés et essai réalisés
- Résultats et discussions

Après un résumé général et une présentation de l'objectif de l'étude, le premier chapitre comporte des données théoriques et bibliographiques, et les principaux travaux effectués sur le mortier à base de sable dune. Le deuxième chapitre représente une caractérisation physique, chimique et minéralogique de matériaux utilisés (le sable de dune, ciment, les fines d'ajouts).



Le troisième chapitre comporte une étude -mécanique et durabilité des mélanges à l'état durci, et une exposition et interprétation des résultats d'essais réalisés tels que, résistances mécaniques et Variation de la masse.

# CHAPITRE 1 : Recherche Bibliographique

---

## 1.1 Introduction

L'industrie du ciment est ce qu'on appelle une industrie de base parce qu'elle est située à la source du développement économique. De son principal dérivé le béton, dépend en effet tout l'équipement d'un pays : logements, hôpitaux, écoles, ponts, barrages, routes et autoroutes, ...etc. C'est à dire tout ce qui concerne deux grands secteurs de l'économie :

- Le bâtiment.
- Les travaux publics.

C'est aussi une industrie lourde, elle traite en grande masse, des matières premières de faible valeur initiale pour aboutir à un produit également d'un faible prix mais avec des installations d'un coût extrêmement élevé.

## 1.2 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un/ ou des ajout(s) minéraux actif (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

## 1.3 Les constituants du ciment

### 1.3.1 Le clinker

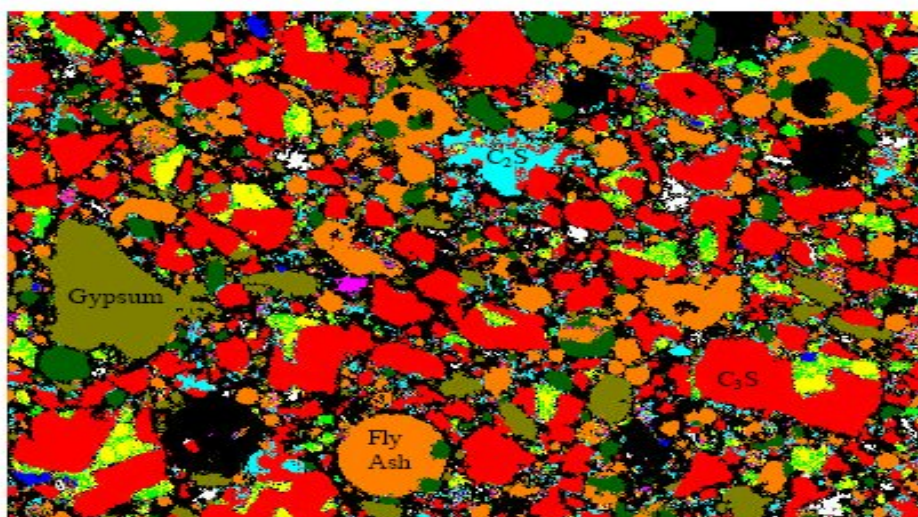
C'est un mélange fritté de calcaire et d'argile qui assure la prédominance dans le clinker de silicates de calcium ( $\text{CaO.SiO}_2$ ). le mélange après cuisson forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm et s'appelle : Clinker [1].

Le calcaire est composé principalement de deux oxydes  $\text{CaO}$  et  $\text{CO}_2$ , et l'argile de diverses matières contenant surtout trois oxydes :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . La matière première destinée à la production doit contenir 75 à 78% de  $\text{CaCO}_3$  et de 22 à 25% de matière argileuse.

Les roches qui satisfont aux conditions indiquées ci-dessus ne se rencontrent que très rarement. C'est ainsi que pour la production du ciment Portland sans ou avec ajout pouzzolanique, il faut employer à côté des calcaires et des argiles, des additions que l'on appelle adjuvants qui contiennent une grande quantité de celui des oxydes qui manque dans le mélange des matières premières. Parmi ces adjuvants corrigeant, on cite le minerai de fer, argile très alumineuse, ...etc. [1, 2].

Les oxydes indiqués plus haut ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ne se trouvent pas à l'état libre dans le clinker mais au cours de la cuisson du cru (calcaire + argile) quatre minéraux se forment (figure I.1) :

- |   |                              |
|---|------------------------------|
| ❖ $\text{C}_3\text{S}$ ..... ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )                                       | <b>Alite</b>                 |
| ❖ $\text{C}_2\text{S}$ ..... ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )                                       | <b>Belite</b>                |
| ❖ $\text{C}_3\text{A}$ ..... ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )                              | <b>Aluminate tricalcique</b> |
| ❖ $\text{C}_4\text{AF}$ ..... ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) | <b>Célite.</b>               |



**Figure I.1** : Microphotographie d'un clinker.

Les couleurs sont les suivantes : noir = porosité, rouge =  $C_3S$ ,  
Bleu clair =  $C_2S$ , vert =  $C_3A$ , orange =  $C_4AF$ , vert = sulfates de calcium,  
Jaune =  $K_2SO_4$  et blanc =  $CaO$ [3].

### 1.3.2 Le gypse ( $CaSO_4$ )

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite ( $C_3A$ ) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydro aluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydro aluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydro sulfoaluminate de calcium ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$ ).

La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en  $C_3A$  dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydro aluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial et la corrosion sulfatique de la pierre de ciment se trouve évitée, ce qui risque de se produire lorsque la teneur en gypse est élevée.

### 1.3.3 Ajout minéral actif

Ces ajouts qui jouent le rôle suivant : d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique [3,4]

## 1.4 Conclusion

Les procédés de fabrications des ciments nécessitent une énergie importante et dégagent du CO<sub>2</sub> et des poussières causant la pollution de l'environnement.

Le mécanisme de l'hydratation du ciment Portland n'est toujours pas complètement élucidé, car l'hydratation complète est attribuée au durcissement et donc à une augmentation de la résistance mécanique.

## 1.5 Les Ajouts Minéraux

### 1.5.1 Introduction

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C<sub>2</sub>S et du C<sub>3</sub>S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (NF P 18-508).

On peut écrire donc la réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :

*Pouzzolane + chaux + eau → silicate de calcium hydraté.*

Il faut noter qu'à la température de la pièce cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C<sub>2</sub>S et du C<sub>3</sub>S (30% de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la résistance de la pâte de ciment hydraté. Elle peut même

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***

être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte ce ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures qui passive les armatures d'acier.

Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définis que celle du ciment Portland.

## **1.6 Classification des ajouts minéraux**

Selon la norme [ENV 206] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes.

### **1.6.1 Ajouts minéraux inertes**

Selon certains chercheurs [1, 10], les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker d'une telle dimension pourrait être remplacées par celles de matériaux inertes (NF P 18-305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue le calcaire et la poussière ;

#### **1.6.1.1 La poussière**

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000cm/g. le

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier***

ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celles du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

### **1.6.1.2 Additions calcaires**

Le calcaire appartient aux roches carbonatées riches en chaux ( $\text{CaCO}_3$ ) et il est contenu dans la calcite, l'argonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire comme ajout, dont le contrôle de prise, l'amélioration de certaines propriétés du béton durci et le remplacement du gypse [11].

Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508 sont substituables au ciment sous les conditions de la norme expérimentale NF P 18-305.

### **1.6.1.3 Les fillers**

Ce sont des produits obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches, naturelles ou non (calcaires, basaltes, laitiers, bentonites, ...etc.), agissant surtout grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (amélioration de l'ouvrabilité, diminution de la perméabilité et réduction de la fissurabilité).

### **1.6.1.4 Sable de dune**

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

## 1.6.2 Ajouts minéraux actifs

### 1.6.2.1 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [12].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

- **Pouzzolane naturelle**

Produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomées, diatomites.

- **Pouzzolane artificielle**

Toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite, mole.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [12].

- **Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes**

Les pouzzolanes sont des roches « acides » ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.



Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micros organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [13,14].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolaniques s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formée lors de l'hydratation des silicates de calcium suivie de la cristallisation avec formation de silicates et l'aluminates de chaux hydratés).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolaniques [12].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut, dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- broyage à une finesse plus élevée.
- Treatment thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

### **Propriétés hydrauliques des pouzzolanes**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de la chaux, pour formes des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

### **Propriétés physiques de remplissage**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

### 1.6.2.2 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de Ferro silicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferro silicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO, se forme [15]

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (tableau 1.1). La teneur en SiO<sub>2</sub> de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO<sub>2</sub> de la fumée de la silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO<sub>2</sub>. La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe-Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

**Tableau 1.1** : composition chimique type de certaines fumées de silice [15].

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO <sub>2</sub>	93.7	87.3	90.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.9
K <sub>2</sub> O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse (environ 15000 m<sup>2</sup>/kg).

Tkalcic-Ciboci prétendent que la présence de super plastifiant influence la dispersion de la taille des anions de silice en augmentant la proportion de longs polymères [16].

### 1.6.2.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il vaudrait peut-être mieux l'appeler, est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Du point de vue chimique (tableau 1.2), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier fondu a une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

**Tableau 1.2 :** Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [17].

OXYDES	Laitierfrançais	Laitiernord USA	Laitieralgérien
SiO <sub>2</sub>	29à36	33à42	40.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13à19	10à16	6.0
CaO	40à43	36à45	42.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 4%	0.3à20	2.0
MgO	< 6%	3à12	4.7
S-	< 1.5%	---	0.15

Le laitier peut être refroidi de deux façons. Premièrement, on peut le laisser refroidir tranquillement à l'air de façon qu'il cristallise plus ou moins bien, sous forme de melilite en général, un mélange d'ackermanite et de gehlenite.

Quand le laitier est refroidi de cette façon, on dit qu'il est cristallisé et il peut être utilisé comme couverture de toiture ou pour construire des routes ou remblais, mais il n'a pratiquement aucune propriété hydraulique et, en aucun cas, il ne peut être utilisé comme ajout cimentaire même quand il est broyé finement [17].

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***

### 1.6.2.4 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau 1.3 la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup.

**Tableau 1.3** : Composition chimique type de certaines cendres volantes D'après Aitcin[18].

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo-calcique	Sulfo-calcique
SiO <sub>2</sub>	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na <sub>2</sub> O	2.2	0.4	2.2	0.8	---
SO <sub>3</sub>	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6	---	---
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chauxlibre	---	---	---	---	28.0

## 1.7 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

### 1.7.1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout. En effet, le clinker étant obtenu par transformation du crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout [3].

La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles [19]. matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus.

### 1.7.2 Intérêt du point de vue technique

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland), de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication.

En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu [20]. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit quelle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendres ou à la pouzzolane naturelle).

La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de  $C_3A$  du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique. Les ciments composés seront toujours recommandés

chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs. (Ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques) [20].

## 1.8 Conclusion

Les ajouts cimentaires sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts cimentaires typiques sont les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice. L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

## 1.9 Différents types de dégradations chimiques

### 1.9.1 Revue bibliographique de l'effet des ajouts minéraux vis-à-vis des attaques chimiques

#### 1.9.1.1 Leur rôle dans l'attaque par les acides :

Janotka [22] a étudié l'influence de la zéolite (pouzzolane naturelle) sur l'attaque par l'acide hydrochlorique (HCl). Il a utilisé la zéolite comme ajout au ciment :

- ciment Portland (PC) + sable siliceux (SS)
- ciment Portland (PC) + sable zéolitique (SZ)
- ciment zéolitique (PC) + sable zéolitique (SZ)
- ciment zéolitique (PC) + sable siliceux (SS)

Il a trouvé que la résistance des spécimens de mortiers contenant le matériau zéolite (ZC+ZS, PC+ZS) par l'attaque de la solution de HCl de concentration 0.5% et 1.0% est supérieure à celles contenant les constituants siliceux (PC+SS, ZC+SS). Il a supposé que cela a été provoqué par la liaison chimique entre la CaO et la zéolite et en réduisant le contenu de  $\text{Ca(OH)}_2$  dans

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécaniques et durabilité du mortier***

les spécimens de mortier, en plus, le sable zéolite (ZS) neutralise les solutions de HCl et affaiblit ainsi leur effet néfaste sur la pâte de ciment durcie.

L'étude faite par Sayamiput [23] a montré l'influence du métakaolin sur la résistance des mortiers à l'attaque des acides (5% HCl et 5%  $\text{HB}_{2\text{B}}\text{SOB}_{4\text{B}}$ ). Les pourcentages de substitution dans le poids pour le mortier contenant le métakaolin augmente immergé dans HCl étaient inférieurs à ceux immergé dans, plus  $\text{HB}_{2\text{B}}\text{SOB}_{4\text{B}}$ . Plus le pourcentage de métakaolin augmente, plus la résistance de l'attaque acide est haute, la résistance de l'attaque acide a été réduite lorsque le rapport eau/liant diminuait.

Roy et coll. [24] ont étudié l'effet de fumée de silice, métakaolin, et cendres volantes sur la résistance chimique des mortiers. Pour simuler les conditions d'environnement chimiques, ces auteurs ont utilisés les produits chimiques suivants : 1% et 5% d'acide sulfatique ( $\text{HB}_{2\text{B}}\text{SOB}_{4\text{B}}$ ), 1% d'acide chlorhydrique (HCl), 1% d'acide nitrique ( $\text{HNOB}_{3\text{B}}$ ), 5% d'acide acétique ( $\text{CHB}_{3\text{B}}\text{COOH}$ ), et 5% d'acide phosphorique ( $\text{HB}_{2\text{B}}\text{POB}_{3\text{B}}$ ). La résistance chimique a été évaluée par la mesure de la perte des spécimens.

### **1.9.1.2 Le rôle des ajouts minéraux dans l'attaque par les sulfates :**

Yeginobali et Dilek [25] ont évalué la résistance aux sulfate de deux types de fumées de silice, des fours de Ferro silicium (FeSi) et de silico Ferro chromium (SiFeCr) en utilisant deux méthodes d'essais ASTM C452 (mesure de l'expansion des barres de mortier) et ASTM C1012 (mesure de changement de longueur des barres de mortier). Ils ont utilisé des spécimens de mortier qui ont été immergés séparément dans des solutions de 10 %  $\text{NaB}_{2\text{B}}\text{SOB}_{4\text{B}}$  et 8.4 %  $\text{MgSOB}_{4\text{B}}$ . après avoir été soumis au changement de masse périodique, ces spécimens ont été testés à la compression à l'âge de 60 semaines pour évaluer leur détérioration relative vis-à-vis des spécimens gardés dans l'eau. Ils ont trouvé que les spécimens contenant la fumée de silice ont eu un plus petit changement de masse. Dans les spécimens immergés dans la solution 8.4 %  $\text{MgSOB}_{4\text{B}}$  la perte de masse s'est produite presque au début. L'addition de fumée de silice à augmenté l'importance des pertes de masse.

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier***

Tableau 1.6 : résistance à la compression des cubes de mortier immergés dans l'eau et dans les solutions de sulfates [25].

**Tableau 1.4** : résistance à la compression [25].

Type de ciment+FS	RcB28 MPa	Rc (60 semaines) MPa			% de la résistance dans l'eau à 60 semaines	
		Dans l'eau	10% NaB <sub>2B</sub> SOB <sub>4B</sub>	8.4% MgSOB <sub>4B</sub>	10% NaB <sub>2B</sub> SOB <sub>4B</sub>	8.4% MgSOB <sub>4B</sub>
NPC1+ 0%	36.5	64.8	52.5	57.3	81	88
NPC1+ 8%	42.5	66.7	60.8	40.9	91	61
NPC1+ 15%	53.5	73.2	66.9	30.1	91	41
NPC1+ 8%	38.3	56.9	49.2	40.8	86	72
NPC2+ 15%	38.3	74.1	64.4	40.6	87	55

Neville Adam [26], étudia l'influence de la concentration de la solution agressive de MgSOB<sub>4B</sub> sur le béton et démontra la variation du taux d'endommagement selon le type de ciment, le rapport E/C et le type d'exposition (d'une faible à une forte concentration). Il trouva que pour une solution saturée de MgSOB<sub>4B</sub> la corrosion est plus intense que pour de faibles concentrations, il décrit un changement de longueur (expansion) et une perte dans le poids en fonction des paramètres ci-dessus.

O'Farrell et coll. [27] ont étudié l'expansion des mortiers contenant de la brique broyée, exposés à une solution de 2.1% de sulfate de sodium (NaB<sub>2B</sub>SOB<sub>4B</sub>). Ils ont utilisé quatre types de briques dont les compositions chimiques et minéralogiques sont différentes. Ils ont trouvé que les briques dont la phase vitreuse a une teneur élevée en calcium (CaO) ou une faible proportion de phase vitreuse ne devraient pas être employées comme pouzzolanes, et les briques avec une proportion élevée en verre de faible teneur en calcium font des pouzzolanes très efficaces.

Une étude faite par Janotka et Krajci[28] sur l'augmentation de la résistance aux sulfates des mortiers contenant 15% de zéolite (pouzzolane naturelle) au ciment,

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***



pour cela ils ont utilisé trois types de ciments : Ciment Portland type CEM I 42.5 (PC), ciment résistant aux sulfates (SRPC), et un ciment à base de zéolite naturelle (PPC). Ils ont laissé les mortiers dans l'eau pure et dans une solution de 5 %  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{SO}_4$  pendant 365 jours. Ils ont constaté une diminution de 32.6% de la résistance à la compression des mortiers de PC immergés pendant 365 jours dans la solution  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{SO}_4$  comparés à ceux conservés dans l'eau. En revanche, ils ont observé une augmentation de 10 % et 2.6 % de la résistance à la compression des mortiers de SRPC et de PPC respectivement.

Paul J. Tikalsky et coll.[29], ont testé 21 types de ciment de différentes compositions chimiques et ont montré que la sévérité de l'attaque aux sulfates est fonction de la teneur en  $\text{C}_3\text{B}_A$  et du  $\text{SO}_3$  du ciment utilisé. L'attaque est importante pour les ciments à forte teneur en  $\text{C}_3\text{B}_A$  et  $\text{SO}_3$ .

S.A. Hartshorn et coll.[30], identifient la présence de thaumasite après 126 jours d'exposition dans 1.8% de solution de  $\text{MgSO}_4$  d'un mortier de ciment portland avec ajout de 35% de calcaire. En plus de la thaumasite ils trouvent aussi le gypse et la brucite sur la couche de surface ceci est révélé par les images électroniques, les rayons X et la DSC (Analyse calorimétrique différentielle).

Mulanga et coll.[31] ont substitués le ciment portland par l'addition des cendres volantes et ils ont suivi l'effet de cet ajout sur la résistance es mortiers aux attaques chimiques sulfatiques (les échantillons ont été exposé à une solution de 5%  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{SO}_4$ . Ils ont trouvé, après 84 jours d'immersion, que les expansions des échantillons de mortiers contenant 30%, 40% et 50% de cendres volantes sont inférieures à l'expansion du mortier témoin mesurée selon la méthode de Wittekindt).

Selon l'étude de Torres et coll.[32], l'incorporation des fillers calcaires comme substitution au ciment sans ajout a affecté négativement la résistance au sulfate de magnésium des éprouvettes de mortiers. En augmentons le pourcentage de substitution le prisme de mortier est plus affecté par rapport au prisme contenant du ciment sans ajout. Selon Torres

Turanli et coll.[33] ont étudié l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Turquie sur la résistance à l'attaque des sulfates combinée à un ciment

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriété mécanique et durabilité du mortier***

hydraulique. Dans leurs travaux, ils ont suivi l'expansion (selon ASTM C1012) des barres de mortiers composées à partir des 4 combinaisons suivantes :

- PC (ciment Portland) ;
- BC35 (70 % ciment portland+30 % pouzzolane) ;
- BC45 (55 % cimentportland + 45 % pouzzolane) ;
- BC55 (45 % cimentPortland + 55 % pouzzolane).

Une étude expérimentale de S.T. Lee et coll. [34] a montré que la fumée de silice substituée a une partie de ciment à un effet bénéfique sur la perte en résistance dû à l'attaque par les sulfates. L'incorporation de 5 à 10% de la fumée de silice comme substitution au ciment donne de meilleurs résultats de la résistance de la pâte de ciment durcie dus à l'attaque des sulfates.

Turker et coll[35], ils ont trouvés que l'ajout de la fumée de silice améliore les caractéristiques de la longévité du béton.

Rebih ZAITRI [36] ont étudié d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser des BHP formulés à base de matériaux locaux de la région de Laghouat (Algérie). Les matériaux locaux valorisés sont des additions minérales, calcaires et siliceuses, obtenus respectivement par tamisage de déchets de concassage et par broyage fin de sables de dunes.

Il a été montré notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (5% de SDB et 5% de FC) puis diminue pour des pourcentages plus élevés. Les résultats trouvés montrent aussi qu'il est possible d'obtenir des bétons à hautes performances de bonne ouvrabilité grâce à l'ajout des fines calcaires et de fines siliceuses.

## 1.10 Conclusion

Puisque les matériaux à matrice cimentaire sont poreux, la plupart des phénomènes physiques et chimiques, associés à des agressions chimiques externes sur une pâte de ciment, s'effectuent par l'intermédiaire de cette porosité.

L'étude bibliographique menée nous a permis de définir avec exactitude que L'ajout des additions minérales actifs (telles que les cendres volantes, pouzzolane naturelle,...) a un apport bénéfique sur les propriétés de durabilité des mortiers et bétons réalisés à base de ciments avec ajouts. Ces ajouts présentent un remède efficace pour les différentes dégradations des bétons, à savoir une meilleure résistance aux acides, aux sulfates et à l'eau de mer. La contribution des ajouts minéraux vis-à-vis des attaques chimiques est due à :

- ❖ Réduction de la teneur en chaux et  $CB_{3B}A$  du mélange, suite à la consommation partielle de la portlandite libérée par l'hydratation des silicates du ciment Portland ;
- ❖ L'accroissement de la compacité des hydrates, et réduction de la porosité, ce qui entraînent une réduction de la perméabilité et des coefficients de diffusion. Les additions minérales améliorent la résistance des bétons aux altérations chimiques par la dilution des aluminates la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compacts.

# CHAPITRE 2 : Matériaux utilisés et méthode d'essai

---

## 2.1 Introduction

Dans le but de mettre en évidence le comportement des Mortier à base sable de dune finement broyé en milieux agressifs, et dans le but de mettre en évidence l'influence de l'ajout de sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 km au Nord de Djelfa) sur les propriétés mécanique et durabilité du Mortier Nous avons effectué une série d'essais, chimiques, physiques, minéralogiques dans les laboratoires suivants:

Laboratoire de l'université de Ziane Achour Djelfa.

Laboratoire des LNHC Djelfa

Pour l'étude de la résistivité de ces Mortier vis-à-vis de différents milieux agressifs, nous Avon stenu à garder le même rapport eau/ciment pour toutes les compositions de Mortier (Eau/Liant0.5)Les Mortier composés sont:

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 25% sable de dune finement broyé et 0% fine de calcaire

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 20% sable de dune finement broyé 5% et fine de calcaire

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 15 % sable de dune finement broyé et 10% fine de calcaire

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 10% sable de dune finement broyé et 15% fine de calcaire

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 05% sable de dune finement broyé et 20% fine de calcaire

Mortier : ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 00% sable de dune finement broyé et 25% fine de calcaire

Le but de cette substitution est de modifier la composition minéralogique du liant élaboré à base du ciment Portugal et la variété de % utilisés nous donne la

possibilité de comparer entre les différents composites, ce qui nous permettra d'évaluer l'effet du pourcentage de fines de calcaire naturelle sur les caractéristiques de la durabilité et le comportement des mortier dans de différents milieux agressifs. Les ciments ont subi des essais de caractérisations physiques et chimiques indispensables avant toute étude expérimentale. La plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisés conformément aux normes AFNOR.

## 2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans mortier

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les MO en se basant sur les matériaux locaux suivants :

### 2.1.1 ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment Portland CPA-CEM I 42,5 provenant d'une unique livraison de la cimenterie LAFARGE à M'sila. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude. Ses analyses chimiques et physiques Communiquées par le producteur sont données respectivement par les tableaux 2.1

**Tableau 2.1** : Propriétés physiques des ciments [36]

<b>Caractéristique physique</b>	<b>VALEUR</b>
Masse volumique apparent (Kg/cm <sup>3</sup> )	<b>1130</b>
Masse volumique absolue (Kg/cm <sup>3</sup> )	<b>3100</b>
Surface spécifique du ciment (cm <sup>2</sup> /g)	<b>3917</b>
Consistance normal (%)	<b>27.48</b>
Début de pries	<b>2h 40mn</b>
Fin de pries	<b>3h 23mn</b>

**Tableau 2.2** : Analyse chimique de ciment [36]

Composent	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	L.O.I
Teneur [%]	21.36	4.98	3.63	65.86	2.06	0.93	0.08	0.7 7	0.0 2	2.48

**Figure 2.1** : Ciment utilisé

## 2.1.2 Définition des sables utilisés

### 2.1.2.1 Les sables

On entend par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [37]

Le sable utilisé dans cette étude c'est le sable de oued Mzy Laghouat, pour le mortier à base d'agrégats naturels. (Figure2-2)



Figure 2.2 : Les sables utilisés

### 2.1.2.1.1 Caractéristiques physiques :

Tableau 2.3 : Caractéristiques physiques des sables

Caractéristiques physiques	So
Densité apparente	1.44
Densité absolue	2.54
Degré d'absorption (%)	0.32
Module de finesse (%)	1.06
Équivalent de sable (%) Visuel	70.85
Équivalent de sable (%) piston	70.85

### 2.2.2.1.2 Caractéristiques géométriques :

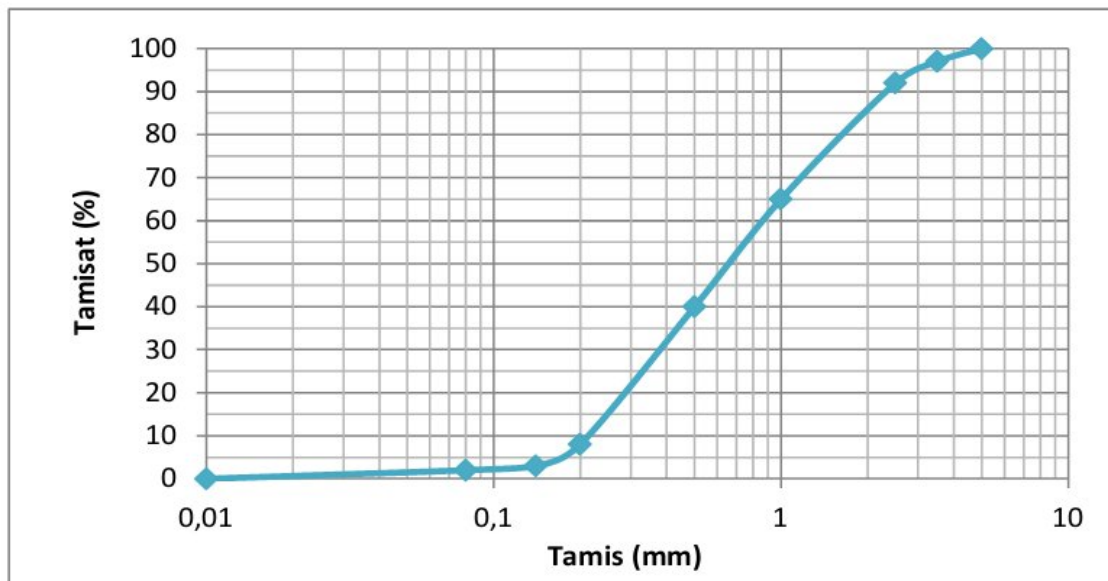


Figure 2.3 : Analyse granulométrique des sables

*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécaniques et durabilité du mortier*



### 2.1.2.2 Sable de dune finement broyé

Il s'agit ici d'un broyage du sable de dune. Le broyage a été réalisé à sec à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité importante. Il a été poussé jusqu'à ce qu'à l'obtention d'une poudre passant au tamis de mailles 80  $\mu\text{m}$ . et propriétés physiques suivantes ; densité absolue de 2,70 densité apparente de 1,20 et surface spécifique de 3950  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Nous avons utilisé un sable de dune finement broyé de la région El Mosrane (40 Km au Nord de Djelfa)



**Figure .2.5:** Le sable de dune avant et après broyage.

**Tableau .2.4:** Analyse chimique du sable de dune finement broyé

Eléments	Sio <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca <sub>3</sub>	MgO	So <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	cl	PAF
(%)	74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

## 2.1.3 Les fines

### 2.1.3.1 Définition

C'est l'ensemble des grains dont la taille maximale n'excède pas 80  $\mu\text{m}$ . Leur présence dans certains bétons est indispensable tel que les bétons à haute performance, pour corriger l'indice de vides du sable, améliorer la cohésion, et limiter le dosage en ciment.

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***



### 2.1.3.2. Les fines calcaires:

Les fines calcaires utilisés sont de couleur blanche et de nature essentiellement calcaire (Tableau 2.5). Elles proviennent de la région de Laghouat obtenues par tamisage au tamis de 80  $\mu\text{m}$  des déchets de concassage d'agrégats calcaires (Figure 2.6).

**Tableau 2.5** : Analyse chimique de fillers calcaires [38]

composant	Sio <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	So <sub>3</sub>	Cl	PAF
Teneur [%]	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3



**Figure 2.6** : Filler calcaire utilisé

Ces propriétés physiques sont regroupées dans le tableau 2.6

**Tableau 2.6** : Propriétés physiques des fines calcaires

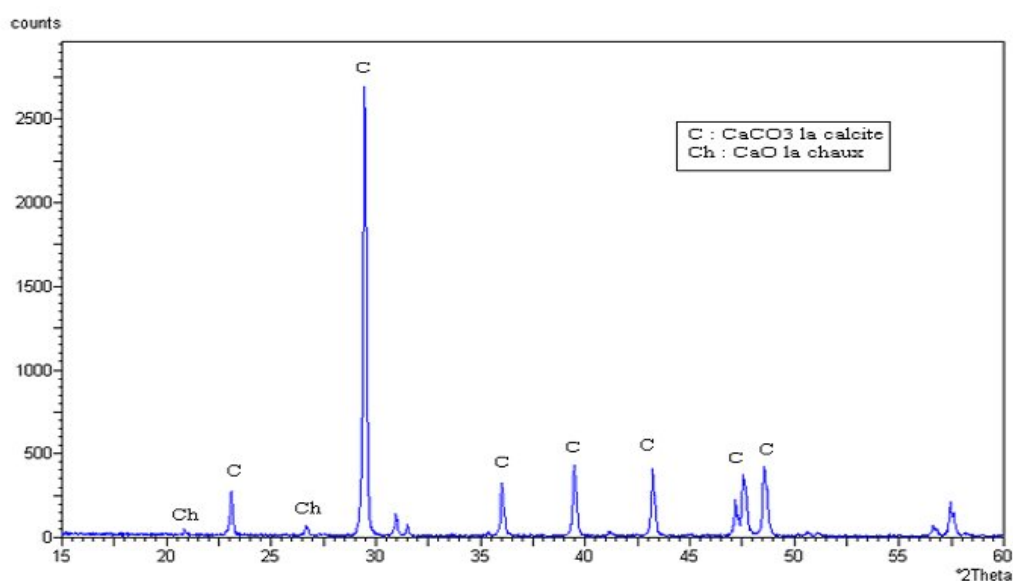
Propriétés physiques	Fine calcaire
La masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.14
La masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.70
Surface spécifique BLAINE SSB (cm <sup>2</sup> /g)	5000

*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier*

L'analyse par diffraction aux rayons X utilisant la méthode des poudres, trouve son principal emploi dans la détermination des minéraux. Chaque corps cristallin produit en effet un spectre ou diffractogramme X qui rend compte de sa structure interne et de la nature des minéraux. On peut considérer que tout diffractogramme X est une sorte "d'empreinte digitale" spécifique, qui permet de distinguer un minéral d'un autre.

A cet effet, nous avons analysé par diffraction aux rayons X les fillers calcaires, pour mettre en évidence sa nature minéralogique. Les analyses ont été faites au laboratoire de physique - Université Amar Telidji Laghouat. La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fillers calcaires. Les résultats de l'essai sont représentés sur la figure II.7 schématisant les différents composants miné-

Ralogiques



**Figure 2.7.** Diffractogramme X des fillers calcaires[38]

La figure 2.7 montre que ces fines calcaires se composent en général de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et de chaux ( $\text{CaO}$ ), ce qui montre que leur nature est essentiellement calcaire.

## 2.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation du béton est l'eau de robinet. Sa composition chimique est illustrée dans le tableau 2-7:

**Tableau 2.7** : composition chimique de l'eau robinet [36]

<i>Composant chimiques</i>	<b>Mg/l</b>	<b>Meq/l</b>
<i>Calcium (ca)</i>	<b>52.70</b>	<b>2.64</b>
<i>Magnésium (Mg)</i>	<b>32.00</b>	<b>2.63</b>
<i>Sodium (Na)</i>	/	/
<i>Potassium (K)</i>	/	/
<i>Chlorure (Cl)</i>	<b>71.00</b>	<b>2.00</b>
<i>Sulfates (So4)</i>	<b>115.14</b>	<b>2.35</b>
<i>Carbonates (Co3)</i>	<b>Néant</b>	<b>Néant</b>
<i>Bicarbonates (Hco3)</i>	<b>170.35</b>	<b>2.80</b>
<i>Balance cations</i>	<b>84.95</b>	<b>5.25</b>
<i>Balances anions</i>	<b>357.02</b>	<b>7.20</b>
<i>Conductivité à 25°C</i>	/	<b>0.72</b>
<i>Résidu sec à 105°C</i>	/	<b>491</b>
<b>PH</b>	/	<b>7.5</b>

## 2.3 Essais réalisés sur le Mortier

Durant notre étude, nous avons réalisé trois familles d'essais pour caractériser les mortiers au Laboratoire

- \* Essais de la résistance à la compression des mortier
- \* Essais de durabilité

### 2.3.1 Préparation des Mortier

#### 2.3.1.1 Méthode de formulation des mélanges

Dans cette étude, on a adopté la même méthode de formulation d'un mortier normal ; la quantité de ciment est fixé à 450 g, est celle de sable et ajouts est fixé à 1350g, le pourcentage de participation massique des fines est varié de 0% à

---

***Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier***

25 % avec un pas de 5% Ce qui nous permet d'étudier l'influence de l'addition d'agents de correction sur les performances physiques et mécaniques des mélanges fabriqués .

Les mélanges étudiés sont désignés par M.S.X.Y :

M : Mortier

S : Sable

X : le type de sable : A désigne un sable alluvionnaire et D un sable de dune

Y : Le pourcentage massique de la participation des fines dans le mélange .

Donne la composition des différentes formulations à examiner dans notre étude  
Compris entre 0.50 Avant d'être utilisé pour les différents essais de compression et flexion, ce mortier est malaxé pendant 3 minutes . Introduire le sable en première dans la cuve de malaxeur ( type Hobart normalisé ) , y versé ensuite de ciment , après ça mettre le malaxeur en marche à vitesse lente . suivantes .

Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 60 S supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant les 15 premières secondes en lever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au Fond

Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 S .

## **2.4 Essais réalisés à l'état durci**

### **2.4.1 Essai de résistance à la compression**

Il est réalisé, conformément à la norme EN 12390-3, sur des éprouvettes de (40x40x160 mm<sup>3</sup>) mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 7 et 28 jours

La machine utilisée pour l'écrasement uni axial des cylindres est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500 kN en compression figure 2.8



**Figure 2.8:** la presse hydraulique de compression pour mortier (Laboratoire des LNHC Djelfa)

## 2.4.2 Essais de durabilité

### 2.4.2.1 Variation de la masse

La variation de la masse des éprouvettes cubiques des bétons de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  conservées dans les deux milieux distinctes, à savoir l'eau douce et la solution de 5 % de chlore de sodium et la solution de 5%  $\text{MgSO}_4$ , a été effectué selon la norme ASTM C267 [39] même suivi comme les démarches des éprouvettes des mortiers conservées a des milieux précédant.

## 2.5 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de bases utilisés dans l'étude expérimentale. Vu les résultats obtenus, ces matériaux sont satisfaisant aux conditions requises pour être utilisés pour la recherche d'un mortier de propriétés rhéologiques et mécaniques acceptables.

# CHAPITRE 3 : Résultats et discussion

---

## 3.1 Introduction

Un béton ou un mortier de bonne composition, bien mis en place et ayant subi un bon traitement de cure, résiste à de très nombreuses actions chimiques. Mais sa résistance à certaines autres n'est limitée. Les dégâts de ces matériaux dus aux sulfates sont certainement connus [40]. Un grand nombre d'acides attaquent toutefois également le béton, alors que certaines solutions légèrement basiques ainsi que de nombreuses combinaisons neutres inorganiques ou organiques sont inoffensives.

Le matériau béton est un composite constitué d'un squelette granulaire et d'un liant, la pâte de ciment hydratée. Cette pâte est un matériau poreux particulièrement ou complètement saturé en phase liquide, la solution interstitielle. Le réseau est composé d'une fraction micrométrique, les pores capillaires, et d'une partie nanométrique, les pores inter lamellaires et inter feuillettes du principal hydrate, le C-S-H issu de l'hydratation des silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$ . Le C-S-H représente, avec la portlandite CH, environ 80 % du volume de la phase solide de la pâte du ciment Portland CEMI [21].

La solution interstitielle est une solution aqueuse en équilibre avec les phases solides, fortement basique (pH environ 13) due à la présence d'ions  $OH^-$  et alcalins, issu de  $C_3S$  et  $C_2S$  mais aussi des sulfates comme  $K_2SO_4$ .

Les altérations chimiques du béton se traduisent essentiellement :

- Par une dissolution de la chaux d'hydratation  $Ca(OH)_2$ , avec une augmentation progressive de la porosité et une accélération du mécanisme de dégradation ;
- Et ensuite par la formation de composés expansifs (en particulier avec le  $C_3A$  du liant hydraulique) détruisant peu à peu le béton [23].

Contrairement à toutes phases solides présentes dans la pâte de ciment, les C-S-H ont une structure et une stœchiométrie variable. L'équilibre physico-chimique est déterminé en fonction des ions en solution, si la composition de la solution interstitielle varie (abaissement de pH), le nouvel équilibre

---

*Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier.* 31

solution/phases solides se traduit par l'évolution de la stœchiométrie et de la structure des C-S-H

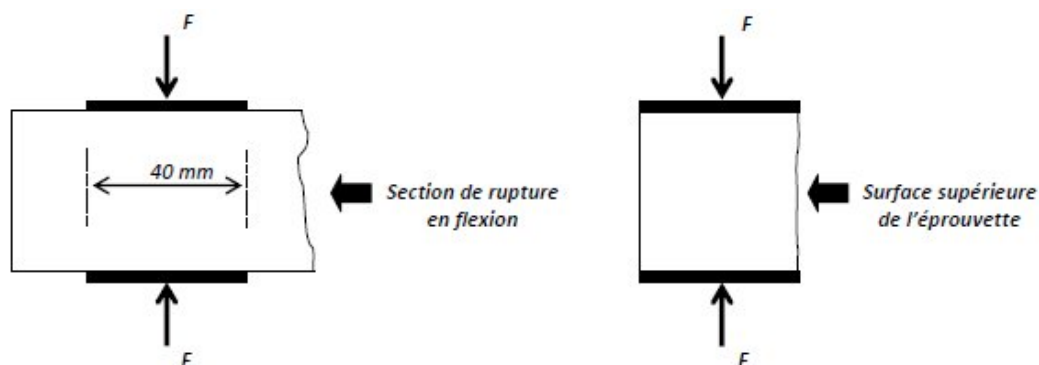
L'effet des milieux de conservation est quantifié en déterminant les pertes de masse selon la norme ASTM C 267-96 aux différentes échéances. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme d'histogrammes :

- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 25% sable de dune finement broyé et 00% fin de calcaire → M 1
- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 20% sable de dune finement broyé et 5% fine de calcaire → M2
- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 15% sable de dune finement broyé et 10% fine de calcaire → M3
- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 10% sable de dune finement broyé et 15% fine de calcaire → M4
- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 05% sable de dune finement broyé et 20% fine de calcaire → M5
- ❖ le ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avec 00% sable de dune finement broyé et 25% fine de calcaire → M6

Cette représentation nous permet de montrer d'une part l'effet de l'ajout du fine calcaire (comme addition inerte) sur la résistance aux agressions acides des mortiers,

### 3.2 Evaluation de la résistance à la compression

La résistance en compression des mélanges étudiés a été mesurée à 7 et 28 jours sur les demi-prismes des éprouvettes obtenus après l'essai de flexion



**Figure 3.1** : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.

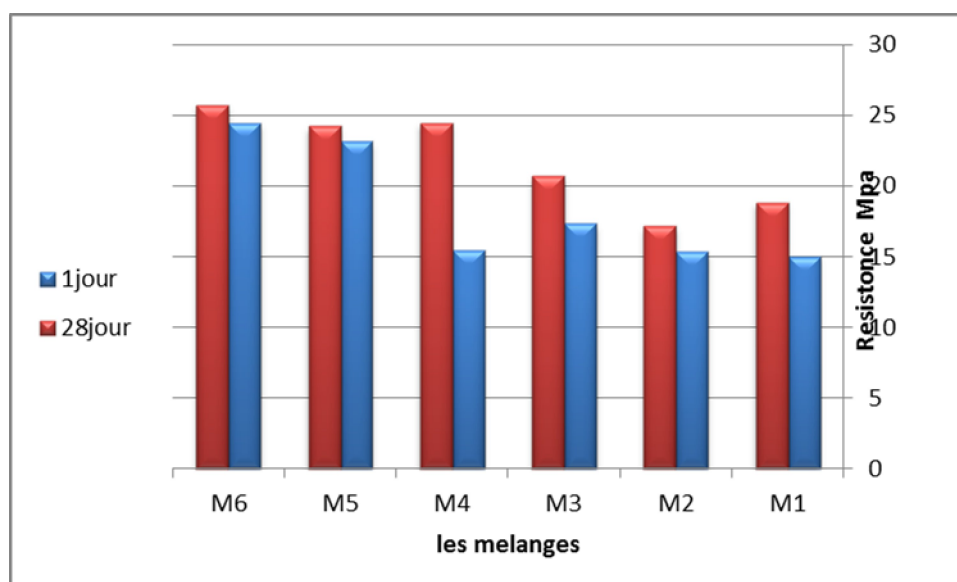
### 3.2.1 Résultats et discussions

#### 3.2.1.1 Résultats :

Les valeurs moyennées de la résistance en compression axiale pour chaque mélange sont regroupées dans le Tableau 3.1.

**Tableau 3.1** : valeurs de la résistance en compression des différentes formulations

Mélanges	Résistances en traction à 7 jours (MPa)	Résistances en traction à 28 jours (MPa)
M 1	15.026	18.816
M 2	15.326	17.166
M 3	17.342	20.686
M 4	15.466	24.44
M 5	23.128	24.207
M 6	24.467	25.702



**Figure 3.2.** Evolution de la résistance en compression des mélanges de mortier



### a. Evolution de la résistance en compression en fonction de la teneur en fines calcaires :

D'après la figure 3.2 on remarque qu'à 7 jours la résistance en compression augmente mais d'une façon peu significative. A cette échéance, la valeur de la résistance en compression la plus élevée correspond au mélange M6 (24.467 MPa), elle dépasse la résistance de la formulation à base de sable de dune (M1) de 35%.

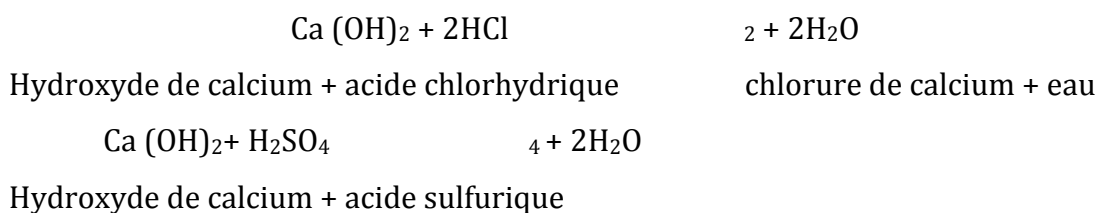
A 28 jours la résistance en compression augmente d'une façon non significative, La résistance en compression ne dépasse pas celle du mélange témoins (M6) qu'à partir de 25 % de fines calcaires. A cette échéance, la résistance en compression la plus grande est celle du mélange M6 (25.702 MPa), elle dépasse la résistance de la formulation à base de sable de dune (M1) de 14% .

Ceci montre l'efficacité de ces fines à l'amélioration de cette caractéristique.

## 3.3 Résultats et commentaires sur les essais de la durabilité

### 3.3.1 Actions des acides

Les acides inorganiques forment avec le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contenus dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau. Concernant les acides inorganiques utilisés dans notre étude, nous avons :



Donc on peut établir qu'un acide est autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. qui donne la solubilité dans l'eau des sels calciques, l'acide sulfurique devrait être relativement inoffensif, (la solubilité : 0.0043g /100ml de  $\text{H}_2\text{O}$ ), mais les ions de sulfates jouent en l'occurrence un rôle nuisible.

L'acide chlorhydrique (HCl) sont des acides inorganiques, est un acide organique [41]. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour les bétons et mortiers que les acides organiques.

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium, ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [41]. Les acides organiques attaquent également le béton, en transformant le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en sels facilement à difficilement solubles. Le troisième acide utilisé dans notre étude est un acide organique qui forme avec l'hydroxyde de calcium de l'acétate de calcium très difficilement soluble dans l'eau.



Hydroxyde de calcium + acide acétique

Des éprouvettes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  sont utilisés pour l'évaluation de la résistivité des mortiers confectionnés à base de ciment Portland CPA-CEM I 42.5

Après 28 jours de cure sous l'eau, les échantillons sont immergés séparément dans des solutions chimiques: 5 % acide chlorhydrique (HCl)



**Figure 3.3 :** Mortiers immergés dans la solution acide.

La variation du poids des éprouvettes est examinée après 1, 7, et 28 jours. Les solutions chimiques sont renouvelées tous les 7 jours, la procédure de l'essai est menée selon la norme ASTM C 267-96. Le jour de l'examen, les parties attaquées

du mortier et/ou composites sont nettoyées avec de l'eau, puis on laisse les échantillons sécher pendant une demi-heure du temps avant la pesée (Figure 3.4).



Figure3.4 : Pesée des échantillons. Balance de précision 0.01g.

### 3.2.1.1 L'effet de l'ajout de sable de dune finement broyé et fine de calcaire

La figure3.3 montrent l'évolution de la perte en masse des mortiers M 1, M2, M3, M4, M5, M6 immergées respectivement dans les solutions agressives acides 5 % HCl,

- *L'effet de HCl :*

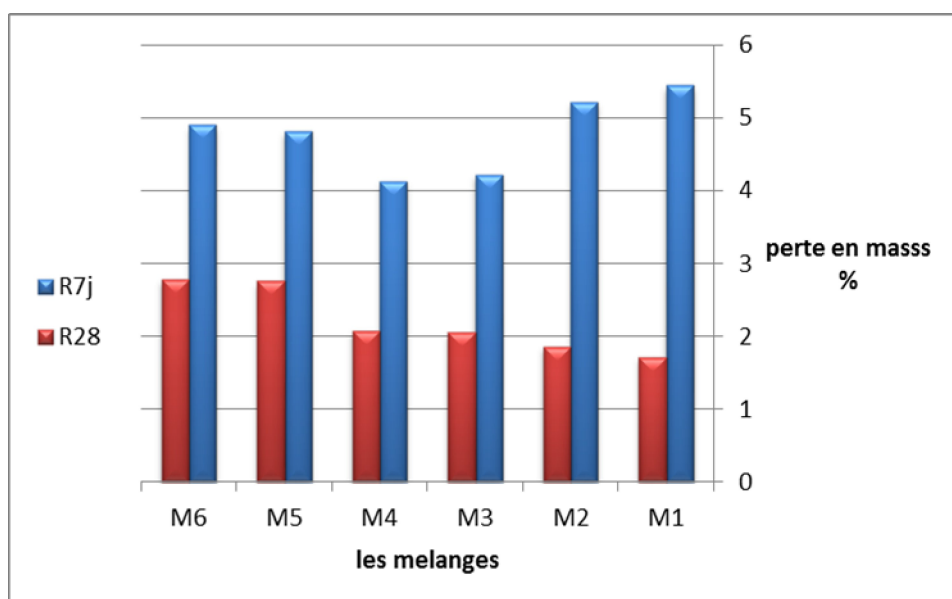
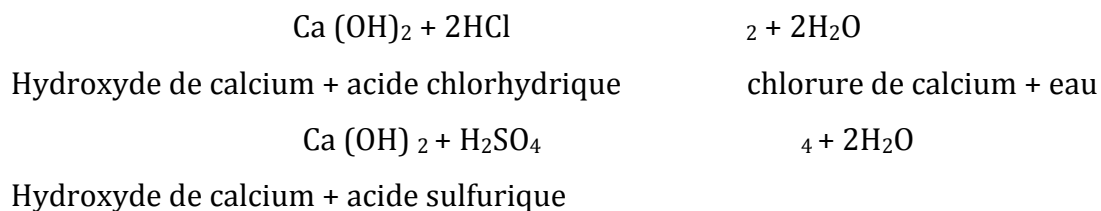


Figure 3.5 : Variation de la perte en poids en fonction de la période D'immersion en 5% HCl

**Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécaniques et durabilité du mortier**

La figure 3.5 montre l'évolution de la perte de masse des mortiers M1, M2, M3, M4, M5, M6 en fonction de la période d'immersion dans une solution acide de 5 % HCl.

Les acides inorganiques forment avec le  $\text{Ca(OH)}_2$  contenus dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau. Concernant les acides inorganiques utilisés dans notre étude, nous avons :



Donc on peut établir qu'un acide est autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles, qui donne la solubilité dans l'eau des sels calciques, l'acide sulfurique devrait être relativement inoffensif, (la solubilité : 0.0043g /100ml de  $\text{H}_2\text{O}$ ), mais les ions de sulfates jouent en l'occurrence un rôle nuisible.

- **Lexème Visual :**

La figure 3.5 montre l'état d'un échantillon de mortier de ciment Portland CPA-CEM I 42.5 avant son immersion dans la solution agressive, et la figure 3.6 montre le changement du volume des échantillons du ciment Portland CPA-CEM I 42.5 soumis aux différents types d'attaques : solution témoin, 2<sup>ème</sup> rangée solution HCl, et. La Figure 3.7 montre l'effet de l'attaque acide des échantillons immergés respectivement dans les solutions 5 % HCl pendant 28 jours.



**Figure 3.6 :** Etat d'échantillon avant immersion dans la solution acide**Figure 3.7 :** Etat des éprouvettes après immersion de 28 jours dans Solutions : témoin, 5 % HCl**Figure 3.8 :** Etats d'échantillons immergés pendant 28 jours Dans 5% HCl

### **3.4 L'action des solutions sulfatiques :**

Afin d'évaluer la résistivité des différents mortiers envers l'attaque aux sulfates. Les éprouvettes sujettes de ces essais ont été conservées dans des bacs en plastique contenant séparément, de l'eau douce, et une solution de 5 % c Les solutions de sulfates sont obtenues on dissolvant les sulfates poudres dans de l'eau distillée comme le montre la Figure 3.9



**Figure 3.9** : Immersion d'éprouvettes en solution de 5%  $MgSO_4$ .

Les types de tests sont effectués sur les spécimens de mortiers conservés dans les milieux, ces tests sont :

- Suivi de l'évolution de masse des éprouvettes ;

Ces tests de contrôle sont effectués à l'âge de 7 et 28 jours après leur immersion totale dans les modes de conservation (milieu témoin 5 %  $MgSO_4$ ), tout en corrigeant continuellement la concentration des milieux sulfatique

#### **\*l'action du $MgSO_4$**

Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium, ceci est dû à sa double action qui se traduit par :

a) Formation de la brucite :

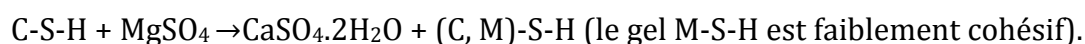


L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du  $MgSO_4$ , peut être expliquée par la formation de la brucite ( $Mg(OH)_2$ ), qui est un produit très peu soluble. Ce produit n'est pas présent dans le cas des attaques par le sulfate de sodium.

b) Formation de l'étrangéité secondaire à partir du  $C_3A$  anhydre résiduel :



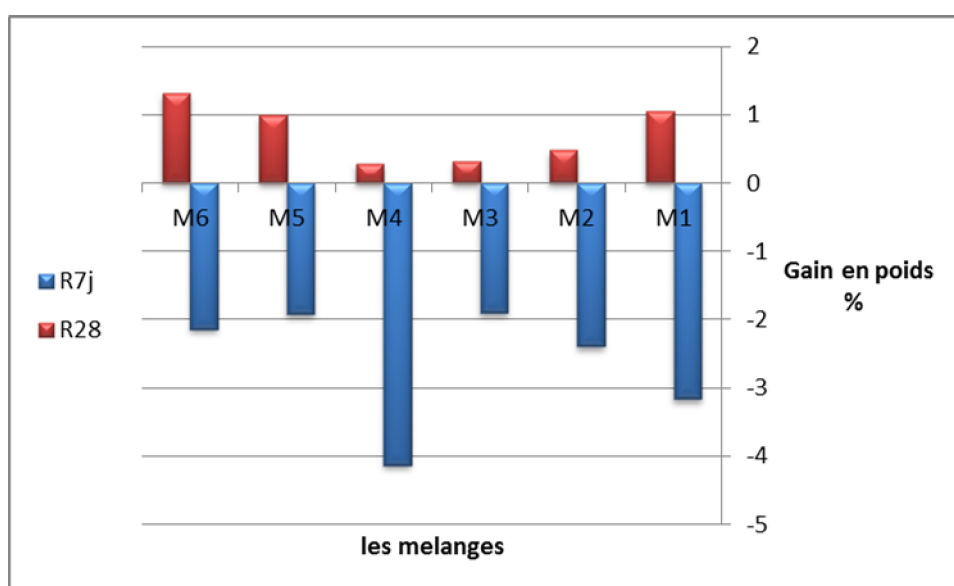
c) substitution des ions  $Ca^{++}$  par les ions  $Mg^{++}$  dans les C-S-H :





les analyses DRX effectuées sur des échantillons de mortiers attaqués par le sulfate de magnésium, chapitre V, montre la présence de la brucite sur la surface des mortier conservé en solution de sulfate de magnésium.

Ceci est en accord avec les résultats de recherches de Yeginobali et Dilek[25] qui ont évalué la résistance aux sulfates de deux types de fumées de silice des fours du Ferro silicium (FeSi) et de silico Ferro chromium (SiFeCr) en utilisant deux méthodes d'essai ASTM C 452 (mesure de l'expansion des barres de mortiers) et ASTM C1012 (mesure de changement de longueur des barres de mortier). Ils ont utilisé des spécimens de mortiers qui ont été immergés séparément dans des solutions de 8.4 % de  $MgSO_4$ . Après avoir été soumis aux changements de masse périodiques, ces spécimens ont été testés à la compression à l'âge de 60 semaines pour évaluer leur détérioration relative vis-à-vis des spécimens gardés dans l'eau. Ils ont trouvé que les spécimens contenant la fumée de silice ont eu un plus petit changement de masse. Dans les spécimens immergés dans la solution  $MgSO_4$  la perte de masse s'est produite presque au début. L'addition de la fumée de silice a augmenté les pertes de masses.

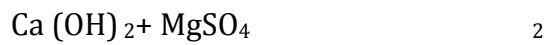


**Figure3.10** : Variation de la masse en fonction de la période D'immersion en 5 %  $MgSO_4$ .

La Figure3.10 montre l'évolution de la perte de masse des mortiers M1, M2, M3, M4, M5, M6 en fonction de la période d'immersion dans une solution de 5 %  $MgSO_4$

Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium, ceci est dû à sa double action qui se traduit par :

a) Formation de la brucite :



L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du  $\text{MgSO}_4$ , peut être expliquée par la formation de la brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), qui est un produit très peu soluble. Ce produit n'est pas présent dans le cas des attaques par le sulfate de sodium.

### 3.4 Conclusion

Les différents résultats et interprétations soulevés dans ce présent chapitre nous a conduit à donner les constatations suivantes:

- \* L'ajout de 25% de fines calcaires résulte une résistance en compression dépasse celle du mélange témoins (M1) de 29%, %. Ce qui reflète l'efficacité des fines utilisées.
- \* L'introduction de l'addition de sable de dune broyé dans le ciment (en substitution) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Cette étude a été menée afin d'évaluer la possibilité d'utiliser des fines calcaires pour améliorer un sable de dune broyé de la région de Djelfa, et le valoriser dans le secteur du bâtiment. Sur la base des résultats du programme expérimental réalisé, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- la résistance à la compression de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute. Ainsi, on remarque que la vitesse d'évolution de la résistance est proportionnelle au taux du sable de dune broyé et fines de calcaire substituée au ciment.

- L'effet des ajouts minéraux sur la maniabilité des mortiers frais positif on a remarqué une amélioration pour la sable de dune baryon et fine calcaires, amélioration très comparativement à celle du mortier témoin.

- Bien que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers est réduite par augmentation de la fine de calcaire , elle s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme (28j). Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme.

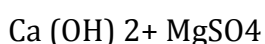
L'incorporation de 25% des fillers calcaires, 00 % de sable de dune broyé, un effet très efficace sur la résistance de compression en fonction de temps par rapport à celle du témoin, la résistance est faible aux jeune âges par contre

- la résistance à la compression au jeune âge des mortiers est réduite par diminution de fine de calcaire , elle s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme (28j).

Pour la durabilité on constate que la variation du masse du milieu sulfatique on peut expliquer comme :

- Le sulfate de magnésium est très agressif ,ceci est dû à sa double action qui se traduit par

-Formation de la brucite :



La brucite est caractérisée par une faible solubilité et un pH faible.

- L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du  $MgSO_4$  peut être expliqué par la formation de la brucite ( $Mg(OH)_2$ ), qui est un produit très peu soluble.

- Concernant la durabilité, on a remarqué que l'ajout sable de dune a diminué l'absorption capillaire des mortiers par son effet physique. Par contre pour le fine de calcaires n'ont pas amélioré l'absorption cela est dû à l'effet retardé de ces derniers (l'essai est effectué à 28 jours).

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[1]. A.KOMAR, « matériaux et éléments de construction », troisième édition MIR pages ; 1 à 56. Moscou (1976).

[2]: JACQUES BARON, RAYMOND SAUTEREY « le béton hydraulique » page ; 39 à 56. (1982).

[3]: B. C. BENI-REMOUR., « Matériaux pouzzolaniques Etude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane », Thèse de fin d'étude Ingéniorat, USTO, Encadreur Mr Khelafi, A (1993).

[ 4 ] : M. PAARADAKIS « les industries, leurs productions, leurs nuances »; (1975).

[5]: P. LONGUET L. BURGLIN A. ZELWER. La phase liquide du ciment hydraté, 1974. Publication technique CERILH n\_219, (1974).

[6] J.H. THOMASSIN M. REGOURD P. BAILLIF J.C. TOURAY. Etude de l'hydratation initiale du silicate bi calcique par spectrométrie de photoélectrons. Compte-Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 290 : 1-3, (1980).

[ 7 ] : REGOURD, M. « Structure et comportement des hydrates des ciments ». 7<sup>ème</sup> congrès Int. Chimie des Ciments. Paris : Septima., Vol IV, PII-89, 6p,(1980).

[8]: C. CARDE R. FRANCOIS J.M. TORRENTI. Leaching of both calcium hydroxyl de and C  
Cement and Concrete Research, 26(8): 1257-1268, (1996).

[9]: S. KAMALI. Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à de différents ciments dans différents environnements. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Février 2003.

[ 10 ] M. PAARADAKIS « les industries, leurs productions, leurs nuances »; (1975).

[ 11 ] : E. EL'ALFI, & H. El'Didamouny, "Addition of limestone in low heat Portland cement" Ceramics-Silikaty, Vol, 44, N° 03, pp. 109-113, (2000).

[ 12 ] : M. VENUAT, « la pratique des ciments, mortiers et bétons : Tome1  
Caractéristiques des liants et des bétons mise en œuvre des coulis et mortiers »,  
Deuxième édition, Collection Moniteur, p 277 (1989).

- [13]: R. SERSALE, « Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » Sous thème VI-1 7<sup>ème</sup> Congés International de la chimie des ciments. Volume 1, Paris, (1980).
- [14]: H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, « Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201, Jan-Fév. 1996.
- [15] P. C. AITCIN, C. Jolicoeur et J. McGregor, « Super plasticizers: how they work and why they occasionally don't », Concrete International, 16(5) mai45-52, (1994).
- [16] A. DUREKOVIC, B. Tkalcić-Ciboci, « cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the polymerization of silicate anions in presence of a superplasticizer and silica fume. Ciment and Concrete Research 21(6), pp, 1015-1022, (1991).
- [17] P. C. AITCIN, « Sur les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte Thomas et leur utilisation dans les mortiers en bétons », Revue des matériaux de construction, pp 185-194, Mai 1968.
- [18] P. C. AITCIN, C., F. Autefage., A. Carles-Gibergues., A. Vaquier., « comparative Study of the Cementation properties of different Fly Ashes », ACI SP-91, pp. 91-114, (1986).
- [19] : A. MEBROUKI, « Influence de la pouzzolane de Béni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers », Thèse de Magistère, Université de Mostaganem, Encadreur Mme : N. Belas, Juin 2003.
- [20]: JACQUES BARON, RAYMOND SAUTEREY « le béton hydraulique » page ; 39 à 56. (1982).
- [21] : ALI AICHOUBA. A., « Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » thèse de Magister, encadreur Mr Benaissa. ; IGCMOran (2005).
- [22] I. JANOTKA., "The influence of zeolitic cement and sand on resistance of mortar subjected to hydrochloric acid solution attack", Ceramics-Silikaty, Vol. 43, N° 2 pp 61-66, (1999)

- [23]S. SAYAMIPUK. , “Strength and durability of mortars containing métakaolin from Thailand”, PhD Thesis School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, pp 201, (1999).
- [24]D. M. ROY. P. Arjunan & M. R. Silsbee, “ Effect of silica fume, and low- calcium fly ash on chemical resistanceof concrete”, Cement and concrete Research, Vol. 2, pp 1809-1813, (2001).
- [25]YEGINOBALI. A., and F.T. Dilek, « Sulfate resistance of mortars containg Silica Fume as evaluated by different methods”, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Naturel Pouzzolans concrete, Proceeding, Fifth International Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA, Vol. 2 pp 795-813 (1995).
- [26]A. M. Neville: « Behavior of concrete in saturated and weak solutions of magnesium sulphate or calcium chloride », J. Mat, ASTM, 4, No, 4, pp 781-816, Dec. 1996.
- [27]M. O’FARRELL. S. Wild and B. B. Sabir “Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar. Part 1:Sodium sulphate solution”, Cement and concrete Research, Vol. 29,pp. 1781-1790, (1999).
- [28] L. Krajci., , “Utilization of natural Zeolite in Portland Pouzzolan cement of incresed sulfate resistance”, In durability of concrete, Proceeding, Fifth International Conference, Barcelone, Spain, Vol.1, pp 223-236, (2000).
- [29]Paul J, Tickalsky, Della Roy, Barry Sceetz, Tara Krize: « Redefining cement characteristics for sulphate-resistant Portland cement », Cement and Concrete Reseache 32, 2002, pp, 1-8.
- [30]S. A. Hartshorn, J.H. Sharp, R.N. Swamy: “The thaumasite form of sulphate attack in Portland limestone cement mortars stored in magnesium sulphate solution”, Cem, Conc, Res, 24, pp 351-359 (2002).
- [31]: D.M. Mulenga, J. Stark, P. Nobst “Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash”, Cement & Concrete Composites 25, pp 907-912, (2003).
- [32]: S.M. Torres a,b, J.H. Sharp c , R.N. Swamy b, C.J. Lynsdale a, S.A. Huntley “ Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to

- magnesium sulfate attack”, *Cement & Concrete Composites*, N° 25, 947–954, (2003).
- [33]L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas “Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended” cements *Cement and Concrete Research*, (2004).
- [34]S. T. Lee, H. Y. Moun, R. N. Swamy: « sulphate attack and role of silica fume in resisting strength loss », *Cem. Conc. Composites*. Vol. 27 (2005), pp 65-76.
- [35]Fikret Turker, Fevziye Akoz, Sema Koral, Nabi Yuzer: “Effects of magnesium sulphate concentration on the sulphate resistance of mortars with and without silica fume”, *Cem, Conc, Res*, Vol.27, No, 2, 1997, pp 205-214
- [36]rebih zaitri ., « effet de l’ajout de calcaire et de sable de dune broyés sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons à hautes performances » thèse de doctorat Université Amar Telidji Laghouat 2015
- [37]ben Brahim Oussama ., « Durabilité des Béton auto placent à base sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques » Ingénieur d’Etat en génie civil, thèse de Master, Option :Géo-Matériaux ,Université zaine achoune de djelfa 2016.
- [38]CHAUVIN, J.J .Les sables : guide technique d’utilisation routière. ISTED, 76p.France, 1987
- [39] ben fettacha Mohamed ., « COMPACITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS AUX DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES » Ingénieur d’Etat en génie civil, thèse de Master, Option :Géo-Matériaux ,Université zaine achoune de djelfa 2016.
- [40]YASSINE SENHADJI., «L’influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers visvis des attaques chimiques (acides sulfuriques) »Ingénieur d’Etat en génie civil, thèse de Magister, Option :Géo-Matériaux, Université des Sciences et de Technologie Med Boudiafd’Oran Algérie 2006.
- [41]Hermann. K. « Dégâts des bétons dus à l’agression des ions de sulfates », *Bulletin du ciment* 60 [4], pp 1-8 (1992).
- [42]: *Bulletin du ciment* n° 12, « substances exerçant une action chimique sur le béton » Suisse (1995).