



Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté au

Département : des Sciences Technologiques

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique & Matériaux

Réalisé par

NAAM KHEIRA & ZIANE HANNAN

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Intitulé

*Effet de fines calcaires sur la durabilité des bétons
dans des milieux agressifs*

Soutenue le : 27/06/2016

Devant le jury de soutenance composé de :

Mr. ZERGUINE A

MA A

Univ. Djelfa

Président

Dr. REBIH ZAITRI

MC B

Univ. Djelfa

Encadreur

Mr. FODIL DIF

MA A

Univ. Djelfa

Examineur



Remerciement

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 ZAITRI.R et la concadreur Monsieur DIF.F pour les orientations et les conseils qu'ils ont su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.

Nous voudrions remercier tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation et particulier le professeur(RABHI).

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.

Un grand merci à nos deux chères familles(Naam & Ziane)

Dédicace

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

NAAM KHÉIRA :

À mes très chers parents (Massaoude-Rebíha).

*Et mes frères(mohamed,hamide,omar,aymane)
et mes soeurs sirtou (Kaltoum-Karima)*

À mes deux familles : La famille Naam.

La famille Haouari .

*À tous mes amis .Surtout : hanane zamouki,wafa,oumelkheir,sihem,fatima,zineb
,taibi anouar,boudana elhadi*

À mes chère HAOUARI AICHA

Ziane hannane :

À mes très chers parents (Attia-bakhta).

A grande mère (araba yamina)

Et tous ma famille sirtou mes frères et mes soeurs

À tous mes amis : bachir,fatna,walide,ALI,AICHA,JAWHAR.

Résumé :

L'objectif principal de ce travail expérimental est d'étudier la valorisation de fines calcaires sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du béton (variation de la masse) dans l'environnement agressif.

Nous avons préparé des échantillons du béton ordinaire avec différentes teneur de fines calcaires de zone de Laghouat comme substituent au ciment.

Grâce à des résultats expérimentaux obtenus, nous concluons que le fine calcaire broyé a un effet positif sur les propriétés mécaniques et l'effet est quelque peu acceptable pour la durabilité du béton .

Mots-clés: durabilité, fine de calcaire broyé, propriétés mécaniques, béton , milieu agressif

Abstract:

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

We have prepared samples of plain concrete with different contents of limestone fillers of zone Laghouat as substitute to cement.

Through experimental results, we conclude that the limestone fillers a positive effect on mechanical properties and the effect is somewhat acceptable for concrete durability .

Keywords: durability , concrete, limestone fillers, mechanical properties, aggressive environment

تعتبر ديمومة الخرسانة للمنشآت الواقعة في الأوساط العدوانية من أهم دراسات الأبحاث الحديثة حالياً.

حيث قمنا بتحضير عينات من الخرسانة تحتوي على نسب متباينة (5%، 7.5%، 10%) لاية .

الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تآكل مادة الـ على الخصائص الميكانيكية () وديمومة الخرسانة (التغير في الكتلة) في البيئة العدوانية.

من خلال النتائج التجريبية المخبرية المحصل عليها لها تأثير ايجابي على الخصائص الميكانيكية وتأثير مقبول لديمومة الخرسانة .

المفتاحية: ديمومة، الميكانيكية، الأوساط العدوانية

Sommaire

Remerciements

Dédicace

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT	ii
.....	iii
SOMMAIRE	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
INTRODUCTION	2
CHAPITRE I :Généralité sur les ciments et la durabilité du béton	5
I.1. Historique	5
I.2. Définition	5
I.3. Ajouts cimentaires	7
I.3.1. pouzzolanes naturelles.....	7
I.3.2. Laitier granulé de haut fourneau	8
I.3.3. Cendre volante	9
I.3.4. Fumée de silice	10
I.3.5. Fillers Calcaires	10
I.3.6. Fillers	10
I.4. Intérêts de l'utilisation des ajouts cimentaires	11
I.4.1. Intérêts techniques.....	11
I.4.2. Intérêts économiques.....	11
I.4.3. Intérêts écologiques.....	11
I.5. Hydratation du ciment Portland avec ajouts cimentaires	12
I.5.1. Hydratation du ciment avec ajout de matériaux pouzzolaniques	12
I.5.2. Hydratation du ciment avec ajout de fillers calcaires	12
I.5.3. Hydratation du ciment avec ajout de laitier	13
I.6. Description des hydrates formés	14
I.6.1. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)	14
I.6.2. La portlandite	15
I.6.3. Les sulfoaluminates de calcium	16
I.6.4. Les aluminates hydratés	17
I.7.Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif..	17
I.7.1. Transport d'ions et réactions de dissolution – précipitation	18
I.7.2. Dégradations des matériaux cimentaires par des attaques sulfatiques	19
I.7.3. Le rôle des ajouts minéraux dans l'attaque par les sulfates	29
I.8. Conclusion	33

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes d'essais	35
Partie II.A. ESSAIS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET DU BÉTON.....	35
II.A.1. Introduction	35
II.A.2. Essais d'identification des matériaux utilisés	35
II.A.2.1. Essais réalisés sur le ciment	35
II.A.2.2. Essais réalisés sur les fines utilisés	39
II.A.2.3. Essais réalisés sur les granulats	40
II.A.2.4. L'eau de gâchage.....	45
II.A.3. Méthodes expérimentales de caractérisation du béton	45
II.A.3.1. Réalisation des gâchées.....	45
II.A.3.2. Confection des éprouvettes	46
II.A.3.3. Mode de cure	47
II.A.3.4. La résistance mécanique	47
II.A.3.5. Variation de masse	48
II.A.4. Méthode de composition du béton	49
partieII.B. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	49
II.B.1. Introduction	49
II.B.2. Résultats de caractérisation du ciment	50
II.B.3. Résultats de caractérisation de la fine calcaire	50
II.B.4. Résultats de caractérisation des granulats	51
II.B.4.1. Les sables	51
II.B.4.2. Les graviers	53
II.B.5. Caractérisation de l'eau	54
II.B.6. Conclusion	55
CHAPITRE III : Résultats et discussions	57
III.1. Introduction	57
III.2. Méthodologie expérimentale	57
III.3. Résultats et discussions	57
III.3.1. Résistance à la compression	57
III.3.1.1. Résistances à la compression des bétons conservés dans l'eau saturée en chaux	58
III.3.1.2. Résistances à la compression des bétons conservés dans l'eau de sabkha	59
III.3.1.3. Résistances à la compression des bétons conservés dans une solution de 5%MgSO ₄	60
III.3.2. Essais de durabilité	62
III.3.2.1. Variation de la masse	62
III.3.2.1.1. Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau à chaux	63
III.3.2.1.2. Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau de sabkha	64
III.3.2.1.3. Variation de la masse des bétons conservés dans la solution 5%MgSO ₄	65
III.4. Conclusion	68
Conclusion générale.....	70
Références bibliographique.....	71

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I : Généralités sur les ciments et la durabilité du béton

Figure I.1: Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre	06
Figure I.2: Vue au microscope électronique à balayage des C-S-H dans une pâte de ciment hydratée [17]	15
Figure I.3: Schématisation de la structure des C-S-H, d'après R. Feldman et P. Sereda[18].....	15
Figure I.4 : de portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O). [17]	16
Figure I.5 : Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite dans un ciment au laitier [12].....	16
Figure I.6 : Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite massive mal cristallisée [14]	22
Figure I.7 : Ettringite secondaire. Recristallisation à partir d'une zone fissurée due à la formation d'ettringite expansive [20]	22
Figure I.8 : Veines d'ettringite remplissant une fissure dans un béton ayant subi une attaque sulfatique. Développement des cristaux perpendiculairement aux lèvres de la fissure [20] ...	22
Figure I.9 : Ettringite massive mal cristallisée, expansive de formation secondaire [20]	22
Figure I.10 : de zonation minéralogique obtenue par DRX et photographie MEB, d'une pâte CEM I (e/c = 0,4) à 12 semaines d'immersion dans une solution de (Na ₂ SO ₄) de concentration 15 mmol/l [19].....	23
Figure I.11 : Échantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif[21].....	24
Figure I.12 : Micrographe d'une pâte dégradée par la réaction avec le magnésium[21].....	24
Figure I.13 : Mécanisme de la formation tardive de l'ettringite[22].....	26
Figure I.14 : Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite différée non expansive dans un pore du béton (1) ; (2) = liant hydraté[20].....	27
Figure I.15 : Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite différée massive expansive et des fissures dans une pâte de ciment après traitement thermique[14].....	27
Figure I.16 : Diffractogramme des rayons X de la thaumasite dans un béton.....	28
Figure I.17 : Micrographe de la solution solide de l'ettringite et de la thaumasite dans une pâte dégradée	28
Figure I.18 : Photo MEB de la thaumasite [20].....	28
Figure I.19 : Analyse au spectrométrie à dispersion d'énergie des cristaux de thaumasite : signale intense en carbone, silicium, soufre et calcium. Signal en aluminium très faible ou absent [20].....	28

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes d'essais

Figure II.1 : Essai de consistance et prise	36
Figure II.2 : Principe de Chatelier	37
Figure II.3 : L'essai de Pycnomètre	37
Figure II.4 : L'essai de mesure la masse volumique apparente.	38
Figure II.5 : Es à vue et Es à piston	42
Figure II.6 : Méthode de l'éprouvette graduée	43
Figure II.7 : Diffraction des rayons X de la fine calcaire	51
Figure II.8 : Analyse granulométrique d sable.....	52
Figure II.9 : Analyse granulométrique des différents types de gravier	54

CHAPITRE III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons dans l'eau saturée en chaux	57
Figure III.2 : Variation de la résistance à la compression des bétons dans l'eau de sabkha.....	59
Figure III.3 : Variation de la résistance à la compression des bétons dans la solution de 5%MgSO ₄	60
Figure III.4 : Variation de la résistance à la compression des bétons à 28 jours	61
Figure III.5 : Evolution de la variation de la masse immergée dans l'eau à chaux	62
Figure III.6 : Evolution de la variation de la masse immergée dans l'eau de sabkha	64
Figure III.7 : Evolution de la variation de la masse immergée dans la solution MgSO ₄	65
Figure III.8 : gain en masse des échantillons du béton à 28 jours	66

LISTE DES PHOTOS :

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes d'essais

Photo II.1 : Ciment CRS utilisé	35
Photo II.2 : Fine de calcaire utilisé	40
Photo II.3 : Les différents granulats utilisés	41
Photo II.4 : La machine Los Angeles	45
Photo II.5 : Malaxeur de béton	46
Photo II.6 : Moules utilisées	46
Photo II.7 : Table vibrante utilisée	47
Photo II.8 : Cure des éprouvettes sous l'eau à chaux	47
Photo II.9 : La presse hydraulique de compression pour béton	48
Photo II.10 : Les éprouvettes immergées dans l'eau de Sabkha	48
Photo II.11 : Les éprouvettes immergées dans la solution de 5% de MgSO ₄	48

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE I : Généralités sur les ciments et la durabilité du béton

Tableau I.1 : Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles selon VENUAT et SERSALE [10] 8

Tableau I.2 : Résistance à la compression des cubes de mortier immergés dans l'eau et dans les solutions de sulfates [24] 30

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes d'essais

Tableau I.1 : Proportions des différents constituants des bétons 49

Tableau I.2 : Caractéristiques chimiques de ciment utilisé 50

Tableau I.3 : Caractéristiques minéralogiques de ciment utilisé 50

Tableau I.4 : Caractéristiques physico- mécaniques du ciment utilisé 50

Tableau I.5 : Caractéristiques physiques des fines calcaires 51

Tableau I.6 : Composition chimique du filler calcaire utilisé. 51

Tableau I.7 : Caractéristiques physiques du sable 52

Tableau I.8 : Caractéristiques physico-mécaniques des granulats..... 53

Tableau I.9 : Analyse chimique de l'eau..... 54

CHAPITRE III : Résultats et discussions

Tableau III.1 : Résultats de la résistance à la compression de béton dans l'eau à chaux 57

Tableau III .2 : Résultats de la résistance à la compression de béton dans l'eau de sabkha 58

Tableau III.3 : Résultats de la résistance à la compression de béton dans une solution de $MgSO_4$ 60

Tableau III.4 : evolution de la masse de béton dans l'eau à chaux..... 62

Tableau III.5 : evolution de la masse de béton dans l'eau de sabkha 63

Tableau III.6 : evolution de la masse de béton dans solution de $MgSO_4$ 65



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est un matériau de construction multi usage, solide et durable, s'il est appliqué selon les règles de l'art. Jusqu'à aujourd'hui, le non-respect des principes fondamentaux concernant le béton et son application est malheureusement la cause de sévère détérioration dans l'industrie du bâtiment. Les coûts de réparation des constructions en béton ont augmenté d'une manière dramatique au cours des 40 dernières années dans tous les pays industrialisés.

La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel le béton va être exposé durant la durée de vie d'un ouvrage. Certains ions, dans un environnement aqueux, peuvent être néfastes pour le ciment hydraté, et par conséquent, pour l'intégrité du matériau béton. Le ciment hydraté, en effet, est poreux et sa porosité est partiellement ou complètement saturée d'une solution dite interstitielle. L'observation de structures en béton dégradées ou des investigations expérimentales en laboratoire a permis de mieux comprendre l'effet de ces attaques chimiques et en particulier le rôle de chaque ion. Ces études ont conduit à proposer des dispositions constructives ou à concevoir des nouveaux matériaux, pour répondre à un objectif de résistance du matériau dans un environnement donné et pour une durée d'exposition définie. Si pour cela la durabilité des ouvrages en béton est une caractéristique très importante, car c'est la garantie d'une sécurité et d'une durée de service accrues de ces ouvrages. Cette durabilité garantie aussi une économie considérable sur le long terme, car de tels ouvrages nécessitera peu ou pas de réparations, d'où une économie de coûts induits par des réparations, qui peuvent être très élevés, et peuvent même dépasser les coûts initiaux de construction. L'élaboration de tels ouvrages doit passer obligatoirement par la maîtrise et la compréhension des facteurs affectant leur durabilité. Cette connaissance permettra de situer les causes pour pouvoir proposer des solutions de prévention adaptées lors de la conception. D'autre part, elle permettra en cas de dégradations, de faire un diagnostic correct pour pouvoir réparer durablement.

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Comme le fine calaire broyé. Nous avons donc utilisé dans cette étude sont disponibles en abondance et la valorisation des matières locaux, Lorsque nous avons réduit la proportion de ciment et compensé avec des degrés de fine de calcaire pour d'étudier la valorisation de sable de dune broyé sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du béton (variation de la masse) dans l'environnement agressif.

2. PROBLÉMATIQUE

Notre étude s'inscrit dans une politique de valorisation des matériaux naturels locaux en Algérie pouvant être utilisés dans la formulation des bétons ordinaires. Depuis ces dernières Années, l'utilisation de l'ajout de calcaire à étudier leur effet sur la durabilité du béton dans des milieux agressifs (variation de la masse et l'évolution de la résistance à la compression de béton) pour résoudre un problème écologique et économique.

3. OBJECTIFS

L'objectif principal de la présente étude est à apporter une contribution à la valorisation des fillers calcaires dans le béton, du point de vue résistance vis-à-vis des attaques chimiques.

4. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Pour atteindre à cet objectif, nous avons partagé le mémoire en deux parties. La première consiste à l'étude bibliographique et la deuxième partie concerne la campagne expérimentale menée dans cette étude.

- **L'étude bibliographique** est consacrée, dans sa première chapitre, à une étude bibliographique orientée autour une généralités sur les ciments et la durabilité du béton utilisés dans le monde., nous présenterons une synthèse sur la durabilité du béton, et surtout l'action des milieux acides et sulfates sur les bétons avec les ajouts cimentaires.
- **La partie expérimentale** contient deux chapitres, le premier comporte les différents essais et les méthodes expérimentales suivis au cours de cette étude pour caractériser les constituants des bétons étudiés. Dans ce chapitre, nous avons présenté aussi les propriétés des ingrédients du béton utilisés, notamment sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et minéralogiques sur les constituants du béton.
- Le dernier chapitre présente la partie expérimentale de notre sujet qui consiste à étudier l'effet de l'ajout de calcaire sur la durabilité du béton. Ce chapitre consiste aussi à faire apparaître les résultats obtenus et de présenter une interprétation et une analyse de ces résultats.
- **Finalement**, nous clôturons cette étude par une conclusion générale qui résume les principaux résultats trouvés.

A decorative graphic of a scroll with a vertical strip on the left side and a horizontal strip on the right side, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre I

**Généralités sur les ciments et
la durabilité du béton**

CHAPITRE I :

Généralités sur les ciments et la durabilité du béton

I.1. Historique :

L'invention du ciment Portland remonte à la première moitié du 19^{ème} siècle: travaux de L. VICAT, France (1818), travaux de J. ASPDIN, Grande Bretagne (1824).

Joseph ASPDIN, un maçon anglais, est généralement reconnu comme l'inventeur du ciment Portland. En 1824, il obtient un brevet pour son produit, qu'il nomme ciment Portland, car une fois durci, il prend la couleur du calcaire extrait des carrières de l'île de Portland. Ce nom est utilisé partout au monde, et nombre de fabricants y ajoutent leur propre nom de marque ou de commerce [1].

La première cimenterie a été construite par J. FROST en Grande Bretagne (1825), d'après les brevets de J. ASPDIN. En 1840, Louis Vicat a fait la découverte des principes d'hydraulicité du ciment Portland dont la cuisson à la température de fusion, soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker. L'industrie cimentière a véritablement pris son essor à partir du milieu du 19^{ème} siècle. Depuis lors, elle n'a cessé de se développer, le ciment étant devenu le principal liant hydraulique utilisé dans le monde pour la confection des mortiers et bétons destinés à l'industrie du bâtiment et du génie civil [1].

En 1904, c'est un français, Le CHATELIER, qui le premier s'intéressa aux différents constituants du ciment et à ses réactions chimiques d'hydratation dans son ouvrage « recherche expérimentales sur les constituants des mortiers hydrauliques» ; traitant les propriétés physico-chimiques du ciment [2].

I.2. Définition :

Les ciments sont des poudres fines, composés essentiellement de silicates de chaux, d'alumine et de fer. L'ajout d'eau au ciment (réaction d'hydratation) permet d'obtenir une pâte, qui rigidifie rapidement par le phénomène de prise en conduisant à en faire un solide. Ainsi, différents composés hydratés se forment au cours de l'hydratation, résultant de la réaction de l'eau avec les différentes phases anhydres constitutives du ciment [2].

Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons car ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, et donc une tenue mécanique du matériau et de la structure en béton. La stabilité des propriétés mécaniques d'un béton repose en grande partie sur la stabilité des hydrates du ciment. Il est donc nécessaire de s'assurer du comportement à long terme du ciment pour garantir celui de la structure en béton [3].

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker à son tour broyé très finement. C'est également lors du broyage qu'une quantité de gypse (3 à 5%) est ajouté au clinker ; le gypse est indispensable à la régulation de prise du ciment. Le mélange passe dans des broyeurs, il est réduit en poudre fine $< 80 \mu\text{m}$; On obtient alors le ciment "Portland". Le produit final (ciment) est stocké dans des silos, en attente de livraison [1].

Le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns (figure I-1) [4].

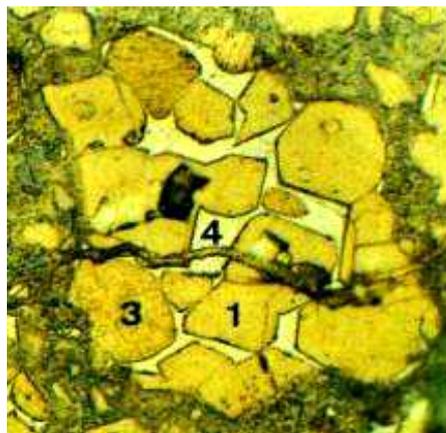


Figure I-1 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO_3) : 1 = C_3S ; 3 = C_2S ; 4 = $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [1].

I.3. Ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux naturels ou artificiels qui, combinés à du ciment Portland, influencent les propriétés du béton durci par action hydraulique, pouzzolanique ou les deux [5]. Ces ajouts minéraux peuvent être mélangés au ciment lors de sa fabrication (ciments composés) ou ajoutés directement dans le malaxeur à béton. Ils sont moins réactifs que le clinker mais d'un coût inférieur, notamment sur les plans énergétiques et environnementaux [6]. Les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), la fumée de silice, les pouzzolanes naturelles et le calcaire en sont des exemples courants.

I.3.1. Pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre [7]. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées comme ajout cimentaire sont [8] :

- Substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée ;
- Argiles et schistes activés thermiquement (calcination).

Les pouzzolanes doivent leurs nom aux cendre volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les romains pour la confection du ciment[8] .

Elles sont composées essentiellement de silice, alumine et oxyde ferrique. Selon la norme ASTM C 618 la somme des trois oxydes doit être supérieure à 70 % [9].

L'oxyde de fer peut être retenu comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puisqu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées [10].

Les pouzzolanes naturelles sont employées en cimenteries pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une attitude à fixer la chaux à la température ambiante et former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation [11].

Le Tableau I-1, présente le domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles selon VENUAT et SERSALE [10].

Tableau I-1 : Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles selon VENUAT et SERSALE [10].

Eléments	Pourcentages	
	D'après VENUAT	D'après SERSALE
SiO ₂	42 ÷ 73	45 ÷ 60
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	14 ÷ 34	15 ÷ 30
CaO + MgO + alcalins	03 ÷ 21	~15
Perte au feu	/	~10

I.3.2. Laitier granulé de haut fourneau :

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir de minerai et du coke métallurgique [11]. La fusion du minerai dans les hauts fourneaux provoque la séparation gravitaire de la fonte liquide (en partie inférieure) et un résidu surnageant, également liquide, appelé laitier en raison de sa couleur claire(lorsqu'il est à température ambiante) [6]. Il sort du trou de coulée à une température, de l'ordre de 1500 C° [11]. À sa sortie du haut fourneau, il est trempé brutalement par déversement dans des bassins remplis d'eau où il se disperse en grains poreux de diamètre 1 à 5 mm : c'est le laitier granulé. Il se trouve donc dans un état thermo-dynamiquement instable (vitreux) et manifeste des propriétés hydrauliques [12]. Sans la trempe, les minéraux cristallisent et deviennent presque insolubles dans l'eau [6].

Le laitier contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25à 30 %), de l'alumine (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie oxydes divers et manganèse [11].

Ce laitier constitue par lui même un véritable liant. Toutefois la prise est trop lente ; aussi pour remédier à cet inconvénient on lui ajoute une base en guise de catalyseur (ex : chaux). Or le ciment Portland libère de la chaux en s'hydratant ce qui montre bien l'intérêt de l'utilisation du laitier comme ajout au ciment Portland [12].

La norme ASTM C 989 classe le laitier selon une échelle ascendante de degrés de réactivité (degrés 80, 100 ou 120). Le degré d'un LGHF est fonction de son indice d'activité, soit le rapport entre la résistance à la compression de cubes de mortier composés d'un mélange à 50 % de LGHF et celle de cubes de mortier incorporant un ciment de référence [13].

La pâte de ciment au laitier durcie présente une moindre quantité de chaux (portlandite), par rapport à celle issue de l'hydratation du ciment Portland seul [6]. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que celle du Portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et retient moins bien l'eau de gâchage [11].

I.3.3. Cendre volante :

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Ce résidu est évacué de la chambre de combustion d'un fourneau par les gaz qui s'en échappent [5]. Pour protéger l'environnement, on filtre ces fumées et on obtient alors une poudre de couleur foncée, principalement formée de particules sphériques vitreuses (dont la taille est comprise entre 1 et 40µm environ). Ces particules contiennent une proportion de silice de l'ordre de 30 à 50 % [6].

La norme ASTM C 618 distingue deux types de cendres volantes, les cendres volantes de classe F et de classe C [9]:

- Classe F: $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70 \%$
- Classe C: $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50 \%$

Les cendres volantes rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 30 %) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker [11]. Elles présentent des propriétés pouzzolaniques et, si elles sont riches en CaO, peuvent également présenter des propriétés hydrauliques. Comparativement à du béton fait uniquement de ciment Portland, le béton contenant des cendres volantes est caractérisé par une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable [7].

I.3.4. Fumée de silice :

Les fumées de silice sont un sous produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles s'élèvent sous forme de vapeur oxydée dans les fours à 2 000 C°, se condensent en refroidissant et sont recueillies dans d'énormes sacs en tissu [7]. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principale, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à 15m²/g [8].

Les fumées de silice ont des propriétés pouzzolaniques, typiquement utilisée dans les applications nécessitant une très grande imperméabilité et un béton de haute résistance [7].

I.3.5. Fillers Calcaires :

Sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation des roches carbonatées (calcite, aragonite, dolomite) qui sont composées principalement de calcite (CaCO₃) et de la dolomite (Mg.Ca (CO₃)₂) [15].

Les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ce qui explique qu'ils aient un effet sur la résistance du béton. En effet, outre un effet de remplissage, ils accélèrent l'hydratation de C₃S, car ils constituent des sites de germination des hydrates [16]. Mais il y a aussi un effet liant dû à une réaction entre le carbonate de calcium et le C₃A. Cet effet sera particulièrement sensible dans le cas des ciments contenant une part importante de ce constituant....cité par [14].

Selon la norme algérienne NA 442, pour utiliser ce produit comme ajout cimentaire, sa teneur en carbonate de calcium doit être supérieure à 75 % en massecité par[14].

I.3.6. Fillers :

Ce sont des farines de roche (calcaire ou siliceuse) naturelles ou artificielles obtenues par broyage [6], agissant principalement, grâce à leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité ...). Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau [11].

I.4. Intérêts de l'utilisation des ajouts cimentaires :

L'utilisation judicieuse des ajouts cimentaires, en plus de conférer au béton des avantages techniques, est souhaitable du point de vue d'économique et écologique.

I.4.1. Intérêts techniques :

L'incorporation des ajouts minéraux comme substitut au ciment Portland a une incidence sur les propriétés du béton frais, ainsi que les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci :

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse) ;
- il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique ;
- il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.

I.4.2. Intérêts économiques :

En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium, son remplacement par des ajouts minéraux réduit la consommation d'énergie qui conduit à amoindrir le prix du ciment pour le coût du combustible [5].

Ainsi, la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation [5].

I.4.3. Intérêts écologiques :

Pour chaque tonne produite de ciment Portland, une composante essentielle du béton, environ une tonne de dioxyde de carbone (CO_2) est émise dans l'atmosphère.

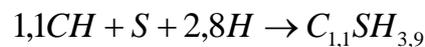
Le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires se traduit par une réduction proportionnelle des émissions de gaz à effet de serre (GES) et par la production d'un béton plus « vert », puisque la fabrication de ce dernier demande moins d'énergie (nécessaire à la fabrication du ciment) et prévient les émissions découlant du procédé de transformation nécessaire (calcination du calcaire). Les autres avantages comprennent l'élimination des résidus industriels de la nature et une réduction de la demande en ressources naturelles (par exemple, moins de calcaire pour fabriquer le ciment) [5].

I.5. Hydratation du ciment Portland avec ajouts cimentaires :

Les principaux produits d'hydratation des ciments composés sont essentiellement semblables à ceux du ciment Portland pur. Cependant, les quantités des différents hydrates sont fonction de la nature et de la quantité des ajouts minéraux. Dans certains cas, de nouveaux produits incorporant des minerais d'ajouts cimentaires peuvent être forméscité par[14].

I.5.1. Hydratation du ciment avec ajout de matériaux pouzzolaniques :

La réaction d'hydratation du ciment incorporant un ajout pouzzolanique (tels que les pouzzolanes naturelles ou artificielles, les cendres volantes et la fumée de silice) se déroule comme suit :



La silice (S) contenue dans les ajouts pouzzolaniques réagit avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C_3S et C_2S du clinker. Cette réaction est dénommée « réaction pouzzolanique ».

La réaction pouzzolanique conduit à la formation de C-S-H, mais d'un rapport C/S voisin de 1, donc plus riche en silice. De plus cette réaction consomme de l'eau : il y a donc compétition avec la réaction d'hydratation du clinker, et cela peut être particulièrement sensible dans le cas d'un E/C faible [6].

La réaction pouzzolanique se déroule lentement, elle se manifeste essentiellement après 28 jours, l'activité pouzzolanique augmente, faisant croître la résistance mécanique et la durabilité....cité par [14].

Enfin, la consommation de portlandite se traduit aussi par une baisse de pH que l'on voudra maîtriser, en générale en limitant la quantité d'addition [6].

I.5.2. Hydratation du ciment avec ajout de fillers calcaires :

L'addition de fillers calcaire au ciment Portland produit plusieurs effets sur le mécanisme d'hydratation....cité par [14] :

- Ces aditions contribuent à l'accélération de l'hydratation de C_3S du clinker proportionnellement à la quantité et à la finesse du carbonate de calcium $CaCO_3$ des fillers. Ils constituent de nouveaux sites de germination de la portlandite à chaque âge. Les C-S-H formées incorpore de quantités significatives de $CaCO_3$ dans leurs structures. Ainsi l'hydratation de C_3S engendre la formation de calcium silico-carbonate dans le cas de la présence de grande quantité de $CaCO_3$.
- La réaction d'hydratation initiale du C_3A est modifiée par l'addition de fillers calcaires au ciment. La formation rapide de calcium carboaluminate hydraté ($C_3A.CaCO_3.11H_2O$) autour de la surface des grains de C_3A crée une barrière empêchant leur hydratation. Ce calcium carboaluminate peut être formé à partir des aluminates de calciums hydratés, hexagonales C_4AH_{13} ou cubiques C_3AH_6 . Et dans le cas de la présence du gypse, premièrement la formation d'ettringite est accélérée suite à la présence de $CaCO_3$. Deuxièmement, dans le cas de la présence de grande quantité de carbonate dans la pâte du ciment, la conversion de l'ettringite en monosulfoaluminate est retardée ou stoppée. Le monocarboaluminate est le produit final d'hydratation de C_3A du ciment avec addition de fillers calcaires.

I.5.3. Hydratation du ciment avec ajout de laitier :

Les laitiers vitrifiés constituent des ajouts de propriétés hydrauliques. Dans le ciment Portland incorporant de laitier, la portlandite libérée par l'hydratation des silicates du clinker vont activer l'hydratation du laitier.

Dans un ciment aux laitiers, le clinker s'hydrate le premier par dissolution du silicate tricalcique pour former des C-S-H recouvrant les grains de clinker, de laitier et de la portlandite. Ensuite la portlandite réagit avec le laitier : on a alors simultanément production de portlandite par hydratation du C_3S et consommation de portlandite par hydratation des laitiers [4].

Le début de l'hydratation des laitiers varie suivant sa réactivité. Elle se traduit, lorsque la teneur en laitier est importante, par une diminution de la teneur en portlandite pouvant aller jusqu'à sa disparition après quelques semaines d'hydratation. Les grains de laitier s'entourent alors d'une zone d'hydrates (C-S-H) compacts moins bien cristallisés et plus riches en MgO

et Al_2O_3 que le C-S-H du clinker hydraté. Pendant ce temps, la solution s'enrichit en aluminates qui précipitent plus tardivement [4].

L'activation sulfatique par le gypse produit dans un premier temps de l'ettringite. Aux échéances tardives (lorsque le gypse est complètement consommé), l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate pour donner ensuite une solution solide entre le monosulfoaluminate et le C_4AH_{13} cité par[14] .

En général, dans des ciments contenant du gypse, les laitiers sont activés aussi par le gypse pour donner du C-S-H, de l'ettringite et de l'hydroxyde d'aluminium comme la mellite ($Al_2[C_6(COO)_6] \cdot 16(H_2O)$) et la merwinite $Ca_3Mg(SiO_4)_2$cité par [14].

On note que, dans tous les cas, le laitier ne conduit jamais à la formation de la portlandite [6].

I.6. Description des hydrates formés

I.6.1. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) :

Le terme C-S-H désigne une famille de silicates de calcium, mal structurés et de stoechiométrie variable, ce qui la distingue dans la pâte de ciment par rapport aux autres hydrates, cristallins, tels que la portlandite [3]. Dans une pâte durcie de ciment Portland, les C-S-H représentent en volume 50 à 60 % des hydrates formés [6].

La formation des C-S-H dans une pâte de ciment peut avoir plusieurs origines. Les C-S-H peuvent être issus de l'hydratation des C_3S ou C_2S et avoir un rapport C/S proche de 1,7 ou aussi bien être issus de la réaction de la portlandite avec les ajouts pouzzolaniques et avoir un rapport C/S plutôt proche de 1,1. Ce deuxième C-S-H est dit pouzzolanique [3].

Les C-S-H ont une structure fibreuse lamellaire, mise en évidence par des observations au Microscope Electronique à Transmission (figure I-2) et illustrée dans le modèle de R. Feldman et P. Sereda (figure I-3). La porosité nanométrique comprend aussi bien l'espace interfeuille des C-S-H que les vides créés par l'empilement parfois irrégulier des lamelles de C-S-H. L'ordre de grandeur de ces pores est de 0,1 à 10 nm. A cette échelle, les effets surfaciques tels que la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tel que le transport diffusif [3].

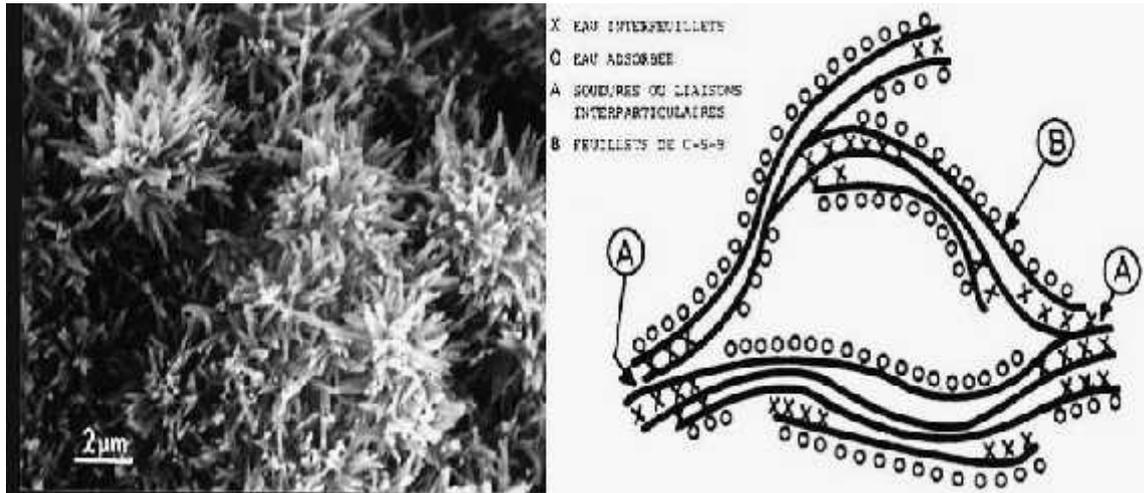


Figure I-2 :
Vue au microscope électronique à balayage des C-S-H dans une pâte de ciment hydratée [17].

Figure I-3:
Schématisation de la structure des C-S-H, d'après R. Feldman et P. Sereda [18]

I.6.2. La portlandite :

La portlandite est un composé cristallin, en forme de plaquettes hexagonales parfois massives, et de formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. Au cours de l'hydratation, les cristaux de portlandite croissent, rejoignent les grains de ciment recouverts de gel de C-S-H et forment ainsi des ponts d'hydrates (voir Figure I-4), facilitant la percolation des phases solides au jeune âge [3]. Elle représente environ 25 à 27 % en volume dans une pâte de ciment durcie ordinaire [6].

L'équilibre chimique de la portlandite dans un milieu cimentaire s'établit à un pH très basique, de l'ordre de 12,4. Ainsi, la portlandite est très sensible à un abaissement du pH de la solution interstitielle et, du fait de sa grande solubilité, se dissout pour compenser le départ des ions calcium lors de la lixiviation par l'eau pure [3].

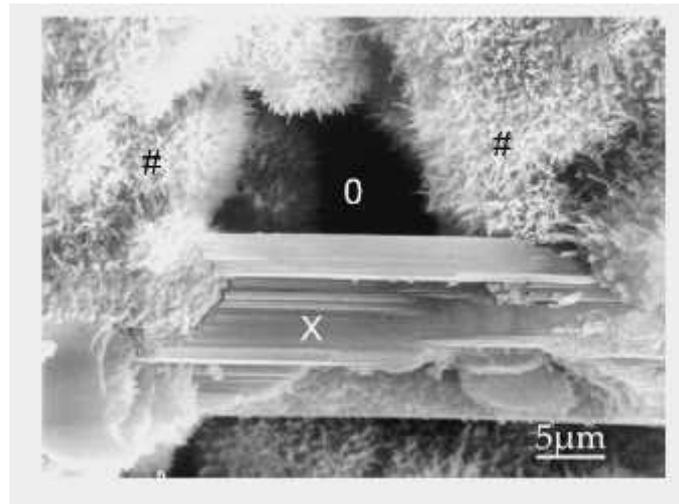


Figure I-4 : Cristal de portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O). [17]

I.6.3. Les sulfoaluminates de calcium :

Sont issus de l'hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A) et de l'aluminoferrite tetracalcique (C_4AF) en présence de gypse. Dans les premiers instants, seule l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium) se forme par précipitation dans le réseau poreux. Des observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence une structure composée de fibres fines et aléatoirement orientées (structure en aiguilles figure I-5).

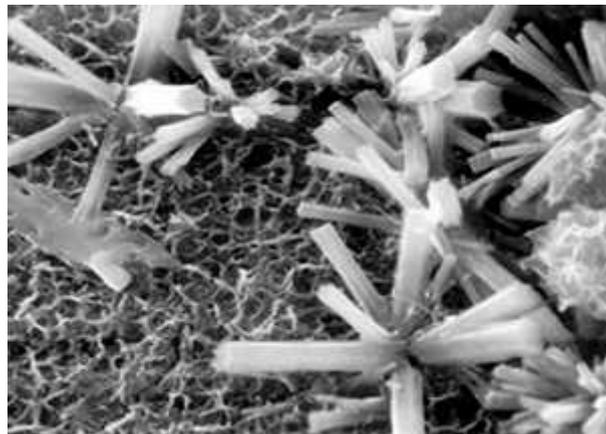


Figure I-5 : Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite dans un ciment au laitier [3]

L'ettringite issue de l'hydratation du ciment est souvent désignée par ettringite primaire [3]. La formation de monosulfoaluminate de calcium intervient plus tardivement dans le

processus d'hydratation et précipite dans les pores suite à l'hydratation du C_3A et à la dissolution de l'ettringite préalablement formé (qui devient vis-à-vis du monosulfoaluminate la source d'ions sulfates lorsque tout le gypse a été consommé) [3].

I.6.4. Les aluminates hydratés:

Les aluminates de calcium hydratés sont fortement liés aux aluminosilicates de calcium. Il existe deux types d'aluminosilicates de calcium stable : la gehlenite hydratée (C_2ASH_8) et une solution solide d'hydrogrenat variant entre l'aluminate de calcium hydraté et l'aluminosilicate de calcium. Ces deux pôles sont C_3AH_6 et C_3AS_3 . En présence de la portlandite, la gehlenite hydratée est instable. Elle réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former de l'hydrogrenat.

Les deux autres formes d'aluminates hydratés qui apparaissent dans le schéma réactionnel d'hydratation (C_4AH_{13} et C_2AH_8) sont des formes métastables et seront remplacées respectivement par C_3AH_6 et la solution solide d'hydrogrenat [4].

I.7. Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif :

Les matériaux cimentaires sont les matériaux les plus utilisés au monde. Ce sont essentiellement eux qui façonnent notre environnement. Voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, édifices historiques, rien n'échappe à leur omniprésence. Comprendre et maîtriser leur mécanique et leur physicochimie constitue l'un des enjeux majeurs du développement durable.

L'une des vertus souhaitées des matériaux cimentaires est la durabilité. La durabilité des matériaux cimentaire comme le béton, est son aptitude à maintenir ses fonctions, par exemple de résistance aux agressions mécaniques et chimiques dans les conditions de son environnementcité par[14].

Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte du ciment. Ainsi, en étudiant l'effet d'un environnement agressif sur un mortier ou une pâte de ciment, on aura une bonne idée de ce qui peut se produire sur un béton contenant ce ciment.

Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieure du matériau solide ...cité par[14].

L'équilibre chimique qui s'établit entre la solution interstitielle et les phases solides environnantes conduit à un pH supérieur à 13 en présence d'alcalins. La différence entre la composition chimique de l'environnement aqueux extérieur et la solution interstitielle est le moteur de mouvement d'ions, majoritairement diffusifs en milieu totalement saturé. Les mouvements d'ions modifient localement la composition de la solution interstitielle et par conséquent perturbent les équilibres chimiques en place. Ceux-ci sont rétablis instantanément par des dissolutions ou précipitations de phases solides [3].

La dégradation de matériau cimentaire résultera des déséquilibres liés au transport des ions de la solution directement au contact avec les phases solides le constituant. A priori, ce transport peut s'opérer par diffusion ou par perméation [4].

I.7.1. Transport d'ions et réactions de dissolution – précipitation :

Au sein d'un milieu poreux, les espèces pouvant se déplacer sont le fluide au sein de la porosité et les ions au sein du fluide. Les principaux mouvements des ions dans la solution interstitielle sont essentiellement diffusifs. Lorsque le fluide est en mouvement, les ions aussi se déplacent par advection. La solution interstitielle dans la porosité peut se déplacer à la suite de gradients de pression ou lors de cycles de séchage/mouillage. Etant donnée la très faible perméabilité des pâtes de ciment, et en conditions saturées, nous pouvons considérer que la solution interstitielle est pratiquement immobile dans le réseau poreux de la pâte cimentaire [3].

Lorsque le milieu est saturé, le mouvement de l'eau par perméation est extrêmement faible en regard de la perméabilité des bétons, et par conséquent cet effet sur le transport des espèces en solution peut être aisément considéré comme négligeable devant les phénomènes diffusifs. En milieu insaturé, il convient par contre de prendre en compte les phénomènes advectifs car le mouvement de l'eau au sein de la porosité n'est plus négligeable [3].

Lors d'agressions chimiques externes, la phénoménologie de dégradation du matériau peut être décrite à partir de deux interactions. On assistera donc aux deux phénomènes consécutifs suivants, chacun doté de sa propre cinétique....cité par [14]:

- Un transport de matière par diffusion, engendré par les gradients de concentrations entre la solution interstitielle de la pâte de ciment et la solution agressive,
- Des réactions chimiques de dissolution-précipitation, provoquées par les variations de concentrations résultant de la diffusion, pour établir un équilibre chimique local.

C'est le phénomène le plus lent qui imposera sa vitesse. Les géochimistes admettent en général l'hypothèse de l'équilibre local, la cinétique de la diffusion étant beaucoup plus lente que celle des réactions chimiques [4].

I.7.2. Dégradations des matériaux cimentaires par des attaques sulfatiques :

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [3]. Parmi de multitude causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les sulfates.

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 anscité par[14].

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé [19].

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même [19].

I.7.2.1. Attaque par les sulfates externes :

Cela fait plus de 70 ans que de nombreuses attaques par les sulfates, présents naturellement dans le sous-sol, ont été constatées sur les fondations d'ouvrages en béton, partout dans le monde recensé en particulier par Mehta qui parle de « corrosion par les sulfates » ...cité par[14]. Ainsi la désintégration du béton en milieu marin est attribuée en partie à la réaction des sulfates avec les hydrates de la matrice cimentaire [19].

L'attaque externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression [19]:

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité du matériau,
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et les ions SO_4^{2-} ,
- Le phénomène d'expansion, résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines, conséquence des deux premiers processus.

L'intensité du mécanisme d'expansion sulfatique va dépendre de la qualité du béton (structure et type de ciment, mode de fabrication, cure, son état d'endommagement avant l'attaque), de l'exposition sur le site (concentration en SO_4^{2-} et sa distribution dans le sol, humidité, opportunités de transport), des conditions environnementales et atmosphériques (changement d'humidité, fréquence des intempéries, température, surface exposée) ...cité par[14].

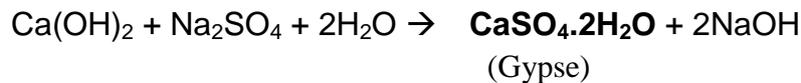
• Mécanismes de base :

Les dégradations dues aux milieux sulfatiques se font selon des mécanismes de base simultanés et interactifs [20]:

- Dissolution des composés calciques du liant hydraté : silicate de calcium hydraté (C-S-H) et surtout la portlandite (CH).
- précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment.

Dans le cas du sulfate de sodium les réactions chimiques se présentent comme suit...cité par [14] :

i) Formation du gypse secondaire :

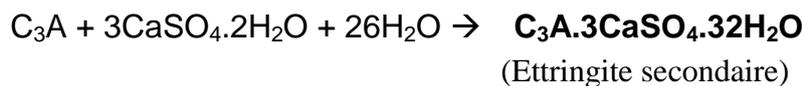


NaOH : Alcalinité élevée -> stabilisation des C-S-H.

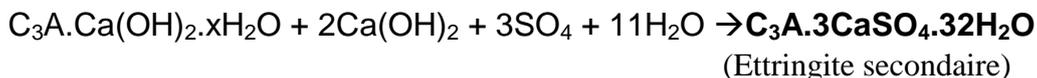
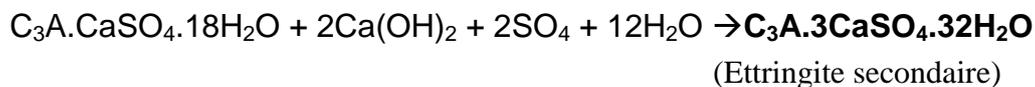
CaSO₄·2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la décalcification de la portlandite CH et le gel C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment...cité par [14].

ii) Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du C₃A anhydre résiduel:



b) À partir des aluminates hydratés:



La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur au volume du solide initial (Figures I-6, I-7, I-8 et I-9).

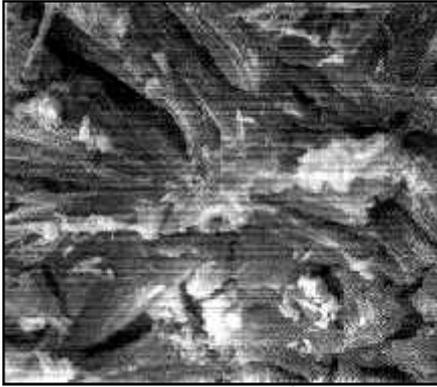


Figure I-6 :
Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite massive mal cristallisée..cité par [14].



Figure I-7 :
Ettringite secondaire. Recristallisation à partir d'une zone fissurée due à la formation d'ettringite expansive [20].

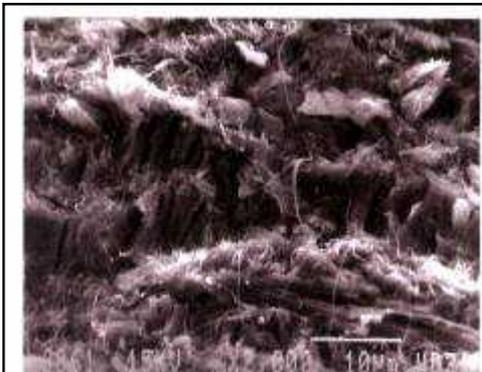


Figure I-8 :
Veines d'ettringite remplissant une fissure dans un béton ayant subi une attaque sulfatique. Développement des cristaux perpendiculairement aux lèvres de la fissure [20].



Figure I-9 :
Ettringite massive mal cristallisée, expansive de formation secondaire [20].

L'emploi conjointement du MEB et de la DRX apporte une information capitale concernant l'état de fissuration, sa localisation et les phases minérales concernées. La superposition des profils minéralogiques issus de l'analyse en DRX et une photographie de MEB (Figure I-10) montrant plusieurs zones [19] :

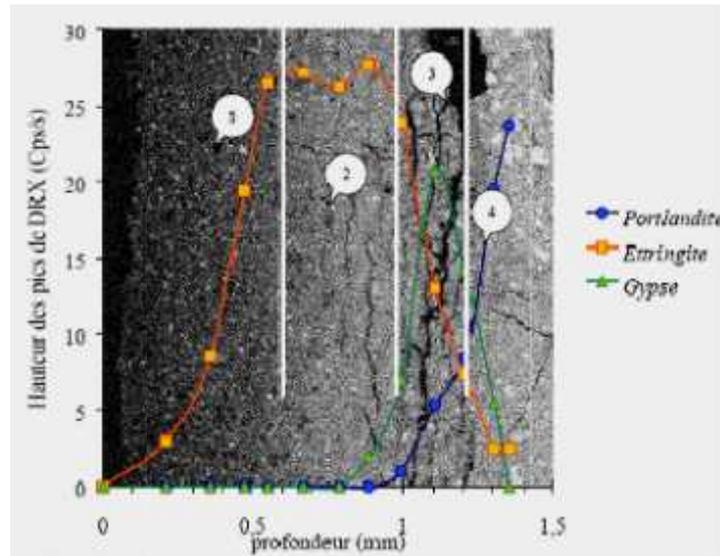


Figure I-10 : Superposition de zonation minéralogique obtenue par DRX et photographie MEB, d'une pâte CEM I ($e/c = 0,4$) à 12 semaines d'immersion dans une solution de (Na_2SO_4) de concentration 15 mmol/l [19].

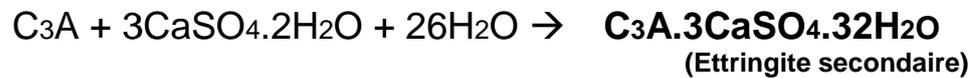
- Une zone en surface très poreuse, la plus proche de la solution d'attaque (en ①), qui correspond à la zone la plus décalcifiée du matériau dégradé chimiquement ;
- Une zone centrale moins poreuse correspondant à la zone de précipitation de l'ettringite (en ②) ;
- Une zone présentant une fissuration parallèle au front d'attaque situé au niveau du pic de gypse (en ③), mais où co-existent aussi ettringite et portlandite. Dans cette zone l'ettringite, même si elle est peu détectée par DRX, est tout à fait présente et peut, en raison de la présence de portlandite, être expansive (AFt massive). Elle favorise ainsi la fissuration dans cette zone ;
- enfin le coeur sain chimiquement est le siège de fissures perpendiculaires au front d'attaque (en ④).

Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature de cation (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium... cité par [14]. Le sulfate de magnésium réagit par double action :

i) En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



Mg(OH)₂ : Brucite (Faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



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



(C,Mg)-S-H: gel faiblement cohésive.

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium (MgSO_4). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4^{2-} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{2+} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite (Mg(OH)_2) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les C-S-H. Le silicate de magnésium hydraté (M-S-H) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [21].

Un échantillon d'un béton ayant subi une attaque par le magnésium, ainsi qu'un micrographe montrant les C(Mg)-S-H sont présentés dans les figures I-11 et I-12, à titre d'exemple [21].



Figure I-11 :
Échantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif [21].

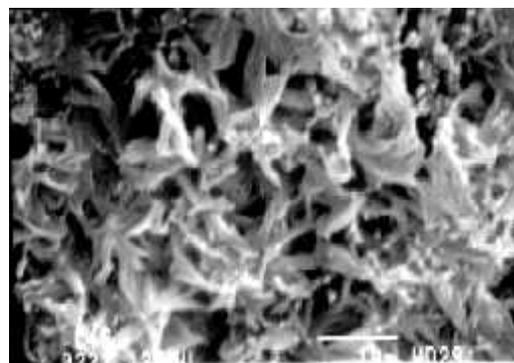


Figure I-12 :
Micrographe d'une pâte dégradée par la réaction avec le magnésium [21].

L'attaque par le sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou CaSO_4 dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive. L'attaque par le sulfate de sodium (très soluble) (Na_2SO_4) entraîne la formation d'ettringite secondaire expansive. Le sulfate de potassium (K_2SO_4) peut aussi être agressif, le rythme d'attaque est similaire à celui du sulfate de sodium. La plupart des sulfates métalliques solubles (FeSO_4, \dots) peuvent être agressifs... cité par [14].

I.7.2.2. Attaque par les sulfates internes :

Une autre forme d'attaque par les sulfates se manifeste lorsque la source des sulfates se trouve dans le béton lui-même. Une quantité limitée de sulfates est toujours présente dans le béton car les sulfates font partie du ciment Portland. D'abord, ils sont présents dans le clinker et par la suite une quantité de sulfates de calcium est ajoutée au clinker lors de son broyage afin de régulariser la prise du C_3A .

Les sulfates de calcium ajoutés au clinker lors de son broyage réagissent avec le C_3A et l'eau pour former de l'ettringite dite ettringite primaire, qui assure donc la maniabilité du béton nécessaire à sa mise en place. Pour accélérer la progression des travaux ou la production dans la préfabrication, un durcissement et une croissance des résistances mécaniques rapides sont souhaitées. La chaleur, que ce soit celle de l'hydratation elle-même ou d'une cure thermique, est un accélérateur puissant. Cependant, lorsque la température du béton dépasse un certain seuil, l'ettringite devient instable. Odler... cité par [14] mentionne qu'à une température plus élevée que 70°C , la concentration des ions SO_4^{2-} dans la solution interstitielle diminue, ce qui cause l'instabilité de l'ettringite primaire (trisulfoaluminate de calcium hydraté AFt) et sa conversion en monosulfoaluminate de calcium hydraté AFm. Il est généralement admis que le seuil critique de l'instabilité de l'ettringite produite lors de l'hydratation des ciments commercialisés se situe autour de 60°C . Au-delà de ce seuil, l'ettringite déjà formée se décompose tandis que la formation de nouvelle ettringite est empêchée. Les ions SO_4^{2-} sont principalement adsorbés sur les C-S-H dont la formation est également accélérée. Par la suite, lorsque la température du béton diminue au-dessous du seuil d'instabilité de l'ettringite, les ions SO_4^{2-} peuvent être relâchés par les C-S-H et former de l'ettringite. Mais dans ce cas, bien que la formation de l'ettringite ait lieu pour la première fois puisqu'elle a été empêchée pendant les premières heures, l'ettringite se forme dans le

milieu confiné de la matrice cimentaire durcie. Les ions SO_4^{2-} adsorbés sur les C-S-H ainsi que ceux des monosulfates présents dans le béton servent de source de sulfates pour la formation de l'ettringite. Ce processus nécessite la présence d'une humidité élevée et peut durer très longtemps. Il est connu sous le nom de formation différée de l'ettringite.

Le schéma de l'approche holistique de Colleparidi [22], est présenté dans la figure I-13 :

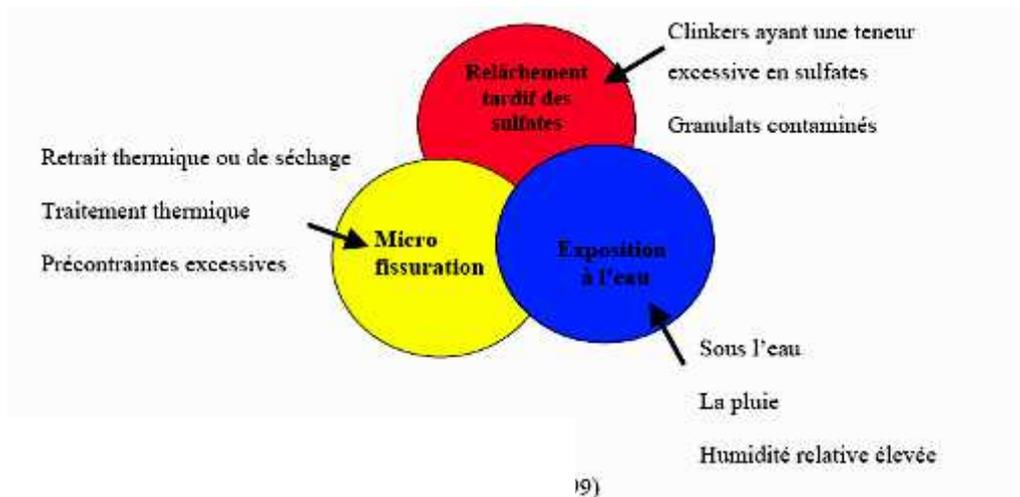


Figure I-13 : Mécanisme de la formation tardive de l'ettringite [22].

Les sources de sulfates pour la formation différée de l'ettringite sont donc ceux adsorbés sur les C-S-H, ceux qui se trouvent dissous dans la solution interstitielle et ceux qui rentrent dans la composition de monosulfoaluminates... cité par [14]. Ces sulfates sont donc uniformément répartis dans la matrice du béton. La formation différée de l'ettringite se fait par conséquent uniformément dans la matrice durcie. L'expansion conséquente se produit lorsque l'espace pour la formation différée de l'ettringite est restreint (figure I-15). Cette expansion peut, dans certains cas, être contrôlée s'il y a suffisamment d'espace vacant dans la matrice sous forme de porosité élevée ou de bulles d'air entraînées... cité par [14], (figure I-14).

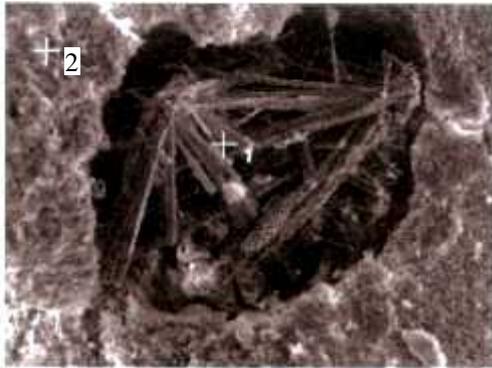


Figure I-14 :
Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite différée non expansive dans un pore du béton (1) ; (2) = liant hydraté [20].

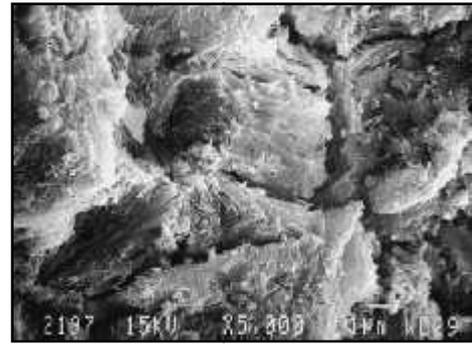


Figure I-15 :
Observations au microscope électronique à balayage d'ettringite différée massive expansive et des fissures dans une pâte de ciment après traitement thermique..cité par [14].

La formation différée de l'ettringite n'est pas réservée exclusivement aux bétons traités thermiquement, durant les premières heures, à une température élevée pour accélérer la prise et le durcissement. La formation différée de l'ettringite peut également apparaître dans les bétons massifs subissant une température élevée causée par le dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment, durant les premières heures ou les quelques premiers jours suivant leur confection, dits «autochauffés». Ainsi une prolongation de la période durant laquelle la température du béton est élevée favorise la formation différée de l'ettringite...cité par [14].

I.7.2.3. Autre forme d'Attaque par les sulfates

- **Formation de la thaumasite:**

La thaumasite peut être rencontrée dans les cas d'attaque par les sulfates internes ou externes [20]. La thaumasite a été observée et est considérée comme l'une des principales causes de dégradation dans le béton de tuyaux de haute pression d'un aqueduc en Alberta (Canada) enterrés dans des champs agricoles où l'utilisation d'engrais contenant de l'ammonium est fréquente. L'ammonium est un catalyseur puissant pour la formation de la thaumasite. Les figures I-16 et I-17, montrent un diffractogramme des rayons X et un micrographe de la thaumasite détectée dans ce béton [22].

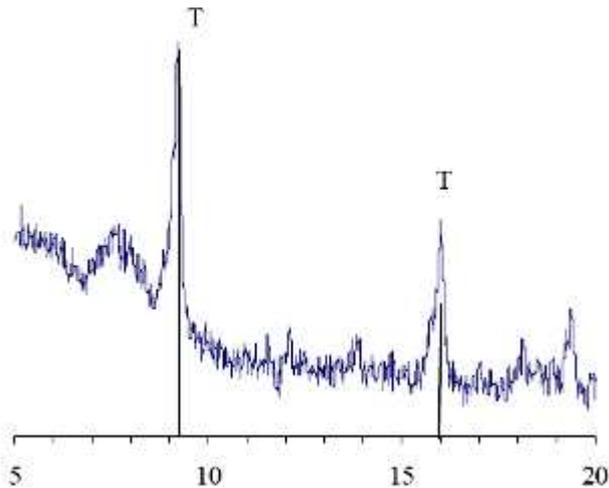


Figure I-16 :
Diffractogramme des rayons X de la thaumasite dans un béton.



Figure I-17 :
Micrographe de la solution solide de l'ettringite et de la thaumasite dans une pâte dégradée.

Certains carbonates présents dans le béton comme les granulats ou les fillers calcaires peuvent également réagir, sous des conditions particulières, avec les sulfates pour former de la thaumasite ($\text{Ca}_3\text{SiO}_3\text{CaSO}_4\text{CaCO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$), voir figures I-18 et I-19.



Figure I-18 :
Photo MEB de la thaumasite [20].

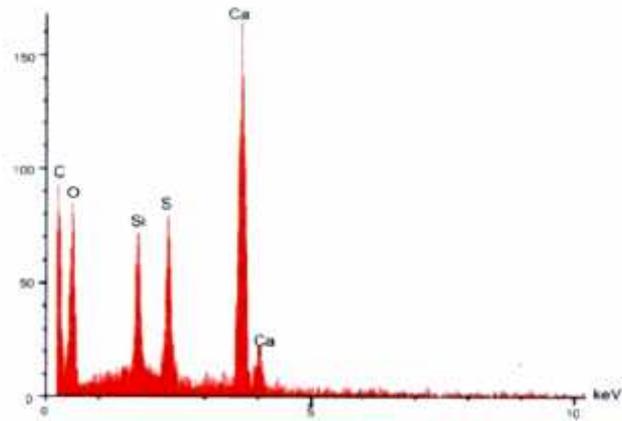


Figure I-19 :
Analyse au spectrométrie à dispersion d'énergie des cristaux de thaumasite : signale intense en carbone, silicium, soufre et calcium. Signal en aluminium très faible ou absent [20]

La formation de la thaumasite est favorisée lorsque la température ambiante se situe entre 5 et 10 °C. Cependant, dans un système cimentaire, la thaumasite n'est détectée qu'en solution solide avec l'ettringite. Sa formation cause une dégradation du béton qui se manifeste par une expansion et une fissuration, dans un premier temps, et par une destruction des C-S-H par la suite. La formation de la thaumasite est encore plus destructive que celle de l'ettringite, car d'abord la quantité de thaumasite qui peut se former est beaucoup plus grande que celle de

l'ettringite à cause des constituants qui rentrent dans sa composition (silicates, carbonates, sulfates, chaux et eau) et ensuite, la formation de la thaumasite peut causer la consommation des silicates et du calcium des C-S-H [22].

- **Formation de phase U:**

Des études ont montré que lorsque la concentration en alcalins du béton est élevée, il était possible de former une phase baptisée « phase U » de composition $(4\text{CaO}.0,9\text{Al}_2\text{O}_3.1,1\text{SO}_3.0,5\text{Na}_2\text{O}.16\text{H}_2\text{O})$. cette phase qui se présente au MEB se forme de plaquettes hexagonales minces analogues au monosulfoaluminate de calcium ou à l'aluminate C_4AH_{13} avec lesquels peut être confondue, n'est rencontrée qu'exceptionnellement dans des béton soumis à des environnements particuliers riches en soude. Seul la microanalyse élémentaire associée au MEB permet de la différencier. Sa transformation en ettringite peut conduire à des désordres....cité par [14].

I.7.3. Le rôle des ajouts minéraux dans l'attaque par les sulfates :

Yeginobali et Dilek [24] ont évalué la résistance aux sulfate de deux types de fumées de silice, des fours de ferrosilicium (FeSi) et de silicoferrochromium (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 % Na_2SO_4 et 8.4 % MgSO_4 . 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 % MgSO_4 la perte de masse s'est produite presque au début. L'addition de fumée de silice a augmenté l'importance des perte de masse.

Ils ont trouvé aussi, selon les valeurs de la résistance à 60 semaines (voir tableau I.2), que les spécimens immergés dans l'eau et dans les solutions de sulfate, la fumée de silice a encore eu un effet bénéfique dans la solution de Na_2SO_4 et un effet néfaste dans la solution MgSO_4 .

Tableau I.2 : Résistance à la compression des cubes de mortier immergés dans l'eau et dans les solutions de sulfates [24].

Type de ciment+FS	RcB28 MPa	Rc (60 semaines) Mpa			% de la résistance dans l'eau à 60 semaines	
		Dans l'eau	10% Na ₂ SO ₄	8.4% MgSO ₄	10% Na ₂ SO ₄	8.4% MgSO ₄
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 [25], étudia l'influence de la concentration de la solution agressive de MgSO₄ 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 MgSO₄ 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. [26] ont étudié l'expansion des mortiers contenant de la brique broyée, exposés à une solution de 2.1% de sulfate de sodium (Na₂SO₄). 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 employés 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 [27] sur l'augmentation de la résistance aux sulfates des mortiers contenant 15% de zéolite (pouzzolane naturelle) au ciment, 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 % Na₂SO₄ 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 Na₂SO₄ 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 [28], 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 CB3BA et du SOB3B du ciment utilisé. L'attaque est importante pour les ciments à forte teneur en CB3BA et SOB3B.

S.A. Hartshorn et coll. [29], identifient la présence de thaumasite après 126 jours d'exposition dans 1.8% de solution de $MgSO_4$ 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 [30] 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% Na_2SO_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.

Selon l'étude de Torres et coll [31], 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 [31], ce comportement est du a la formation de la thaumasite qui est très importante dans les ciments contenant des fines calcaires, les analyses aux rayons X ont montré l'accroissement du taux de la thaumasite en fonction de la quantité de fillers calcaire introduite.

Turanli et coll [32] 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 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 % ciment portland + 45 % pouzzolane) ;
- BC55 (45 % ciment portland + 55 % pouzzolane).

Et immergées dans une solution de 5 % de $MgSO_4$. d'après leur résultats, ils ont montré l'effet bénéfique de l'ajout de la pouzzolane sur la résistance à l'expansion, dû à l'attaque sulfatique, des éprouvettes de mortiers confectionnées avec des taux de pouzzolanes élevés. Il est à noter que la composition de la pouzzolane de Turquie est très proche à celle de Béni-Saf. Après 36 semaines d'immersion dans la solution de sulfate de magnésium, le ciment contenant 55% de pouzzolane résiste mieux à l'attaque sulfatique, d'après l'auteur cette diminution de l'expansion est due à la fixation de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) par la pouzzolane ce qui réduit sa réactivité avec la solution de sulfate de magnésium, et par conséquent influe sur la formation des produits expansifs (ettringite et thaumasite).

Une étude expérimentale de S.T. Lee et coll. [33] a montrée que la fumée de silice substituée à 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.

Ce résultat a été corroboré par les travaux de Mulanga et coll [30] et Turker et coll [34], ils ont trouvés que l'ajout de la fumée de silice améliore les caractéristiques de la longévité du béton.

Lee et coll [33] ont traité l'effet de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance des mortiers dans des environnements sulfatiques ; le sulfate de sodium et le sulfate de magnésium. Les différents compositions des ciments sont : OPC (ciment Portland ordinaire) sans ajout et OPC avec 5 %, 10 % et 15 % de fumée de silice. Ils ont conclue que le ciment avec la fumée de silice comme ajout présente moins de perte en résistance que le ciment sans ajout.

I.8. 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. La contribution des ajouts minéraux vis-à-vis des attaques chimiques est due à :

- ❖ Réduction de la teneur en chaux et C_3A 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 coefficient 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.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical bar on the left and rounded corners. The text is centered within this frame.

Chapitre II

**Caractéristiques des matériaux utilisés et
méthodes d'essais**

CHAPITRE II :

Dans le but de faciliter le travail, ce chapitre est structuré de la manière suivante. La partie A présente les essais et les méthodes expérimentales de caractérisation des matériaux et du béton. La partie B est consacrée aux résultats et interprétations de ces essais de caractérisation des matériaux.

II.A. ESSAIS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET DU BÉTON

II.A.1. Introduction :

Dans cette première partie, nous allons résumer les différents essais et méthodes expérimentales suivis au cours de cette étude pour étudier l'influence des fines calcaires sur les caractéristiques d'un béton ordinaire. A cet effet, il faut étudier et analyser les caractéristiques des matériaux utilisés.

Nous présenterons d'abord les méthodes expérimentales avant en passant en revue les matériaux utilisés. Les résultats trouvés seront exposés dans la deuxième partie (partie B).

II.A.2. Essais d'identification des matériaux utilisés :

II.A.2.1. Essais réalisés sur le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment de type CPA CEM I 42,5 (Ciment résistant aux sulfates). Il est constitué de :

- 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment ;
- du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.



Photo N° 01. Ciment CRS utilisé.

II.A.2.1.1. Caractéristiques physiques :

a. Surface spécifique :

La surface spécifique d'une poudre ou dite encore la finesse de mouture est définie comme étant la surface exprimée en cm^2 d'un gramme de cette poudre. C'est une propriété physique importante des ciments.

La surface spécifique est mesurée à l'aide du perméabilimètre de Blaine. Elle se mesure en fonction du temps que met un volume d'air que l'on fait passer à travers une couche de liant, sous une pression et une température donnée [NF P 15-442].

b. Consistance normale :

Il s'agit de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale qui sera utilisée dans l'essai de prise.

La teneur en eau est exprimée en pourcentage de la masse de ciment [NF EN 196-3].

c. Temps de prise :

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'appareil de Vicat. L'essai de détermination du temps de prise permet d'évaluer la vitesse de durcissement de la pâte de ciment durant les premières heures qui suit l'addition de l'eau [NF EN 196-3].

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standardisée, dans une pâte de consistance normale contenue dans une moule tronconique (figure II.1).

La détermination du temps de prise initiale nous aide à prendre toutes les précautions nécessaires à la meilleure mise en place du béton. Tandis que le temps de prise finale nous donne la période nécessaire au ciment pour qu'il acquière un niveau de résistance et de solidité.

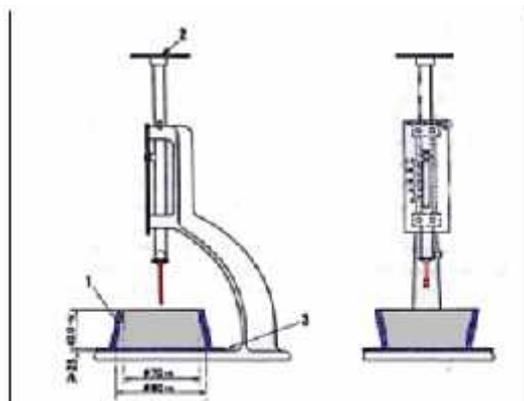


Figure II.1. Essai de consistance et prise.

d. Masse volumique absolue :

Pour les éléments fins (ciment et fines) on utilise la méthode du Chatelier représenté sur la figure (II.2). Il contenait un certain volume V_1 de toluène, la masse globale est M_1 . L'introduction de 60 g de ciment a fait changer le volume initial ainsi que la masse, le volume serait V_2 et l'ensemble aura pour une masse M_2 . L'essai est réalisé selon la norme française [NF P 18-555].

La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante : $Mv_R = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$

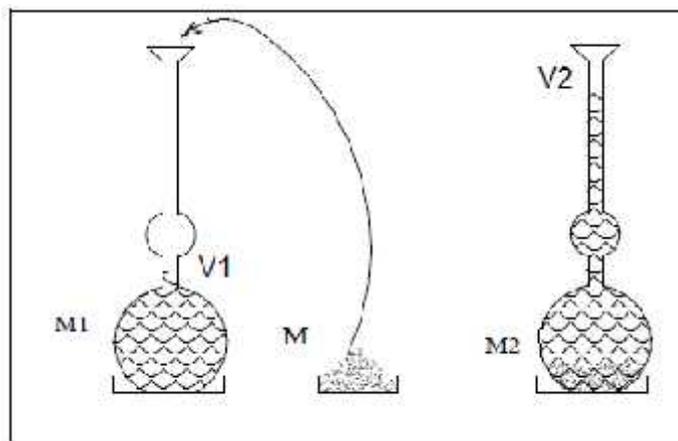


Figure II.2. Principe de Chatelier.

On peut utiliser aussi pour la détermination de masse volumique absolue par la méthode de Pycnomètre [NF P 18 555] (figure II.3).

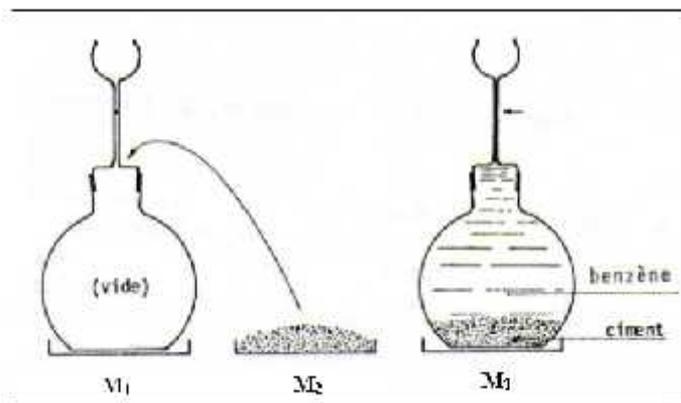


Figure II.3. L'essai de Pycnomètre

La masse volumique absolue est :

$$Mv_s = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_2 - M_1}{V_T - \left(\frac{M_3 - M_2}{Mv_L} \right)}$$

D'où :

M_1 : La masse de pycnomètre vide.

M_2 : La masse de pycnomètre et l'échantillon.

M_3 : La masse globale (pycnomètre, l'échantillon et un liquide d'imbibition pour dégager l'aire emprisonnée entre les graines).

M_p : La masse d'échantillon.

V_p : Le volume d'échantillon.

V_T : Le volume total (volume de pycnomètre)

M_{VL} : La masse volumique de liquide (on utilise l'essence dans la cas de ciment).

e. La masse volumique apparente :

En laissant tomber l'échantillon d'un entonnoir normalisé et sans le tasser pour remplir un récipient d'un volume connu (un litre), le volume apparent de l'échantillon mesure 1 litre.

Le récipient doit être arasé avec une règle par mouvement de va et vient (figure II.4).

La pesée de cet échantillon sur une balance tarée à la masse du récipient indique la masse de cet échantillon.

La masse volumique apparente représente le rapport entre cette masse et le volume apparent correspondant [NF P 18 555].

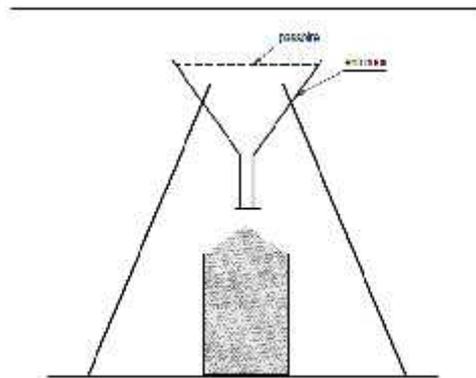


Figure II.4. L'essai de mesure la masse volumique apparente.

II.A.2.1.2. Essais mécaniques :

Lors de la démarche de formulation d'un béton, il convient de tenir compte de la classe de résistance du ciment employé, qui reflète l'une des caractéristiques essentielles de la qualité de celui-ci et qu'il s'agit de déterminer la résistance à la compression et à la flexion à trois points sur des mortiers normalisés suivant la norme [NF EN 196-1].

II.A.2.1.3. Essais chimiques :**a. Composition chimique :**

On sait que la qualité du béton dépend en grande partie de la qualité de ses constituants, et puisque le ciment est élément de base au point de vue de durabilité, il est indispensable d'effectuer son analyse chimique.

b. Composition minéralogique :

La composition minéralogique de ciment peut être calculée à partir de la composition chimique par les formules de Bogue suivantes [7] :

1. Si $\frac{A}{F} \geq 0.64$ on a :

$$C_3S = 4.071 C - 7.6 S - 6.718 A - 1.43 F - 2.852 \bar{S}$$

$$C_2S = 2.867 C - 7.544 C_3S$$

$$C_3A = 2.65 A - 1.692 F$$

$$C_4AF = 3.043 F$$

2. Si $\frac{A}{F} < 0.64$ on a :

$$C_3S = 4.071 C - 7.6 S - 4.479 A - 2.859 F - 2.852 \check{S}$$

$$C_2S = 2.867 C - 7.544 C_3S$$

$$C_3A = 0$$

$$C_4AF = 2.1 A + 1.702 F$$

Avec:

$$A = Al_2O_3$$

$$C = CaO \text{ (totale)} - CaO \text{ (libre)} - 1.27 CO_2$$

$$F = Fe_2O_3$$

$$S = SiO_3 \text{ (totale)} - SiO_3 \text{ (non combinée)}$$

$$\bar{S} = SO_3$$

II.A.2.2. Essais réalisés sur les fines utilisés

Les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires non hydrauliques (inertes), mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse. Par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire dans les bétons, et par leur

relative inertie chimique ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse.



Photo N° 02. Fine de calcaire utilisée

II.A.2.2.2. Masse volumique absolue et apparente :

Cet essai est décrit dans le paragraphe II.2.1.1.

II.A.2.2.3. Diffraction des rayons X (DRX) :

La méthode générale consiste à bombarder des échantillons avec des rayons X, et à retenir l'intensité de rayons X qui sont diffusés selon l'orientation dans l'espace.

La connaissance des angles et l'intensité des pics nous permet alors d'obtenir une série de valeur d $\{h, k, l\}$ qui constitue la signature d'un solide cristallisé...cité par [14].

Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller, on peut donc indexer les pics de diffraction selon ces indices.

Les interférences constructives sont caractérisées par des pics d'intensité de rayon X qui suivent la loi de Bragg.

Cette méthode d'analyse de la microstructure permet de caractériser l'arrangement des couches d'atomes au sein de cristaux. Cependant, cette technique ne peut généralement pas permettre d'identifier des composés amorphes.

II.A.2.3. Essais réalisés sur les granulats :

Nous avons utilisé le sable alluvionnaire (SA), roulé de nature siliceuse et issu de gisement de rivière(Zaafran) et de classe granulaire 0/5.

Pour les graviers, nous avons utilisé des graviers concassé d'origine calcaire et ayant deux classes granulaires différentes 3/8 et 8/15 provenant de la carrière de Zaccar à Djelfa.

Afin d'obtenir une bonne adhérence entre la pâte du liant et les granulats, nous avons procédé à leur lavage et qui, une fois séchés, ont été conservés dans des sacs bien fermés



Sable

Gravier «3/8»

Gravier «8/15»

Photo N° 03. Les différents granulats utilisés

II.A.2.3.1. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique des granulats est l'un des essais les plus indispensables effectués dans la composition du béton, pour la raison que la granularité constitue la caractéristique la plus importante, qui influe sur le dosage du mélange.

Cet essai est réalisé selon la norme française [NF P 18-560] et qui permette de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux des différentes familles de grains constituant un échantillon de sable ou de granulat quelconque.

Les pourcentages trouvés influent directement sur le coût, la composition et la maniabilité du béton. Pour avoir les meilleurs mélanges, les granulats doivent répondre à des fuseaux granulométriques bien spécifique.

En effet, on doit connaître aussi certaines propriétés granulométriques telles que le module de finesse et la dimension maximale des particules des gros granulats.

- **Module de finesse :**

La finesse du sable est défini comme étant la centième de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les tamis de la série :

$$0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5 \text{ mm.}$$

Un bon sable devrait avoir un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8 [4].

II.A.2.3.2. Equivalent de sable :

L'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable sans pouvoir déceler la nature des fines. Une solution lavante sépare les éléments fins de sable en provoquant leur floculation dans une éprouvette normalisée.

Après 20 min de repos on mesure :

H_1 : la hauteur de la partie sableuse sédimentée.

H_2 : la hauteur totale de flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

La valeur de l'équivalent de sable (E_s) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur H_1 , à la hauteur totale H_2 .

Selon que la hauteur H_2 est visuellement ou à l'aide d'un piston comme il est montré sur la figure (II.5) on détermine :

E_{s_v} : équivalent de sable visuel.

E_{s_p} : équivalent de sable au piston.

Un sable pour lequel on a un E.S. visuel supérieur à 65 mais inférieur à 75, est très légèrement argileux pouvant présenter un retrait légèrement plus fort.

Les sables dont l'Es visuel est compris entre 75 et 85 (ou E.S. piston compris entre 70 et 80) conviennent parfaitement pour du béton de haute qualité. Enfin pour les sables présentant des valeurs supérieures, signe d'un manque presque total de fines argileuses, on peut craindre un défaut de plasticité du béton qui devra être compensé, sans majoration du rapport E/C. L'essai est effectué suivant la norme française [NF P 18-598].

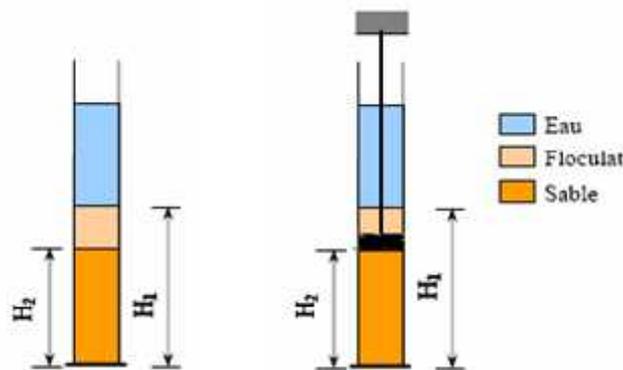


Figure II.5. Es à vue et Es à piston.

II.A.2.3.3. Masse volumique des granulats :

Les masses volumiques des granulats ne constituent pas en soi des indices de la qualité de ceux-ci ni de celle du béton qui les contient. Ses valeurs sont plutôt nécessaires au calcul du dosage du béton.

Pour l'ensemble des granulats utilisés dans cette étude, on a calculé les masses volumiques suivantes :

- La masse volumique apparente exprime la masse d'un matériau par unité de volume apparent, c'est-à-dire le volume du matériau y compris les vides inter-granulaires.

- la masse volumique absolue est définie comme étant la masse d'un matériau par unité du volume total. La méthode de l'éprouvette graduée est la plus utilisée pour déterminer cette masse volumique. Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Son mode opératoire est le suivant (figure II.6) :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors :

$$s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

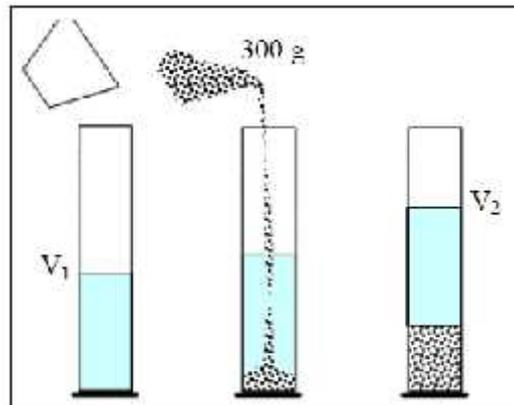


Figure II.6. Méthode de l'éprouvette graduée

Les masses volumiques des différents sables sont déterminées suivant la norme française [NF P 18-555], celles des graviers suivant la norme [NF P 18-554].

II.A.2.3.4. L'absorption d'eau :

Le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat (Abs) est le rapport de l'augmentation de sa masse provoquée au bout de 24 heures par une imbibition partielle par rapport à sa masse sèche.

Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif.

L'essai réalisé selon la norme [NF 18-554] :

- Soit M la masse de l'échantillon en l'état (la masse doit être telle que $M > 0,2 D$) et M_s sa masse sèche (après lavage de l'échantillon sur le tamis de 4 mm, Séchage le refus à l'étuve, le laisser refroidir et le peser).
- Après immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 20°C, on procède à l'essuyage de chaque grain à l'éponge. On pèse ensuite l'échantillon, soit M_a la masse dans l'air de l'échantillon imbibé.

Le coefficient d'absorption d'eau en pourcentage est :

$$\text{Absorption massique : } Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

II.A.2.3.5. Résistance aux chocs :

Coefficient Los Angeles (LA) :

L'essai consiste à mettre 5000 g des granulats dans le cylindre de la machine Los Angeles affecté d'un cycle de 500 rotations, qui contient des boules en acier normalisés provoquant ainsi la fragmentation des granulats (photo N°: 04). Le nombre de boules est lié à la classe granulaire choisie [NF P 18-573]. Après traitement, le refus du tamis 1.6 mm est séché et pesé ; soit m' sa masse.

Le coefficient Los Angeles (LA) est le rapport de la masse du tamisat à la masse avant essai. Le granulat est donc d'autant plus rigide que son coefficient Los Angeles est faible.

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

Ou :

$$m = M - m'$$

M : masse totale du granulat mis dans le cylindre.



Photo N° 04. La machine Los Angeles.

II.A.2.4. L'eau de gâchage :

Pour convenir à la confection de béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. La norme [P 18-303] limite à cet effet le pourcentage de matières en suspension à 2 ou 5 g/l et la teneur en sels dissous à 15 ou 30 g/l suivant la nature du béton, précontraint ou non armé, spécifications qui ne différencient pas les éléments nocifs même en très faible pourcentage de ceux qui en pourcentage éventuellement plus important ne le sont pas.

L'eau a une place prépondérante dans la préparation du béton et son rôle apparaît d'autant plus important que sa quantité puisse modifier la constitution même du béton.

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable.

II.A.3. Méthodes expérimentales de caractérisation du béton :

II.A.3.1. Réalisation des gâchées :

Le malaxage du mélange s'est effectué dans un malaxeur de béton d'une capacité de 30 litres (photo N°5). L'ensemble sera mélangé durant trois (05) minutes de façon d'assurer un enrobage acceptable des granulats et une uniformité convenable au mélange.



Photo N° 05. Malaxeur de béton

II.A.3.2. Confection des éprouvettes :

On utilise des moules cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour mesurer la résistance à la compression des bétons à l'état durci, conformément à la norme [NF P18-430], à raison de trois éprouvettes par essai.

Les moules utilisés (photo N° 06) ont été lubrifiés, remplis de béton, et compacté mécaniquement à l'aide d'une table vibrante (photo N° 07) afin d'avoir un béton bien compact avec moins de vides.



Photo N° 06. Moules utilisées

Les éprouvettes sont maintenues dans l'environnement de laboratoire et pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, elles sont couvertes par du plastique, jusqu'au jour du démoulage qui aura lieu 24 heures après le coulage du béton, ensuite les éprouvettes sont pesées pour déterminer la densité à un jour puis elles sont affectées directement au milieu de conservation jusqu'au jour de l'essai.



Photo N° 07 : Table vibrante utilisée

II.A.3.3. Mode de cure :

Après démoulage effectué 24 heures après leur confection, les éprouvettes ont été conservés dans l'eau à chaux sous une température de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50% et cela jusqu'au jour de l'essai, conformément à la norme [NF EN 196-1].

Les essais mécaniques ont été effectués à l'âge de 7, 14 ,21 et 28 jours.



Photo N° 08 : Cure des éprouvettes sous l'eau à chaux

II.A.3.4. La résistance mécanique :

Le comportement mécanique de tous les BO a été étudié en compression uni-axiale sur des éprouvettes prismatiques $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$.

A chaque échéance, trois échantillons sont soumis à une compression uni-axiale sur le bâti de compression d'une presse de marque « Controlab » (photo N°09), à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000 kN, suivant une vitesse de chargement de 0,5 kN/s.



Photo N°09 : La presse hydraulique de compression pour béton.

II.A.3.5. Variation de masse

Afin d'évaluer la durabilité des bétons durcis exposés aux milieux agressifs et mettre en relief l'influence de l'addition de fine calcaire, on a suivi la variation de masse sur les éprouvettes de bétons immergées dans la solutions de 5 % de sulfates de magnésium et dans l'eau de Sabkha (région de HBB).



Photo N°10 : les éprouvettes immergées
Dans l'eau de Sabkha



Photo N°011 : les éprouvettes immergées
dans la solution de 5% de MgSO4

Le suivi de variation de masse est effectué en utilisant une balance de précision élevée. Une fois l'éprouvette retirée de son milieu de conservation, on l'essuie avec un tissu sec et on la laisse pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire, puis on effectue la pesée, on enregistre l'indication et ensuite on la remet à l'immersion dans son milieu de conservation. La variation de la masse est évaluée comme suit :

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$$

M_1 : la masse du spécimen, avant immersion en (g);

M_2 : la masse de spécimen après immersion en (g).

II.A.4. Méthode de composition du béton

L'étude de la composition du béton est nécessaire à tous béton destiné à la construction.

La méthode de formulation de Dreux Gorrise est alors la méthode utilisée pour la détermination de la composition du béton testé. Les proportions des différents constituants des bétons testés sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.1. Proportions des différents constituants des bétons .

Désignation des mélanges	B 0	BC5	BC 7.5%	BC 10%
Ciment (Kg)	350	332.5	323.75	315
Fines calcaires (Kg)	0	17.5	26.25	35
Eau (Kg)	200	200	200	200
Gravier 3/8 (Kg)	220	230	228.1	227.75
Gravier 8/15 (Kg)	636.9	613.5	613	611
Sable (Kg)	955	964.5	963	961.5

II. B. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

II.B.1. Introduction :

Après avoir passé en revue les différents essais et méthodes expérimentales dans la partie précédente, nous présenterons dans cette partie, les résultats de ces essais de caractérisation de matériaux utilisés.

II.B.2. Résultats de caractérisation du ciment :

II.B.2.1. Caractéristiques chimiques et minéralogique :

La composition chimique et minéralogique du ciment utilisé est présentée dans les tableaux II.2 et II.3 :

Le calcul de la composition minéralogique du ciment est basé principalement sur les équations de Bogue, donnant le pourcentage des principaux composés du ciment.

Tableau II.2. Caractéristiques chimiques de ciment utilisé

Composants	MgO	SO ₃	perte au feu	résidu insoluble
%	5	3,5	4	3

Tableau II.3. Caractéristiques minéralogiques de ciment utilisé

Composants	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF+2C ₃ A
%	50	5	22

II.B.2.2. Caractéristiques physico- mécaniques :

Les caractéristiques physico- mécaniques du ciment utilisé sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.4. Caractéristiques physico- mécaniques du ciment utilisé

Caractéristiques		<i>Ciment CRS 42.5</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³)		3.12
Surface spécifique (cm ² /g)		3200 cm ² /g ±250 normes
Expansion à chaud		inférieur 10 mm sur pate
Résistance à la compression à		07 Jours 315 Kg/cm ²
		28 jours 400 Kg/cm ²
Temps de Prise	Début	1h 30 mn
	Fin	4 h 20 mn

II.B.3. Résultats de caractérisation de la fine calcaire :

II.B.3.1. Compositions physiques de la fine :

Ces principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau II.5 :

Tableau II.5. Caractéristiques physiques des fines calcaires.

	Fine siliceuse
La masse volumique apparente (g/cm ³)	1,14
La masse volumique absolue (g/cm ³)	2,7

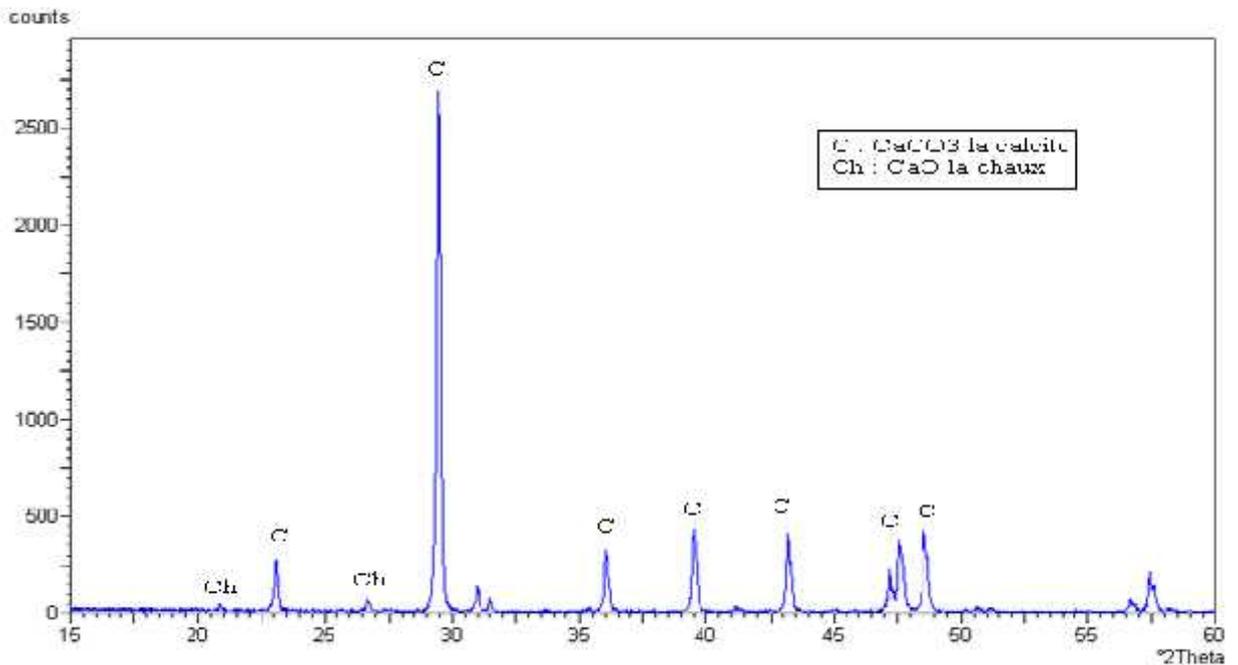
II.B.3.2. Caractérisation chimique et minéralogique de la fine calcaire :

Les principales caractéristiques chimiques sont regroupées dans le tableau II.6 suivant :

Tableau II.6 : Composition chimique du filler calcaire utilisé.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	PAF
Contenu (%)	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3

L'analyse de DRX est effectuée dans le cadre d'autre étude qui est présentée dans la figure II.7

**Figure II.7.** Diffraction des rayons X de la fine calcaire.

II.B.4. Résultats de caractérisation des granulats :

II.B.4.1. Les sables :

II.B.4.1.1. Caractéristiques physiques :

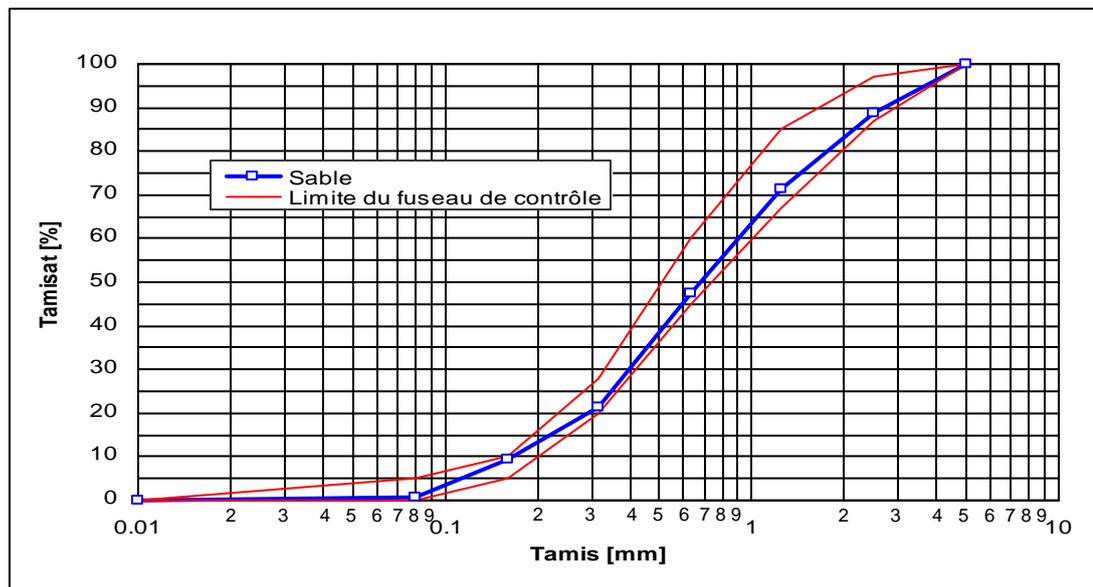
Les différentes caractéristiques physiques de sable utilisé sont regroupées dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Caractéristiques physiques du sable.

Caractéristiques physiques	SA
Densité apparente	1,44
Densité absolue	2,54
Degré d'absorption [%]	0,32
Module de finesse	2,57
Équivalent de sable [%]	77
Équivalent de sable [%]	77

II.B.4.1.2. Caractéristiques géométriques :

La figure II.8, montre la courbe granulométrique du sable.

**Figure II.8.** Analyse granulométrique du sable.

❖ Interprétation :

- On observe que le sable utilisé ayant une propreté d'ordre de 77 %. Cela veut dire ce sable est donc convenient parfaitement pour du béton de haute qualité.

- Le module de finesse du sable ($M_f = 2,57$) est compris entre (2.2 et 2.8) donc c'est un bon sable pour le béton qui convient pour l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante et d'une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- La courbe granulométrique montre que les granulats ont une bonne distribution granulaire et une forme continue.

II.B.4.2. Les graviers :

II.B.4.2.1. Caractéristiques physico-mécaniques :

Les résultats des essais physiques et mécaniques sont portés sur le tableau suivant :

Tableau II.8. Caractéristiques physico-mécaniques des granulats.

	Gravier 3/8	Gravier 8/15
La masse volumique apparente (g/cm^3)	1,31	1,14
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2,74	2,55
Coefficient d'absorption (%)	0,94	0,81
L_A (%)	28	

❖ **Interprétation :**

- Le coefficient d'absorption des granulats est très faible
- La résistance d'abrasion ou à la fragmentation (chocs), des deux classes de granulats situer dans un intervalle 20 à 50% selon la norme européenne [NF EN 1097-2], ce que indique que ces graviers présentent de bonnes propriétés mécaniques.

II.B.4.2.2. Caractéristiques géométriques :

La figure II.9, montre les courbes granulométriques de différentes classes des graviers.

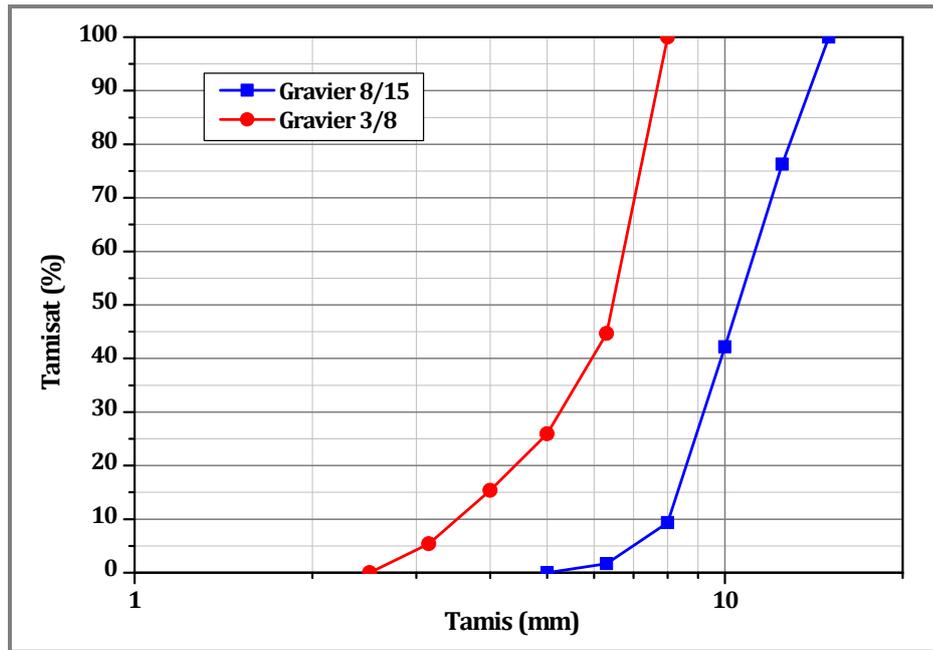


Figure II.9. Analyse granulométrique des différents types de gravier.

II.B.5. Caractérisation de l'eau :

Pour le gâchage du béton, nous avons utilisé de l'eau du robinet, les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont portés dans le tableau II.9 :

Tableau II.9. Analyse chimique de l'eau.

	MG /L
Calcium (Ca)	71.2
Magnésium (Mg)	26.24
Sodium (Na)	/
Potassium (K)	/
Chlorures (Cl)	78.1
Sulfates (SO ₄)	175
Carbonates (CO ₃)	0
Bicarbonates (HCO ₃)	201.3
Conductivité A 25°C	729
PH	8.13

❖ Interprétation :

D'après l'analyse chimique de l'eau, on observe que cette eau est normalisée pour l'utilisation du béton. Donc elle est conforme aux prescriptions de la norme [NF EN 1008], cette norme limite la teneur en Chlorure Cl par 1000 mg/l (pour un béton armé ou avec insert) et la teneur en sulfates SO₄ par 2000 mg/l, ainsi la teneur en Na₂O ne doit pas dépasser 1500 mg/l.

II.B.6. Conclusion :

Les caractéristiques chimiques, physiques, géométriques et mécaniques des matériaux sont satisfaisantes pour la fabrication des bétons hydraulique, c'est-à-dire que ces matériaux peuvent être utilisés dans la confection des bétons, puisqu'ils répondent aux exigences des critères de conformité requises pour les matériaux constituant les bétons courants.

Le comportement mécanique la durabilité des bétons à base de fines calcaires, seront étudiés dans le chapitre suivant.

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and rounded ends. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards at the corners. The text "Chapitre III" is centered within the scroll.

Chapitre III

Résultats et discussions

CHAPITRE III :

Résultats et discussions

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons essayé de valoriser les résultats des différents essais effectués sur les bétons confectionnées selon les différents teneurs ajouts fille de calcaire. Ces résultats portent sur les résistances mécaniques à la compression, et la durabilité.

Les résultats expérimentaux qui ont permis d'établir des courbes et des figures à pour but de faciliter l'interprétation et de permettre une meilleur analyse. Ala fin de ce chapitre, on présente une conclusion sur tous les paramètres étudiés.

III.2. Méthodologie expérimentale :

le béton à été réalisées, concerne à étudié l'effet de l'ajout de calcaire sur la durabilité de béton dans des millieux agressifs.

III.3. Résultats et discussions :

Les caractéristiques mesurées sur le béton étudié à l'état durci sont :

- ❖ La résistance à la compression à l'age 7, 14, 21 et 28 jours, sur des éprouvettes cubiques de 10×10×10 cm.
- ❖ Variation de masse.

III.3.1. Résistance à la compression :

Il est à signaler que les éprouvettes de bétons sont conservées pendant une durée de 28 jours dans une eau saturée en chaux. Ensuite ces dernières sont séparées en trois séries, dont la première série est conservée dans l'eau (temoin) et la deuxième série dans l'eau de Sabkha et la troisième série dans une solution de 5% MgSO₄.

III.3.1.1. Résistances à la compression des bétons conservés dans l'eau saturée en chaux :

Les résultats de la variation de la résistance en compression des bétons d'étude en fonction du temps sont représentés sur la figure (III.1) présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction à l'âge des bétons dans l'eau saturée en chaux.

Tableau III.1 :Résultats de la résistance à la compression de béton

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	Résistance (mpa)			
		7jours	14jours	21jours	28jours
BT	0	23.17	25.78	28.82	32.23
BC5	5	24.24	26.1	29.4	33.59
BC7.5	7.5	25.63	25.75	31.09	34.32
BC10	10	26.49	29.67	32.52	36.69

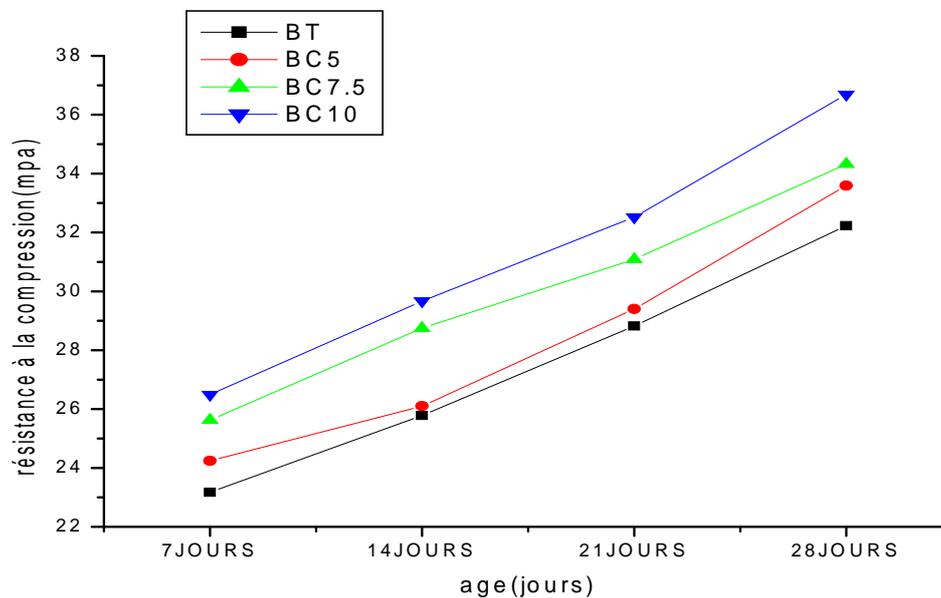


Figure III .1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons dans l'eau saturée en chaux.

- ✓ On remarque que la résistance à la compression de tous les bétons 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 de le fine de calcaire substituée au ciment.
- ✓ Les résistances augmentent au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours pour tous les bétons.
- ✓ les résistances à la compression augmentent en général avec l'augmentation du teneur finede calcaire
- ✓ la résistance à la compression augmente avec le temps notamment pour les bétons avec ajout de fine calcaire . est attribué à la réaction fine calcaire, qui consomme de la Portlandite (CH) produite suite à l'hydratation du ciment.
Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des bétons fine de calcaire.

III.3.1.2. Résistances à la compression des bétons conservés dans l'eau de sabkha :

Les résultats donnés par le tableau III.2 et la figure III.2 montrent l'effet de l'ajout naturel sur la résistance à la compression des bétons immergés dans l'eau de sabkha.

Tableau III.2 : Résultats de la résistance à la compression de béton

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	Résistance(mpa)			
		7jours	14jours	21jours	28jours
BT	0	25.2	28.04	29.6	32.2
BC5	5	27.26	29.35	31.42	33.25
BC7.5	7.5	29.85	31.02	32.15	36.19
BC10	10	30.74	31.58	34.54	37.63

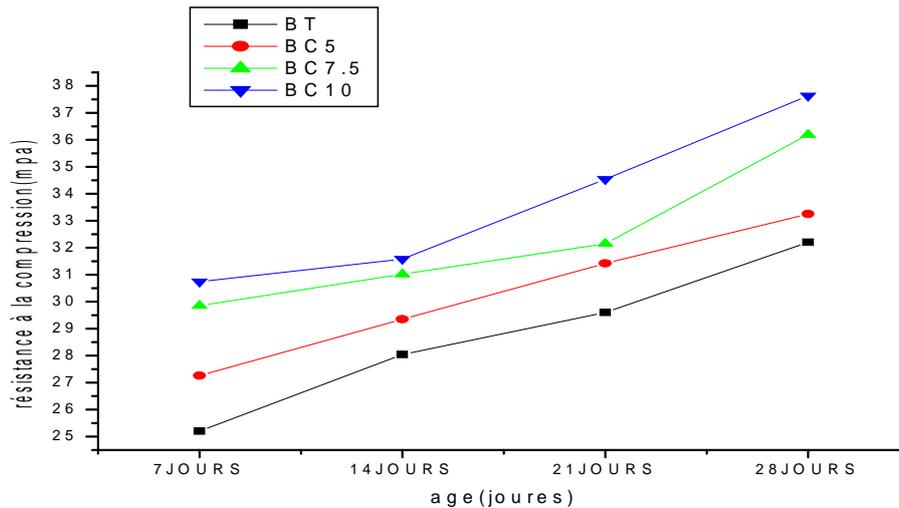


Figure III.2 : Variation de la résistance à la compression des bétons dans l'eau de sabkha

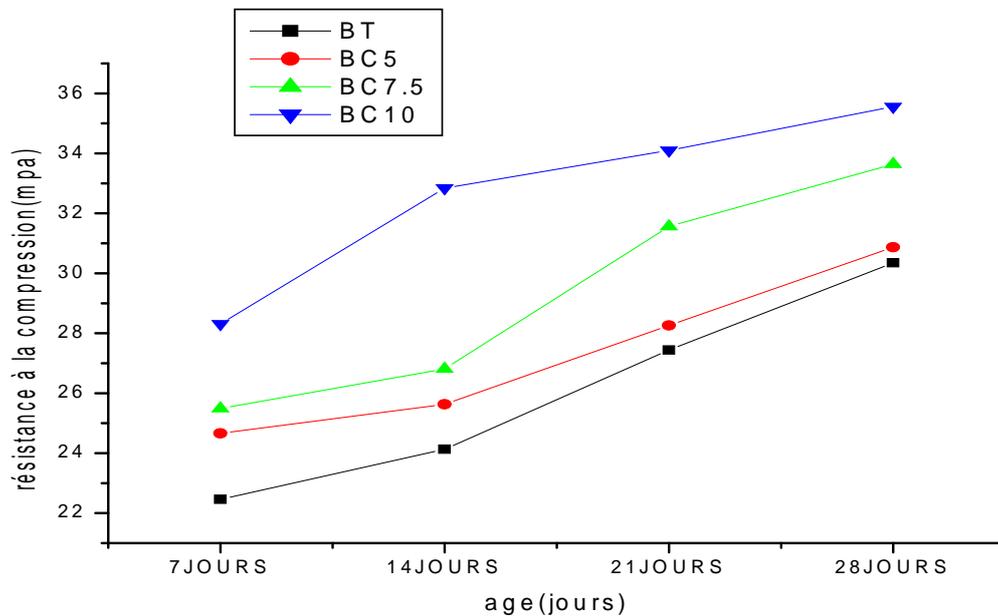
- ✓ On remarque que la résistance à la compression évolue positivement jusqu'à 28 jours pour tous les bétons.
- ✓ A partir de ces résultats, on ne constate que l'effet bénéfique de l'ajout de fine calcaire résistivité à l'agressivité des bétons immergés dans l'eau de sabkha, telle que Les fines calcaires agissent favorablement sur les propriétés mécaniques des bétons. En plus de leur rôle granulaire entraînant une compacité accrue et par voie de conséquence des résistances plus élevées

III.3.1.3. Résistances à la compression des bétons conservés dans une solution de 5% $MgSO_4$:

L'analyse des résultats illustrés sur le tableau III.3 et la figure III.3 montre que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans la solution de 5% $MgSO_4$ se développe positivement jusqu'à 28 jours d'immersion et atteint des valeurs maximales à 28 jours d'immersion.

Tableau III.3 : Résultats de la résistance à la compression de béton :

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	Résistance(mpa)			
		7jours	14jours	21jours	28jours
BT	0	22.46	24.13	27.44	30.35
BC5	5	24.66	25.63	28.26	30.87
BC7.5	7.5	25.49	26.81	31.56	33.64
BC10	10	28.31	32.84	34.1	35.56

**Figure III.3** : Variation de la résistance à la compression des bétons dans la solution de 5% $MgSO_4$

- ✓ D'après la figure III.3 nous remarquons que pour tous les bétons une augmentation évolutive de la résistance à la compression avec l'âge du béton et ne présente aucune chute.
- ✓ Ainsi, on observe que une faible évolution de la résistance pour les béton (BT, BC 5% et 7.5%) dans les premières jours jusqu'à 14 jours que BC 10%.

- ✓ On remarque d'après la même figure que les performances mécaniques se développent dans les premières jours de l'hydratation, plus rapidement pour BC10% que pour BT Car la réaction entre la portlandite avec $MgSO_4$ qui produit le gypse telle que il est jouer un role très important à l'évolution de résistance.

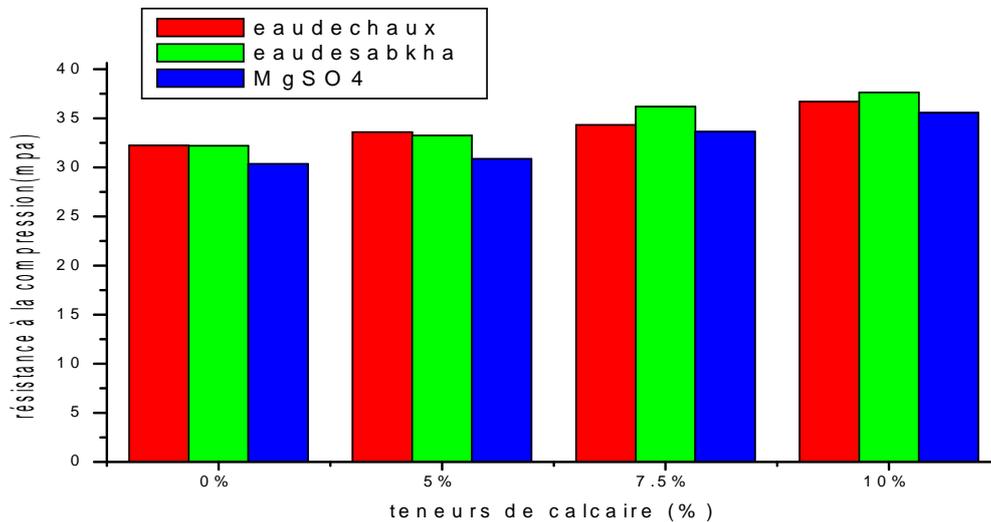


Figure III.4 : Variation de la résistance à la compression des bétons à 28 jours.

- ✓ D'après la figure III.4, la comparaison de la résistance des bétons immersions dans l'eau à chaud, l'eau de sabkha et la solution $MgSO_4$ augmentant progressivement jusqu'à atteindre des valeurs à 28 jours.
- ✓ On remarque que la résistance est toujours plus proche dans tous les bétons, quelle que soit la teneur de calcaire, mais on remarque les valeurs optimaux dans tous les bétons à l'eau de sabkha .

III.3.2. Essais de durabilité

III.3.2.1. Variation de la masse

La variation de la masse des éprouvettes cubiques des bétons de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ conservées dans les deux milieux distinctes, à savoir l'eau douce et l'eau de sabkha et la solution de $5\% MgSO_4$, a été effectué selon la norme ASTM C267 [77] même suivi comme les démarches des éprouvettes des bétons conservées a des milieux précédant.

III.3.2.1.1 . Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau à chaux :

Le tableau III.5 et la figure III.5 montre la variation de la masse des éprouvettes des bétons confectionnées à base de différents teneurs fine de calcaire en fonction du temps d'immersion dans l'eau à chaux.

Tableau III.5 : Evolution de la masse de béton :

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	La masse(Kg)				
		M mesurée après 24H	M mesurée après 7j	M mesurée après 14j	M mesurée après 21j	M mesurée après 28j
BT	0	2404.75	2407.1	2408.5	2411.19	2412.23
BC5	5	2415.09	2418.23	2421.46	2124.13	2425.73
BC7.5	7.5	2400	2403.87	2406.82	2408.91	2411.17
BC10	10	2355	2358.91	2361.89	2364.12	2367.66

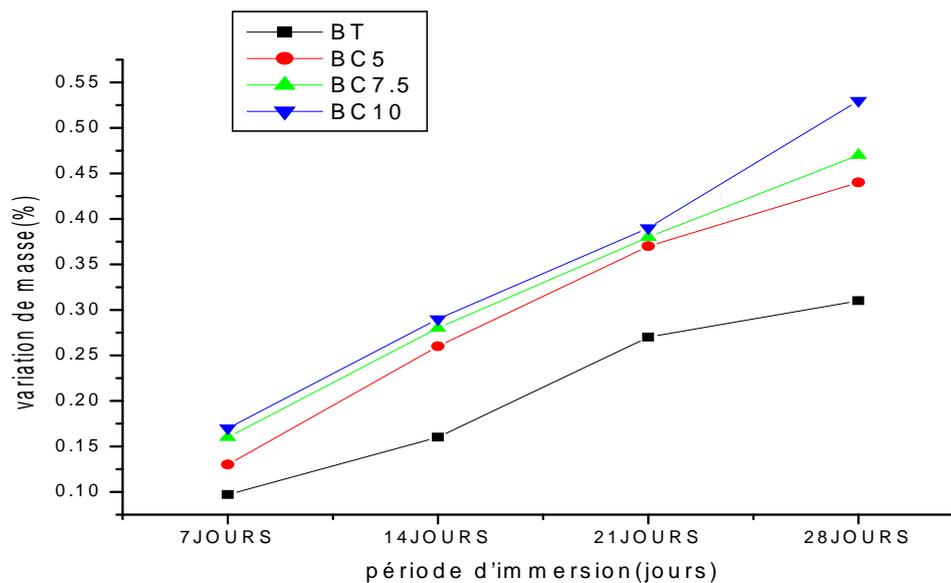


Figure III.5 : Evolution de la variation de la masse immergée dans l'eau à chaux

- ✓ On constate une augmentation permanente de la masse concernant les bétons immergés dans l'eau à chaux. Après cette période et jusqu'à 28 jours, on remarque que l'augmentation de la masse des bétons avec les additions de calcaire par rapport a de béton témoin qui devient inférieure à celle des bétons avec les additions de calcaire .
- ✓ Le béton témoin présente des gains moins importants que celui des bétons avec calcaire. Cela est peut être attribué à la réduction de la quantité de la portlandite suite à l'effet de fine calcaire.

III.3.2.1.2. Variation de la masse des bétons conservés dans l'eau de sabkha

la variation de la masse en fonction du temps des bétons immergés respectivement dans l'eau de sabkha tableau III.6 et la figure III.6 .

Tableau III.6 :evolution de la masse de béton :

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	La masse(Kg)				
		M mesurée après 0j	M mesurée après 7j	M mesurée après 14j	M mesurée après 21j	M mesurée après 28j
BT	0	2413.75	2416.5	2421.01	2423	2425
BC5	5	2394.17	2397.67	2403.22	2405.13	2407.37
BC7.5	7.5	2340.33	2344.33	2349.67	2351.5	2353.83
BC10	10	2365	2370.33	2375.38	2376.37	2379.73

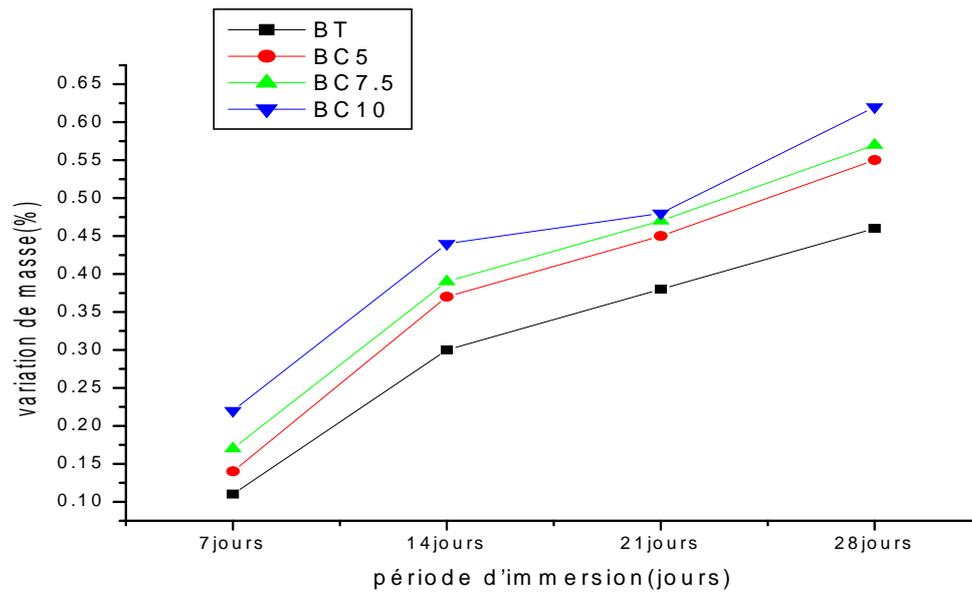


Figure III.6 : Evolution de la variation de la masse immergée dans l'eau de sabkha

- ✓ L'objectif de ce travail concerne la possibilité d'obtention de bétons de ciment hydraulique à hautes performances mécaniques mais aussi durables par l'emploi de fillers calcaires locaux finement broyés. Il doit en résulter un remplissage des vides entre les particules de ciment, les fillers améliorant la compacité du béton. Cet effet permettrait une réduction de la porosité capillaire (et donc de la perméabilité) et par conséquent une augmentation des résistances chimiques envers le milieu agressif (l'eau de sabkha).
- ✓ La masse du béton aux fines calcaires (Fig. III. 6) est systématiquement élevée que celle du béton témoin: il est ainsi confirmé que la surface spécifique élevée du calcaire favorise l'accroissement de la compacité de la matrice cimentaire.
- ✓ En effet, le calcaire, avec une finesse plus grande que celle du ciment utilisé, s'insère dans les vides et les pores capillaires : il densifie ainsi le squelette granulaire du béton.

III.3.2.1.3. Variation de la masse des bétons conservés dans la solution 5%MgSO₄

On remarque une évolution positive de la variation de la masse de tous les bétons en fonction de la durée d'immersion dans la solution 5%MgSO₄ (figure III.7).

Cette évolution positive est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents bétons, et à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de magnésium.

Tableau III.7 : evolution de la masse de béton :

Désignation des mélanges	Calcaire(%)	La masse(Kg)				
		M mesurée après 24H	M mesurée après 7j	M mesurée après 14j	M mesurée après 21j	M mesurée après 28j
BT	0	2404.75	2407.1	2408.5	2411.19	2412.23
BC5	5	2415.09	2418.23	2421.46	2124.13	2425.73
BC7.5	7.5	2400	2403.87	2406.82	2408.91	2411.17
BC10	10	2355	2358.91	2361.89	2364.12	2367.66

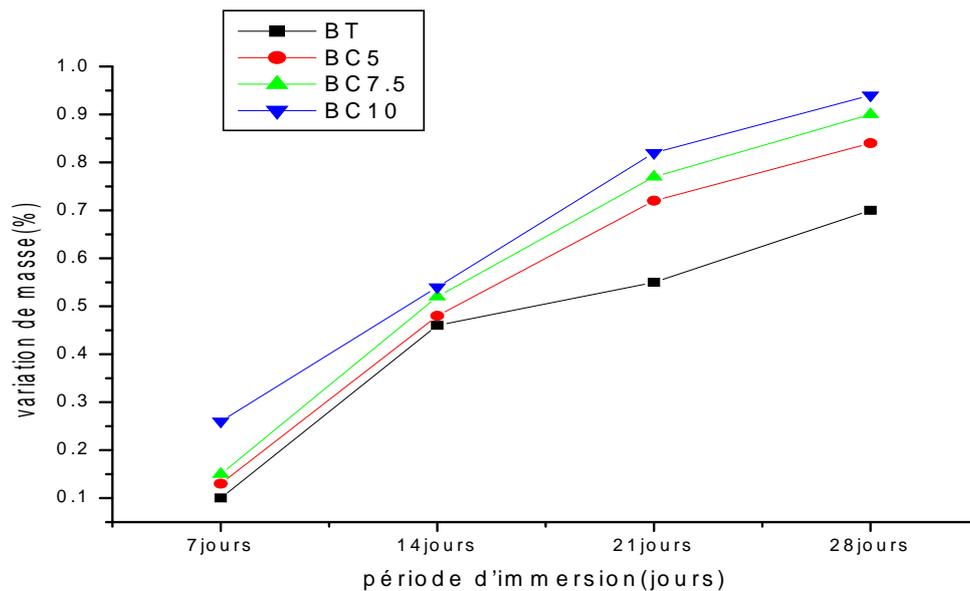


Figure III.7 : Evolution de la variation de la masse immergée dans la solution $MgSO_4$

- ✓ D'après la figure III.7, on constate une évolution de la variation de masse de tous les bétons en fonction de la durée d'immersion 28 jours dans la solution de 5 % de sulfate de magnésium.
- ✓ L'évolution se traduit par l'apparition de phases minéralogiques expansives dans le matériau durci tels que le gypse, l'étringite secondaire et la brucite, susceptibles de faire gonfler la pâte de ciment.
- ✓ La variation de masse des bétons contenant de fine calcaire est supérieure à celle des bétons témoin. Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par le calcaire contenu qui est probablement capable d'accélérer l'attaque de sulfate de magnésium [126].
- ✓ En outre, l'augmentation du poids des bétons soumis à une immersion dans la solution de $MgSO_4$ peut être expliquée par la formation de produits supplémentaires. L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions sulfates et l'aluminate de calcium (C_3A) de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont le trisulfoaluminate de calcium communément appelé « Ettringite » [127] et le sulfate de calcium hydraté mieux connu sous le nom de « gypse ».
- ✓ Dès que les cristaux en aiguilles de l'étringite secondaire n'ont plus de place pour croître dans les pores, une pression de cristallisation se produit, ce qui entraîne l'expansion et, finalement, l'éclatement de la surface du béton

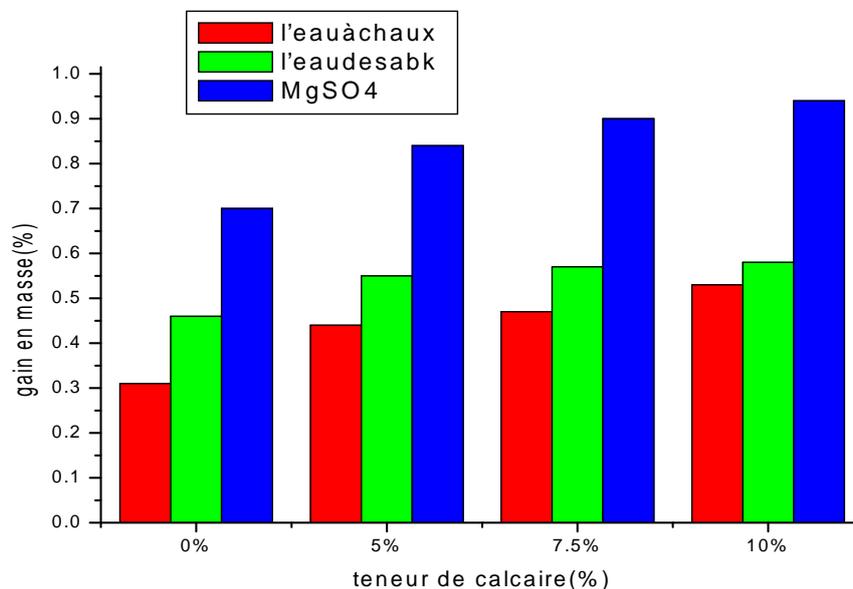


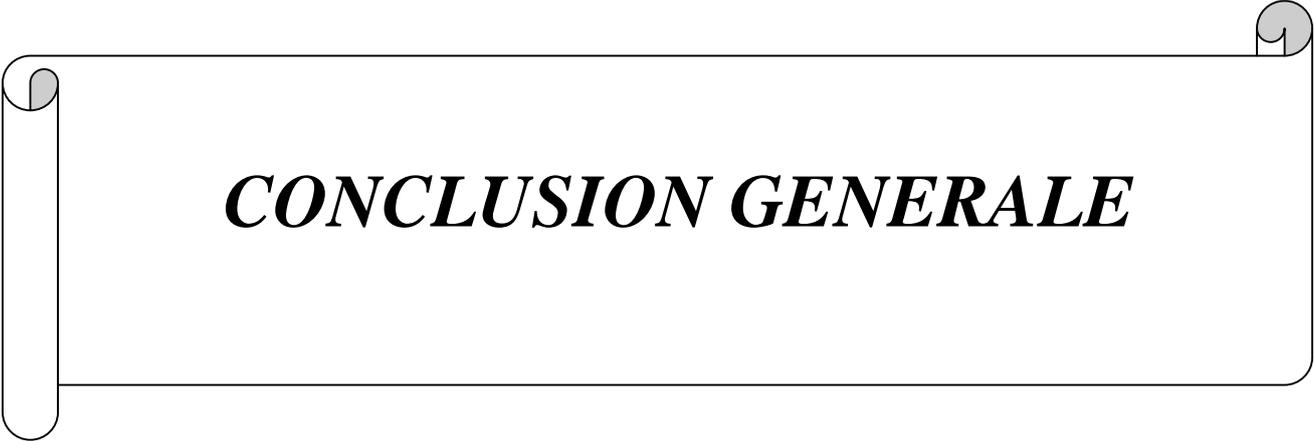
Figure III.8 : le gain en masse des échantillons du béton à 28 jours.

On conclure l'augmentation de masse après 28 jours d'immersion des différents bétons dans les trois milieux de conservations : l'eau de Sabkha, la solution de(5 % $MgSO_4$) et l'eau à chaux.(figure III.8)

On observe pour l'ensemble des éprouvettes du béton que le gain en masse dans le cas de l'immersion en eau à chaux est inférieur au gain mesuré sur les éprouvettes immergées en solutions sulfatique. En comparons les résultats de l'augmentation de masse des échantillons immergés en l'eau de Sabkha et la solution (5 % $MgSO_4$), nous constatons que l'augmentation en masse de la solution est plus élevée par rapport a celle de l'eau de Sabkha.

III.4. Conclusion :

Grâce à des résultats expérimentaux obtenus, nous concluons que la fine calcaire a un effet positif sur les propriétés mécaniques et l'effet est quelque peu acceptable pour la durabilité du béton dans des milieux agressif a jeune âge.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners at the top and bottom. The text is centered within this border.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de valorisation des matériaux locaux comme le calcaire et l'influence de l'addition (fine de calcaire broyé) a été étudiée et discutée à partir des nombreux essais sur le béton. Pour chacune d'elles, la performance mécanique à différentes échéances pour différents taux de substitution est analysée

Ce groupe d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant les performances des bétons avec additions particulièrement la fine de calcaire et leur résistivité au sulfate et chlorure et par conséquent leur durabilité dans les milieux agressifs.

On confirme aussi que le fine de calcaire résistant au sulfate et chlorure

On conclue aussi que : L'ajout de fine de calcaire broyé broyé au béton contribue à l'amélioration de sa performance mécanique et par conséquent à sa durabilité.

La surface spécifique de fine de calcaire broyé améliore les caractéristiques mécaniques et durabilité des bétons.

Recommandations et perspectives :

afin de compléter cette étude et de cerner de près les lois qui réagissent le comportement du béton au fine de calcaire broyé, nous recommandons pour un travail

futur, d'aborder les points suivants :

- 1-** Prolonger la durée des tests plus que 06 mois pour pouvoir signifier l'effet des différents milieux sur la durabilité de béton.
- 2-** Voir l'effet de la finesse du fine de calcaire sur les différentes propriétés
- 3-** Effet de fine de calcaire broyé au béton sous un traitement thermique.

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, resembling a rolled-up document. The text is centered within the scroll.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [1] BENAÏSSA A. «Les liants» cours de 1^{ère} année magistère, Génie civil option matériaux à l' USTMB d'Oran, 2005/2006
- [2] VIALIS-TERRISSE H. «Interaction des silicates de calcium hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins analogie avec les argiles».Thèse de doctorat, université de bourgogne, France, 2000.
- [3] Guillon E. « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles».Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [4] C. RICHET, C. GALLE, P. LE BESCOP, H. PEYCELON, S. BEJAOUÏ, I. TOVENA, I. POINTEAU, V. L'HOSTIS, P. LOVERA. «Synthèse des connaissances sur le comportement a long terme des bétons application au colis cimentes». Rapport CEA-R-6050, commissariat à l'énergie atomique2004.
- [5] N. BOUZOUBAA, S. FOO, «Utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton : guide des règles de l'art » programme des minéraux et des métaux du plan d'action 2000, Canada, 2005.
- [6] LARRARD F. «Construire en béton l'essentiel sur les matériaux »presse de l'école nationale des ponts et chaussées France, 2002.
- [7] NORMAN F. MACLEOD «Synthèse des données sur l'emploi d'ajouts cimentaires dans le revêtement de chaussée en béton exposés aux cycles de gel dégel et au produits chimiques de déglacage»Cément association of canada, 2005.
- [8] R. DUPAIN, R. LANCHON, J .C SAINT-ARROMAN «Granulats, Sols, Ciments et Bétons» 2^{ème} édition, Casteilla, 2000.
- [9] ASTM C618-03«Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete», 2003.
- [10] KAID N. «Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques».Thèse de magistère génie civil à l'USTMB d'Oran, 2000.
- [11] Dreux G., Festa J. « Nouveau guide du Béton». 7^{ème} édition Eyrolles, 1995.
- [12] BRAHMA A. «Le Béton » université de Blida office des publications universitaires, 1992.
- [13] ASTM C989-04, «Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars », 2004.
- [14] Mémoire de [Ramdhan]

- [15] SENHADJI Y. « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) ». Thèse de magistère génie civil, USTMB, Oran, 2006.
- [16] NONAT A. « Interactions between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate ». *Materials and structures*, 1994.
- [17] M. REGOURD H. HORNAIN. Applications de la microscopie électronique à balayage. *Revue des matériaux de construction*, 693 : 73–87, 1975.
- [18] R.F. FELDMAN P.J. SEREDA. A model for hydrated Portland paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Materials and Structures*, 6 : 509–519, 1968.
- [19] David PLANEL « Les effets couplés de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des Bétons » Thèse de doctorat en génie civil, Université de Marne La Vallée, France, 2002.
- [20] G. ARLIGUIE, H. HORNAIN « Gran Du Bé: Grandeurs associées à la durabilité des bétons », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 2007.
- [21] TAGNIT-HAMOU A. , PETROV N. (2000) “Durability of Concrete in a Very Aggressive Environment”, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy*, Montréal, Québec, Canada, 29 avril au 4 mai, pp 420-430.
- [22] COLLEPARDI M. (janvier 1999) –« Damage by Delayed Ettringite Formation » ,
- [23] TAGNIT-HAMOU A. ET PETROV N., « Attaques externes et internes par les sulfates ; similarités et différences », rapport industriel, données non publiées. *Concrete International*, p. 69-74.
- [24] : YEGINOBALI. A., and F.T. Dilek, « Sulfate resistance of mortars containing 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)*.
- [25] : 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.
- [26] : 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).
- [27] : L. Krajci., , “Utilization of natural Zeolite in Portland Pouzzolan cement of increased sulfate resistance”, *In durability of concrete, Proceeding, Fifth International Conference, Barcelone, Spain, Vol.1, pp 223-236, (2000)*.
- [28] : Paul J, Tickalsky, Della Roy, Barry Sceetz, Tara Krize : « Redefining cement characteristics for sulphate-resistant Portland cement », *Cement and Concrete Research* 32, 2002, pp, 1-8.

- [29] : 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).
- [30] : D.M. Mulenga, J. Stark, P. Nobst “Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash”, *Cement & Concrete Composites* 25, pp 907–912, (2003).
- [31] : 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).
- [32] : L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas “Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended” cements *Cement and Concrete Research*, (2004).
- [33] : 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.
- [34] : 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.