

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –
Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Civil



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

جامعة محمد البشير الإبراهيمي
برج بوعريريج
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de fin d'étude

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME : Master

Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux

THEME :

L'EFFET DE L'EAU DE BARRAGE SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON

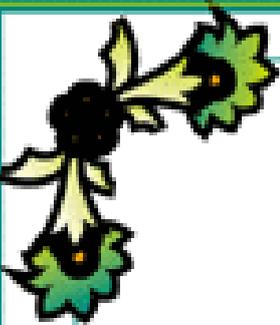
Préparé par : ROUANE Brahim
SILEM Hichem

Soutenu le : 23/06/2016

Devant le jury composé de :

Mr. ATTIA A/Kader	Président
Dr. MESSAOUDENE Ibrahim	Encadreur
Mr. NOUI Ammar	Examineur
Mdm. DJELOULI Chafia	Examineur

Promotion : 2015/2016



Remerciements

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

Nous remercions Dr. MESSAOUDENE.I pour le suivi et l'encadrement qui nous à apporté.

Tout les enseignants de département Génie Civil surtout Mr LOGZIT.N le chef de département pour leurs encouragements permanents pour terminer nous études.

Nous voudrions remercier l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

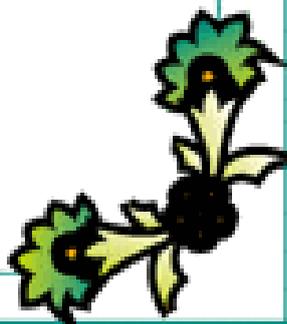
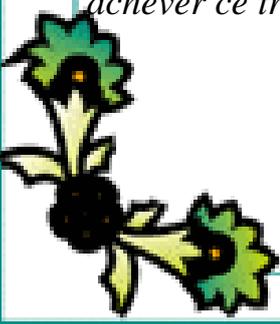
Mr. ATTIA A/Kader, Mr. NOUI Ammar et Mdm. DJELOULI Chafia

Nous associons à ces remerciements l'ensemble de nos enseignants de tous les cycles qui ont contribué à notre formation, en particulier Mr BENOUADAH. A et Mr KESSAL .O pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du laboratoire génie-civil à l'université de Bordj Bou-Arreridj pour leurs soutiens et leurs encouragements permanents, en particulier Mr ZOUBIR, Mr FARID et Md FATIHA.

En fin, tous nos amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou loin pour achever ce travail.

MERCI.....



Dédicace

Je dédie ce modeste travail au premier degré à ceux qui sont plus chers à moi

Mes très chers parents pour leur amour et patience et qui n'ont pas cessé de m'encourager durant ma vie d'étude.

Vraiment je suis très fière et très heureux pour dédie ce mémoire du profond de mon cœur a les pupilles de mes yeux :

Ma perle précieuse qui n'a jamais cessé de me témoigner tendresse et affection depuis ma naissance jusqu'à ce jour pour me voir réussir dans ma vie ma *mère* .

A mon soutien et mon appui dans la vie, le meilleur père sur cette terre, qui fait tout le possible pour m'aider

dans mes études et éclairé ma vie mon diamant *HICHEM*.

A mes très radieux et agréables frères *Amar, Nadir, Mounir, Mostafa*.

A mes très chères et jolies sœurs *Souad, Wahiba, Fatima*.

A toutes ma famille chacun par son nom

Surtout

Anfel, Farah, Achwek, Mohamed

A ma personne adorée et mon ravissant binôme :

Silem Hichem

Qui ma fait le plus grand plaisir de travailler et de vivre les moments de la réussite et grâce a son amitié qui me permet de réaliser d'avantage ce dont je suis capable.

A mes mes meilleurs amis

Hichem.S/ Oussama.D / Farid.B / Bilel.A / Souhil.K /Khalil.S

Et tous les étudiants de génie civil .spécialement master 2 promo 2016

Et enfin à ceux que j'aime et qui m'aime.

R.Brahim...

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et l'unique qui m'a offert le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie.

Je dédie ce travail :

A mes parents et à toute ma famille qui m'ont soutenu non seulement durant la préparation de ce travail, mais aussi dès le premier jour que j'ai vu la lumière de ce monde.

A Brahim Rouane, mon cher ami et binôme.

A tous mes amis.

A mes collègues de promo master 2 génie civil.

A tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

S.HICHEM....

Résumé

RÉSUMÉ

Les sulfates sont connus comme la deuxième cause de dégradation des ouvrages en béton après la corrosion des armatures. Plusieurs études ont expliqué les phénomènes de dégradation du béton dans des milieux sulfatiques, toutefois l'étude de l'effet du sulfate d'aluminium n'est pas bien connue. Le Sulfate d'aluminium est principalement utilisé comme agent flocculant dans la purification de l'eau potable (Barrages) et des stations d'épuration d'eau, et aussi dans la fabrication du papier. C'est dans ce sens, que nous avons essayé dans ce travail expérimental de contribuer à la compréhension de l'influence du sulfate d'aluminium sur les propriétés mécaniques des bétons.

Des éprouvettes de béton 10x10x10cm³ sont confectionnées à bases de deux types de ciments : CPA à faible teneur en C₃A et CPJ. Les échantillons sont démoulés après 24h et conservés dans l'eau à 20°C pendant 28j, puis ils sont conservés en salle climatisée (25°C, 50%HR) jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite, ils sont conservés l'éprouvettes témoin 02 mois dans l'eau potable et les autres 2 mois dans :

- *Dans une solution de sulfate d'aluminium à 25mg/l*
- *Dans une solution de sulfate d'aluminium à 2500mg/l*

L'effet de la concentration en sulfate d'aluminium, sur l'évolution de résistance à la compression et sur la profondeur de carbonatation été étudié. L'évolution des phases cristallines des pâtes de ciment durci a été suivie par diffraction aux rayons X.

Les résultats obtenus montrent que malgré des concentrations fortes en sulfates d'aluminium, la résistance des bétons étudiés n'a pas été affectée, au contraire, une amélioration des résistances est enregistrée surtout avec le ciment CRS. Cela confirme sa résistance élevée aux sulfates.

Mots clés: Béton, sulfate d'aluminium, barrage, carbonation, résistances.

Résumé

ABSTRACT

The sulfates are known as the second cause of degradation in concrete constructions after the corrosion of the reinforcements. Several studies explained concrete degradation phenomena in sulfate medium, however the study of the effect of aluminum sulfate is not well-control. The aluminum Sulfate is mainly used as flocculating agent Portable water purification (dams) and water treatment plants, and also in the manufacture paper. It is in this sense that we have tried in this experimental work to contribute to the comprehension of aluminum sulfate effect on the mechanical properties of the concretes. Concrete 10x10x10cm³ specimens are made at bases of two types of cements: CPA with low content of C₃A and CPJ. These specimens are demoulded after 24 h and preserved in water at 20°C during 28j, then they are preserved in room air-conditioned (25°C, 50%HR) until constant mass. Then, they are conserved 02 months in water and 2 months:

- In aluminum sulfate solution with 25mg/l*
- In aluminum sulfate solution with 2500mg/l*

The effect of the aluminum sulfate concentration, on the evolution of compressive strength and on the carbonation depth are studied. The evolution of the crystalline phases of the pastes cement hardened was followed by diffraction to x-rays.

The results obtained show that despite strong concentrations of aluminum sulfates, the resistance of the studied concretes was not affected, on the contrary, an improvement of resistances is recorded especially for CRS cement. That confirms its resistance rose to sulfates.

Key words: *Concrete, sulfate of aluminum, dams, carbonation, strength.*

Sommaire

Sommaire

Introduction

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1

Etude Bibliographique

1.1 MATERIAUX BETON :	3
1.1.1 Définition de béton :	3
1.1.2 Classification des bétons :	3
a) Selon la masse volumique :	3
b) Selon la classe de consistance :	3
c) Selon la résistance caractéristique à la compression :	4
1.1.3 La composition du béton:.....	4
1.1.3.1. Le ciment :.....	4
1.1.3.2 compositions des ciments :	5
1.1.3.3 Le clinker (K) :.....	5
1.1.3.4 Le laitier de haut fourneau (S) :.....	6
1.1.3.5 Les autres constituants des ciments :	7
a) les cendres volantes siliceuses (V) et calciques (W) :	7
b) les fumées de silices (D) :	7
c) Les calcaires (L et LL) :	7
d) Les pouzzolanes naturelles (Z) et calcinées (Q) :	7
e) Les schistes calcinés (T) :	7
1.1.3.6 Les constituants secondaires :	8
1.1.3.7 L'eau de gâchage	8
1.1.3.8 Les granulats :	8
1.1.3.9 La pâte du ciment :	8
1.1.4 LE DURCISSEMENT DU BETON :	9
1.1.4.1 Propriétés des bétons :	9
1.1.4.1.1 Le béton frais :	9
a) Propriétés du béton frais :	9
a.1) Affaissement au cône d'Abrams :	9

Sommaire

a.2) La masse volumique du béton frais :.....	9
1.1.4.1.2 Le béton durci :.....	9
a) Propriétés du béton durci :.....	9
a.1) Résistance à la compression :	10
1.1.5 FORMULATION DU BETON	10
1.2 L'HYDRATATION :.....	10
1.2.1 Description du mécanisme de l'hydratation:.....	10
1.2.1.1 L'hydratation du ciment:.....	11
1.2.1.2 Hydratation des composants du ciment portland :.....	12
a) Réactions d'hydratation du clinker :.....	12
b) Hydratation du silicate tricalcique C_3S et du silicate bi calcique C_2S :... ..	13
c) Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A :... ..	15
d) Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF :... ..	16
1.3 LA POROSITE DU MATERIAU:.....	17
1.3.1 Géomètre et positionnement des pores :.....	17
1.3.2 Tailles des porosités:.....	18
1.3.3 Phénomènes de transfert dans les matériaux poreux-cas des matériaux cimentaires :..	19
1.4 LA CARBONATATION:.....	20
1.5 LES BARRAGES :.....	21
1.5.1 Les différents types de barrages :.....	22
1.5.2 Le traitement de l'eau de barrage :.....	22
1.6 LA DURABILITE DU BETON DANS LES EAUX AGRESSIVES:.....	23
1.6.1 Mécanisme de dégradation du béton :... ..	24
1.6.1.1 Les divers agents agressifs :... ..	24
a) les gaz:	24
b) les liquides organiques et inorganiques :	24
c) les solides:.....	24
d) les milieux biologiques :	24
1.6.1.2 Divers modes d'action des agents agressifs :.....	24
a) Mode d'action des gaz :.....	24
b) Mode d'action des liquides :.....	24
c) Mode d'action des solides :	24
d) Mode d'action des agents biologiques :	24
1.6.1.3 Mécanisme de l'interaction entre les agents agressifs et les constituants	

Sommaire

du béton :	25
a) Dissolution :	25
b) Hydrolyse :	25
1.6.1.4 Réaction entre le milieu environnant et la pâte du ciment hydraté :	25
a) formation de sels de calcium solubles :	25
b) Formation de sel de calcium non expansif :	26
c) Substitution d'ions calcium dans les silicates hydratés :	26
1.6.2 Durabilités du béton dans les environnements acides (risque de dissolution) :	26
1.6.2.1 Durabilité du béton dans les eaux naturelles :	26
1.6.2.2 Eau pure et eau douce :	27
1.6.2.3 Pluies acides (cas extrêmes des eaux douces) :	29
1.6.2.4 Durabilité du béton au contact de milieux acides :	29
1.6.3 Durabilité du béton dans les environnements sulfatiques :	30
1.6.3.1 Processus d'attaque par les sulfates seuls :	30
a) formation du gypse dit secondaire :	30
b) réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium :	31
1.6.3.2 Les sulfates les plus agressifs vis-à-vis du béton :	31
a) Les sulfates de magnésium :	31
b) Les sulfates de calcium :	32
c) L'acide sulfurique et le sulfate d'ammonium :	32
1.6.4 Les attaques internes par les sulfates :	36
1.7 ORIGINE DES SULFATES :	37
1.8 SOURCE DES ACIDES :	38

CHAPITRE 2

Matériaux, Matériels et Méthodes d'essais

2.1 INTRODUCTION :	40
2.2 CIMENT :	40
2.2.1 La composition chimique du ciment :	41
2.2.2 La Composition minéralogiques du ciment :	42
2.2.3 Les Caractéristiques physiques des pâtes de ciment :	42
2.3 GRAVIER :	43

Sommaire

2.3.1 La masse volumique :	43
2.3.2 Analyse granulométrique par tamisage :	45
2.3.3 La porosité :	47
2.3.4 La compacité :	47
2.3.5 L'indice des vides :	48
2.3.6 Degré d'absorption d'eau :	48
2.4 SABLE :	48
2.4.1 La masse volumique de sable :	48
2.4.2 Analyse granulométrique par tamisage :	50
2.4.3 Module de finesse :	52
2.4.4 Equivalent de sable :	52
2.4.5 La porosité:	54
2.4.6 La compacité :	54
2.4.7 L'indice des vides :	54
2.5 EAU DE GACHAGE :	54
2.6 FORMULATION DE BETON :	54
2.6.1 Présentation de la méthode de formulation :	55
a) Définition du rapport (C/E):	55
b) Détermination de la dépense en eau:	56
c) Détermination de la dépense en ciment :	56
d) Détermination de la dépense en gravier :	56
e) Détermination de la dépense en sable :	57
2.6.2 Calculs des composants :	57
2.7 TECHNIQUES EXPERIMENTALES :	59
2.7.1 Le Malaxage :	60
2.7.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	60
2.7.3 Moulage et démoulage :	60
2.7.4 Conservation des éprouvettes :	61
2.7.5 Conservation des éprouvettes dans l'eau :	61
2.7.6 La résistance à la compression (essai d'écrasement):	61
2.8 LE MILIEU AGRESSIF :	62
2.8.1 Sulfates d'aluminium :	62
2.8.2 Méthode de préparation de la solution agressive :	63
2.9 ESSAIS DE DURABILITE :	63

Sommaire

2.9.1 pH de la surface de l'échantillon :.....	63
2.9.2 La perte de masse de l'échantillon :.....	64
2.9.3 Evolution des dimensions de l'échantillon :.....	64
2.9.4 Analyse par diffraction X :.....	65
2.9.5 Analyse par microscopie MEB :.....	66
2.10 CONCLUSION :.....	66

CHAPITRE 3 Résultats et Discussions

3.1 INTRODUCTION :	68
3.2 LA MASSE VOLUMIQUE :	68
3.3 RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON TEMOIN :	69
3.4 ESSAIS DE DURABILITE :	70
3.4.1 Evolution de la masse des éprouvettes :	70
3.4.2 L'influence de la solution sulfatique sur l'alcalinité de la matrice cimentaire :	72
3.5 L'INFLUENCE DE LA SOLUTION SULFATIQUE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES :	75
3.6 OBSERVATIONS VISUELLES :	77
3.7 ANALYSE PAR DIFFRACTION X :	78

Conclusion et perspectives

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	79
Références Bibliographique	
Annex	

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Etude Bibliographique

Tableau 1.1 : Classes de consistance	3
Tableau 1.2 : Classes de résistance du béton	4
Tableau 1.3 : Classification des ciments suivant leur composition	5.
Tableau 1.4 : Composition du cru pour la fabrication du clinker, d'après	6
Le tableau 1.5 : La solubilité de la portlandite pour des températures courantes.....	28

CHAPITRE 2

Matériaux, Matériels et Méthodes d'essais

Tableau 2.1 : Analyse chimique élémentaire du ciment CPJ (% massique).....	41
Tableau 2.2 : Analyse chimique élémentaire du ciment CPA (% massique.).....	41
Tableau 2.3: Composition minéralogique du clinker (CPA) (% massique).....	42
Tableau 2.4 : Résultats des essais physiques sur les ciments.....	42
Tableau 2.5 : Masse volumique apparente du gravier.....	43
Tableau 2.6 : Masse volumique absolue du gravier.....	45
Tableau 2.7 : Tamis utilisés pour le tamisage des graviers.....	45
Tableau 2.8 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) et (8/16).....	46
Tableau 2.9 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier.....	48
Tableau 2.10 : Degré d'absorption d'eau des agrégats le gravais (3/8), (8/16).....	48
Tableau 2.11 : Masse volumique apparente du sable.....	49
Tableau 2.12 : Masse volumique absolue du sable.....	50
Tableau2.13 : Tamis utilisés pour le tamisage du sable.....	50
Tableau 2.14 :L'analyse granulométrique de sable.....	51
Tableau 2.15 : Modules de finesse du sable	52
Tableau 2.16 : Résultats d'essai d'équivalent de sable testé.....	53

Liste des tableaux

Tableau 2.17 : La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable.....	54
Tableau 2.18 : Valeurs des coefficients A et A'.....	55
Tableau 2.19 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton	56
Tableau 2.20 : Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment	57
Tableau 2.21 : Masse volumique des matériaux.....	58
Tableau 2.22 : Dépense en matériaux pour 1 m ³	59
Tableau 2.23 : Dépense en matériaux pour un mélange.....	59
Tableau 2.24 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône	60
Tableau 2.25 : fiche technique du sulfate d'aluminium utilisé dans le barrage Ain-Zada.....	62

CHAPITRE 3

Résultats et Discussions

Tableau 3.1 : Propriétés physiques de bétons à l'état frais.....	68
Tableau 3.2 : Résistances à la compression du béton témoin.	69
Tableau 3.3 : Perte de masse dans les solutions de sulfate d'aluminium.....	71
Tableau 3.4 : Profondeur de carbonatation de béton.....	72
Tableau 3.5 : Résistances mécaniques des bétons immergés dans la solution de sulfate d'aluminium.....	75

Liste des figures

CHAPITRE 1

Etude Bibliographique

Figure 1.1 : Cinétique globale de l'hydratation de ciment	13
Figure 1.2 : Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage	14
Figure 1.3: MEB Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton Mitani, 2003	14
Figure 1.4 : Ettringite primaire bien cristallisée ne provoquant pas d'expansion	16
Figure 1.5 : Ettringite massive dite «mal cristallisée» formée en milieu confiné	16
Figure 1.6 - Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte	17
Figure 1.7 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires	18
Figure 1.8. Coupe théorique d'un mur en béton.....	20
Figure 1.9 : Détermination de la profondeur de carbonatation	21
Figure 1.10: Mode d'action du CO ₂	27
Figure 1.11: Echantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif.....	32
Figure 1.12: Micrographe d'une pâte dégradée par la réaction avec le magnésium.....	33
Figure 1.13: Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par le sulfate d'ammonium ..35	
Figure 1.14: Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par l'acide sulfurique	35

CHAPITRE 2

Matériaux, Matériels et Méthodes d'essais

Figure 2.1 : Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/16).....	47
Figure 2.2 : Courbe granulométrique du sable.....	51
Figure 2.3 : Diffractomètre.....	65
Figure 2.4 : Méthode de préparation d'échantillon pour DRX.....	66

CHAPITRE 3

Résultats et Discussions

Figure 3.1 : Masse volumique des deux bétons utilisés.....	69
Figure 3.2 : Résistances en compression du BO ₁ du BO ₂	70
Figure 3.3 : Évolution de la masse des éprouvettes de béton immergées dans les solutions Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O [25 mg/l] et [2500 mg/l].....	71
Figure 3.4 : Evolution des profondeurs dégradées des bétons immergés dans la solution Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O.....	73
Figure 3.5 : Mesure de pH par la phénolphtaléine : béton dans la solution Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O.....	74
Figure 3.6 : Evolution de la résistance en compression dans la solution de sulfate aluminium Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O.....	76
Figure 3.7 : Variation de la résistance en compression.....	76
Figure 3.8 : Observations visuelles de la surface des éprouvettes de béton immergées dans les solutions de sulfate d'aluminium.....	77
Figure 3.9 : Diagramme de diffraction X de poudre de pâte de ciment témoin à base de ciment CPJ.....	78
Figure 3.10 : Diagramme de diffraction X de poudre de pâte de ciment à base de ciment CPJ immergé dans Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O à 2500mg/l.....	78

Notations :

- CaCO_3 : Carbonate de calcium.
- C_3A : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminate tricalcique.
- C_4AF : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Alumino- ferrite tétracalcique.
- C_2S : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicate bicalcique.
- C_3S : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicate bicalcique.
- C-S-H : Les silicates de calcium hydratés.
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$: La chaux hydratée (la portlandite).
- CEM I : Un ciment portland artificiel (CPA).
- CEM III : Un ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM V : Un ciment au laitier et aux cendres (CLC).
- CPJ : Ciment portland composé.
- CRS : Ciment résistant au sulfate.
- CPA : ciment portland artificiel
- CaO : Oxyde de calcium.
- SiO_2 : Oxyde de silicium.
- Al_2O_3 : Oxyde d'alumine.
- Fe_2O_3 : Oxyde de fer.
- K_2O ; Na_2O : Les oxydes alcalins.
- (SO₃) : L'anhydride sulfurique.
- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$: Sulfate d'aluminium hydrate.
- ρ : masse volumique apparente.
- γ : masse volumique absolue.
- M_H : La masse du matériau saturé d'eau.
- M_S : La masse du matériau sec.
- MF : module de finesse du sable.
- E_s : équivalent de sable.
- ρ_{app} : la masse volumique apparente.
- SSB : Surface Spécifique Blaine.

γ	: Masse volumique en g/cm ³ .
Rb	: classe du béton.
Rc	: activité ou classe du ciment.
A, A'	: coefficients de la qualité
D _{max}	: Diamètre maximal du gros granulat.
R _c	: la résistance du béton.
F	: charge de rupture.
S	: section de l'éprouvette.
BT	: béton témoin.
e (%)	: indice des vides.
P (%)	: porosité.
C (%)	: compacité.
A (%)	: degré d'absorption.



Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'attaque du béton par les sulfates est un processus très complexe et plusieurs facteurs tels que, le type de ciment, le type de cation lié au sulfate, la concentration en sulfate, les ajouts minéraux utilisés et la période d'exposition peuvent affecter la résistance des bétons.

Plusieurs travaux [1-6] ont étudié la détérioration du béton dans des environnements de sulfate, des solutions de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et de sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$. La modification de la structure des pores, due à la dissolution chimique ou à la précipitation, joue un rôle principal dans la cinétique de la détérioration. Il a été démontré que la peau du béton joue un rôle important dans la durabilité des matériaux cimentaires. Lorsqu'un mortier de ciment CEM I est exposé à l'acide sulfurique, une couche dense de gypse est formée. Cette couche est donc, capable de retarder le processus de dégradation en agissant en tant que couche extérieure de protection. Le gypse existe également dans les pores et les fissures proche de la zone extérieure, indiquant que l'attaque est due à une cristallisation expansive. L'effet du pH des mélanges cimentaires est considéré comme un facteur important dans l'étude de l'agressivité des sulfates [7]. L'introduction du laitier de haut fourneau granulé broyé peut consommer une grande partie de portlandite fournie par le ciment Portland lors de son hydratation. Il réduit le pH du mélange et par conséquent améliore les résistances dans les milieux agressifs acides [8]. Messaoudene and Naceri [9,10] a montré que l'augmentation de la surface spécifique de 3500 cm^2/g à 4200 cm^2/g améliore les résistances mécaniques pour les mortiers et bétons contenant jusqu'à 30% de laitier (résistances comparables à celles d'un mortier témoin sans ajouts).

Afin de réduire la consommation d'énergie et d'émissions de CO_2 et augmenter la production, les fabricants de ciment utilisent des additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane et le calcaire [11].

C'est dans ce sens que cette partie expérimentale étudie la durabilité de béton de barrage qui sont exposés à une eau traitée avec du sulfate d'aluminium. L'étude consiste à étudier des bétons confectionnés avec deux ciments différents : le CPA à faible teneur en C_3A (CRS) et le CPJ. Les échantillons sont conservés pendant 02 mois dans deux environnements de sulfate d'aluminium de concentration 25mg/l et 2500mg/l.

Notre manuscrit est scindé en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** : consiste en une revue bibliographique sur les ciments, leurs hydratations et la durabilité des matériaux cimentaires dans des milieux de sulfates.

Introduction

- **Le deuxième chapitre** : présente les différents matériaux, matériels et méthodes d'essais utilisés.

- **Le troisième chapitre** : est consacré aux résultats obtenus avec des discussions.

Les trois chapitres sont précédés par une introduction générale et suivis par une conclusion générale et perspective.



CHAPITRE 1

Etude Bibliographique

CHAPITRE 1

Etude Bibliographique

1.1 MATERIAUX BETON

1.1.1 Définition du béton

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats, et de la pâte de ciment (ciment, d'eau de gâchage et adjuvants) pour améliorer ou acquérir certaines propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle important dans le mélange [12].

1.1.2 Classification des bétons

a) Selon la masse volumique

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique [13] :

- Béton très lourd : $\rho > 2500 \text{ Kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant) : ρ entre : 1800 - 2500 Kg/m^3 .
- Béton léger : ρ entre : 500 - 1800 Kg/m^3 .
- Béton très léger : $\rho < 500 \text{ Kg/m}^3$.

b) Selon la classe de consistance

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5) conformément au tableau 1.1. La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test) [14].

Tableau 1.1 : Classes de consistance [14].

Classes de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	≥ 220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

c) Selon la résistance caractéristique à la compression

La norme **EN 206-1** [15] classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau 1.2.

Tableau 1. 2: *Classes de résistance du béton* [14].

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindriques	Résistance caractéristique minimale sur cubes
C8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

1.1.3 La composition du béton**1.1.3.1. Le ciment**

Le ciment est le constituant de base des bétons et mortiers. Ce liant hydraulique permet en effet de coller entre eux les grains de sable et les granulats. Mis au point au début du XIXe siècle, le ciment est aujourd'hui le deuxième produit de consommation courante dans le monde après l'eau, et ne cessent d'augmenter.

En Algérie on utilise comme ajout le laitier de haut fourneau, pouzzolane naturelle ou tuf...etc. Et en faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciment avec des propriétés physico-mécaniques demandées [17].

1.1.3.2 compositions des ciments

La composition des différents ciments courants disponibles sur le marché fait l'objet de la norme **EN 197-1** [16]. Cette norme définit cinq types de ciments conformément au tableau 1.3

Tableau 1.3 : Classification des ciments suivant leur composition NF EN 197- 1[16].

Type de ciment	Clinker (K) (%)	Autres constituants principaux (%)	Constituants secondaire (%)
CEM I Ciment portland artificiel (CPA)	95 à 100	0	0 à 5
CEM II Ciment portland Composé (CPJ)	65 à 94	6 à 35	0 à 5
CEM III Ciment de haut fourneau (CHF) ou (CLK)	5 à 64	36 à 95	0 à 5
CEM IV Ciment Pouzzolaniques (CPZ)	45 à 89	11 à 55	0 à 5
CEM V Ciment composé	20 à 64	26 à 80	0 à 5

1.1.3.3 Le clinker (K)

Le clinker, commun à tous les ciments courants, est un mélange de 80% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'argile (silice – alumine – oxydes de fer) cuit et broyé. La matière première est broyée et mélangée dans les proportions désirées pour former ce que l'on appelle le cru dont la composition chimique est décrite par le tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Composition du cru pour la fabrication du clinker, d'après [18].

Composé	Proportion massique		
	Mini	idéal	Maxi
CaO	60%	65%	69%
SiO₂	18%	21%	24%
Al₂O₃	4%	6%	8%
Fe₂O₃	1%	3%	8%
MgO	0%	2%	5%
SO₃	0%	1%	3%
Alcalis	0%	1%	2%

1.1.3.4 Le laitier de haut fourneau (S)

Le laitier de haut-fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dont la composition chimique dépend de sa provenance [19]. Dans le haut-fourneau porté à haute température (1600°C à 1800°C), la fonte et les scories issues du minerai de fer se séparent par gravité (densité d'environ 2,8g/cm³ pour le laitier et supérieure à 7g/cm³ pour la fonte). Le laitier, récupéré par soutirage, peut être refroidi :

- lentement, à l'air. Le matériau ainsi formé, qui cristallise généralement sous forme de ménilite ((Ca,Na)₂(Mg,Fe,Al)[(Al,Si)SiO₇]), n'a pas de propriété hydraulique et peut être utilisé comme granulats.
- rapidement, par trempe. Dans ce cas, le laitier se solidifie sous la forme d'un verre et développe des propriétés hydrauliques. Ce matériau se présente sous la forme de granulés qui ont une composition chimique proche de celle du clinker [13] :
- oxyde de calcium (CaO, 40% – 50%).
- silice (SiO₂, 25% – 35%).
- alumine (Al₂O₃, 12% – 30%).
- magnésie (MgO).
- divers oxydes en quantité quasi-négligeable (FeO, MnO, TiO₂, BaO, P₂O₅, Na₂O, P₂O).

Pour être utilisé comme liant, le laitier est alors broyé et activé.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates (AC₂H₇) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite).

1.1.3.5 Les autres constituants des ciments**a) les cendres volantes siliceuses (V) et calciques (W)**

Les cendres volantes sont des résidus de combustion des gaz de chaudière des centrales thermiques. D'une grande finesse (particules pulvérulentes), ces cendres sont récupérées lors du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des installations.

On distingue deux types de cendres volantes :

- les cendres volantes siliceuses (V) : à température ambiante, elles sont capables de fixer la chaux (propriétés pouzzolaniques, prise et durcissement par hydratation).
- les cendres siliceuses calciques (W) : présentent des propriétés pouzzolaniques mais également hydrauliques.

b) les fumées de silices (D)

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

c) Les calcaires (L et LL)

Les calcaires sont obtenus par broyage de roches naturelles contenant au moins 75% de carbonate de calcium. Lorsque les calcaires sont utilisés en tant que constituant du ciment, ils doivent également avoir des teneurs normalisées :

- en carbone organique (LL : inférieure à 0,20 % en masse ; L: inférieure à 0,50 %)
- en argile (inférieure à 1,20g/100g de calcaire).

d) Les pouzzolanes naturelles (Z) et calcinées (Q)

Les pouzzolanes sont des roches naturelles composées d'une large part de silice réactive, d'oxyde de fer et d'alumine. Elles sont généralement d'origine volcanique ou sédimentaire. Leurs propriétés pouzzolaniques sont soit naturelles, soit activées thermiquement.

e) Les schistes calcinés (T)

Les schistes sont issus de roches sédimentaires argileuses ou métamorphiques entrant dans la composition de certains ciments. Ils sont obtenus par cuisson (≈800°C) et présentent, lorsqu'ils sont finement broyés, des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques.

1.1.3.6 Les constituants secondaires

Les constituants secondaires sont soit un des composés présentés précédemment (à l'exception du clinker) ou des fines (F, poudres minérales très fines permettant de compléter la granulométrie des matériaux de base).

1.1.3.7 L'eau de gâchage

Cette eau est un ingrédient essentiel du béton, selon la norme **NF EN 1008** [20] joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur La porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la Microstructure et la cinétique d'hydratation.

1.1.3.8 Les granulats

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneau). Ils constituent : l'ossature du béton et occupent 70 à 80 % environ du volume de ce dernier.

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme

XP P18-540 [21] sont :

- fillers 0/D où $D < 2$ mm.
- sables 0/D où $1 < D \leq 6,3$ mm.
- graves 0/D où $D > 6,3$ mm.
- gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm.

1.1.3.9 La pâte du ciment

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux. La pâte du ciment se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs [22].

1.1.4 Le durcissement du béton

1.1.4.1 Propriétés des bétons

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

1.1.4.1.1 Le béton frais : Mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.

a) Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du Ferrailage [23].

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais [24].

Dans le cas de béton ordinaire [25] elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau.

a.1) Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône [26].

Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance [27].

a.2) La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage après un arasement approprié.

1.1.4.1.2 Le béton durci : Solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

a) Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois.

La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité. Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

a.1) Résistance à la compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression unie axiale a été la plus étudiée selon la norme **NF EN-12390-3** [28], vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

1.1.5 Formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance). Il existe plusieurs méthodes pour déterminer une formulation du béton :

- La méthode de scamtaiev.
- La méthode Baron.
- La méthode Bolomey.
- La méthode de Féret.
- La méthode de Faury.
- La méthode Dreux-Gorisse.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme **NF EN 206-1** [15].

1.2 L'HYDRATATION**1.2.1 Description du mécanisme de l'hydratation**

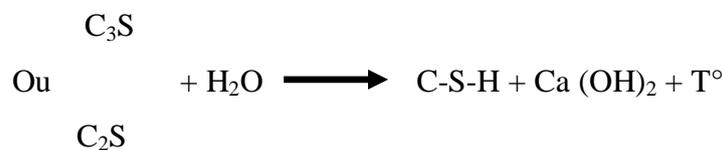
Le béton est un mélange de plusieurs composants, les agrégats, le sable, le ciment et l'eau. Parmi ces derniers, le composant le plus important est le ciment, dont la propriété essentielle est de durcir au contact de l'eau. C'est pour cette raison qu'on l'appelle le liant hydrique du béton.

[Taylor, 1990] a défini de manière générale l'hydratation du ciment par " L'ensemble des changements qui se produisent quand un ciment anhydre, ou une de ses phases constitutives, est mélangé avec de l'eau". Des que le ciment anhydre est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés du béton ainsi obtenu évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée le béton reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée [29].

1.2.1.1 L'hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (la réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps. C'est surtout l'hydratation du C_3S et du C_2S qui participent le plus au développement de la résistance, en produisant du silicate de calcium hydraté C-S-H et de la portlandite $Ca(OH)_2$ [30].

Très sommairement la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S est la suivante :



Les réactions se poursuivent lentement pendant une à plusieurs heures, le béton reste maniable. Ensuite, la pâte prend de la consistance, c'est le début de prise. Les cristaux de portlandite et du silicate de calcium s'enchevêtrent et remplissent peu à peu les pores. Le matériau devient de plus en plus dense et solide [31].

Au bout de dizaine d'heures, l'hydratation ralentisse de plus en plus, elle peut se poursuivre pendant des années, tant qu'il reste du ciment anhydre et de l'eau dans les pores capillaires. la résistance du matériau s'améliore progressivement, mais de plus en plus lentement. Au bout de quelque mois, toute l'eau est consommée par les réactions d'hydratation provoquant une dessiccation progressive des capillaires. C'est ainsi qu'on trouve encore des grains de ciment qui n'ont pas fini de réagir, dans des bétons très ancienne. On peut dans une certaine mesure empêcher cette auto- dessiccation en conservant le béton dans l'eau (cure par immersion) [31].

Les fibres de C-S-H ont la propriété de se souder à elle-même et aux parois environnantes. On peut dire qu'elles constituent la "colle " du béton. Ce sont l'origine de la résistance mécanique du béton.

La cinétique d'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente que celle du C_3S . A court terme, les silicates hydratés formés proviennent donc majoritairement du C_3S , qui a un rôle prépondérant dans les montées en résistance à court terme des bétons. L'hydratation plus lente du C_2S après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme.

1.2.1.2 Hydratation des composants du ciment portland

a) Réactions d'hydratation du clinker

L'hydratation des ciments courants peut être divisée en plusieurs phases [33] :

- la phase de « pré-induction », durant quelques minutes, correspondant au mouillage des grains,
- la phase « d'induction », ou période dormante, pouvant durer quelques heures, et pendant laquelle les réactions sont très lentes, la dissolution des anhydres étant ralentie par la couche protectrice des hydrates formés.
- la phase d'accélération, coïncidant approximativement avec le début de la prise et la croissance des hydrates.
- la phase de décélération (après 6 à 24 heures pour les ciments à base de clinker à température ordinaire), correspondant à la formation progressive de la microstructure du liant, ralentissant l'hydratation par un effet de barrière poreuse.
- et enfin, la phase finale, de densification progressive du ciment hydraté, limitée par des phénomènes de diffusion à travers les couches d'hydrates formés.

Les hydrates de la pâte de ciment sont issus de la réaction avec l'eau des différentes phases anhydres de ciment. Ces réactions, qui, en général, ne consomment pas la totalité des anhydres, ont des cinétiques différentes en fonction des phases anhydres considérées (figure1.1).

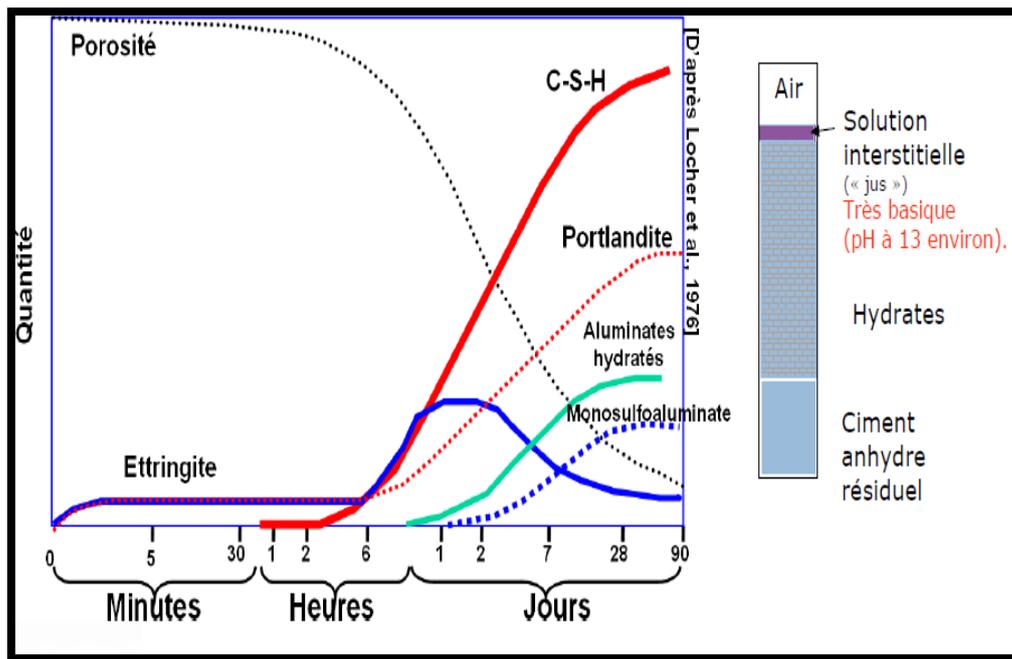


Figure 1.1 : Cinétique globale de l'hydratation de ciment [32].

Les principaux hydrates formés sont la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – CH en notation cimentière), les silicates de calcium hydratés C-S-H de formules chimiques variables, l'ettringite ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$ où $\text{S} = \text{SO}_3$) et le monosulfoaluminate de calcium ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{32}$).

b) Hydratation du silicate tricalcique C_3S et du silicate bi calcique C_2S

Le C_3S et C_2S est le constituant majeur du ciment Portland artificiel et joue un rôle important dans la formation des hydrates et la résistance mécanique. Il est représenté par le silicate tricalcique et silicate bi calcique.



Où : CSH représente le $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Silicate de calcium hydraté et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandite)).

Les mécanismes d'hydratation de C_3S et C_2S sont relativement similaires. Ils donnent Principalement des silicates de calcium hydratés ou C-S-H accompagnés de Portlandite.

- les silicates de calcium hydratés (CSH) occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Les C-S-H sont les principaux constituants de la pâte hydratée, avec la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La Portlandite demeure dans un état cristallisé ou amorphe selon l'espace qu'elle trouve pour se précipiter [34]. Par contre l'arrangement atomique du C-S-H pose encore une question ouverte [35], notamment la description détaillée de la microporosité associée au C-S-H qui reste sujette à discussion.

La majorité des chercheurs estiment que la particule élémentaire de C-S-H représente un microcristal lamellaire, la lamelle étant composée de 2 ou 3 feuilletts [36]. Ces lamelles s'enroulent sur elles-mêmes pour former des fibres tubulaires, visibles au microscope électronique dans les pâtes à E/C très élevé. Dans le modèle de [36], chacun des feuilletts de la lamelle de C-S-H se compose d'une couche d'octaèdres de chaux prise en sandwich entre deux couches de tétraèdres de silice.

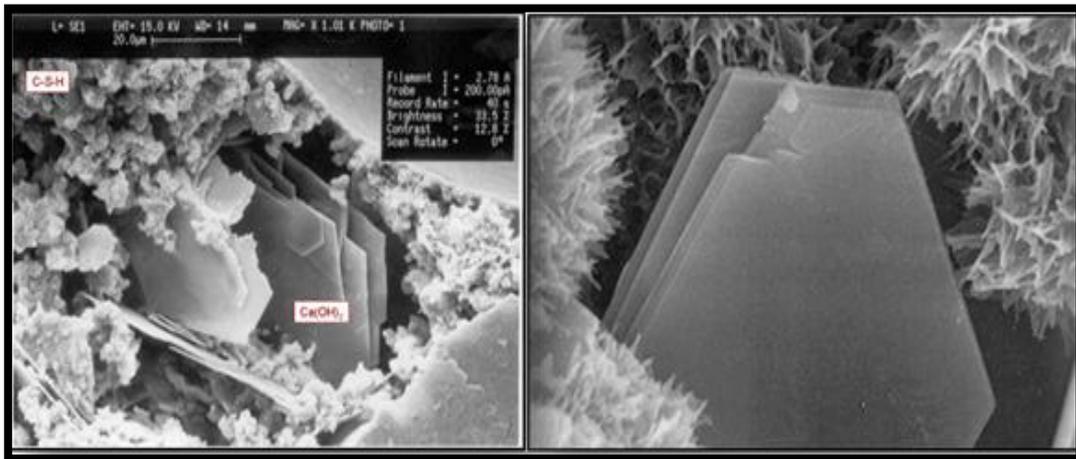


Figure 1.2 : Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage [37].

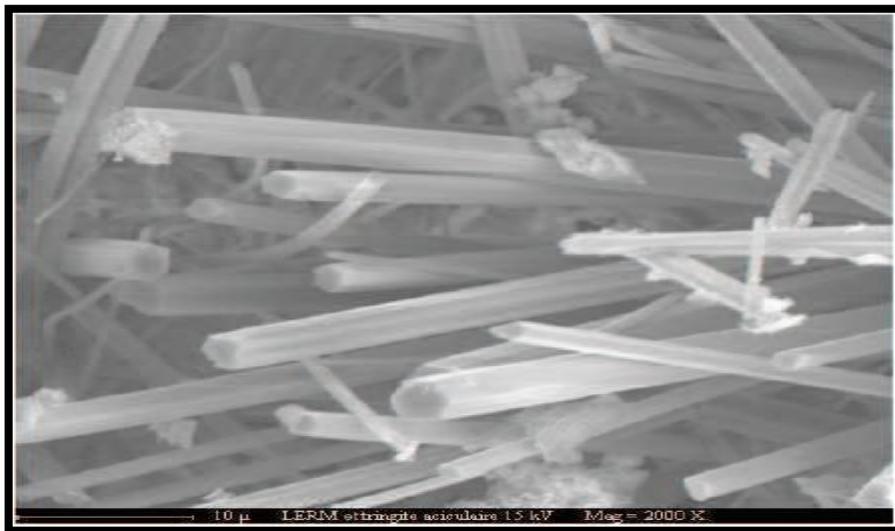


Figure 1.3: MEB Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton Mitani, 2003[29].

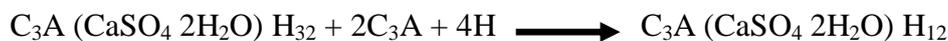
c) Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

Le C_3A , qui représente de 5 à 15% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante.

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). En l'absence du gypse, la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de « prise rapide ». En présence du gypse, les C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale. La réaction est donnée par:



Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [38]. La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [39].

Les réactions chimiques de la formation de l'éttringite sont décrites selon la réaction d'hydratation de C_3A . L'éttringite cristallise sous forme d'aiguilles (à base hexagonale), souvent rayonnant autour des grains de ciment anhydre (non expansif). La forme et la taille de l'éttringite dépendent directement de la nature des ions dans la phase interstitielle, de la concentration de $Ca(OH)_2$ et de la température ambiante. Dans certains cas, la formation d'éttringite peut s'accompagner de gonflement. Cinq explications existent concernant le gonflement de l'éttringite [40]:

- expansion par croissance cristalline,
- gonflement lié à l'absorption d'eau par les particules d'éttringite [41],
- gonflement lié à la pression de cristallisation de l'éttringite,
- expansion par pression osmotique sur une membrane semi-perméable entre la phase interstitielle et la surface des grains anhydres,
- gonflement par formation de monosulfoaluminate de calcium hydraté [42].

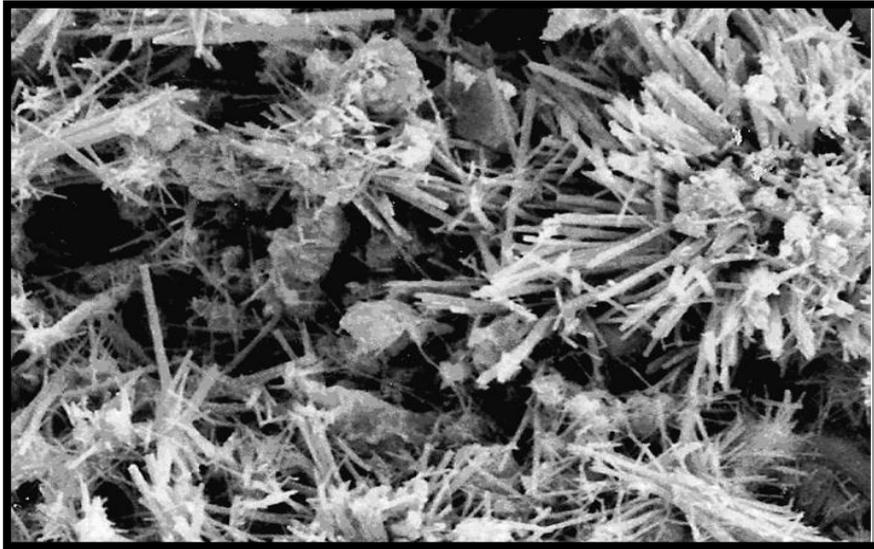


Figure 1.4 : *Ettringite primaire bien cristallisée ne provoquant pas d'expansion* [43].

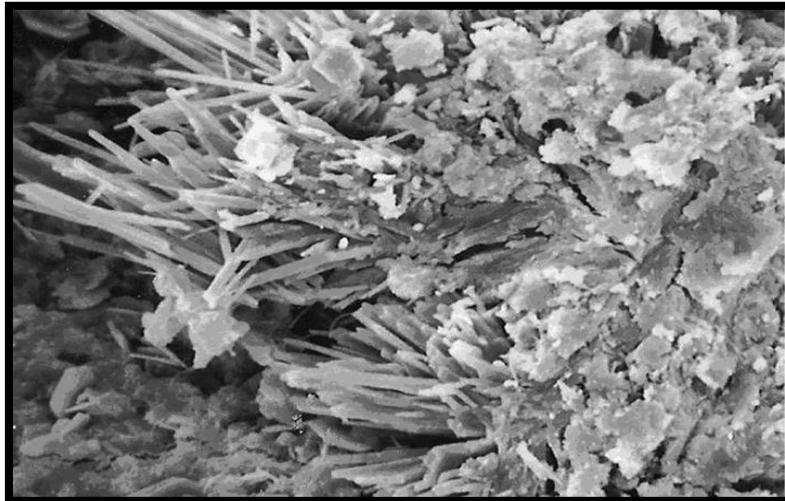


Figure 1.5 : *Ettringite massive dite «mal cristallisée» formée en milieu confiné* [43].

d) Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF

Le C₄AF représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminat de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminat. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [37].

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

1.3 LA POROSITE DU MATERIAU

Tout milieu poreux est constitué de deux domaines distincts : la charpente du milieu (bordure solide) et son complément que constitue le volume poreux. Le volume poreux est en général occupé par un fluide (eau, air, huile, méthane, dioxyde de carbone, etc.). La porosité (N) d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides [44]. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, on a alors :

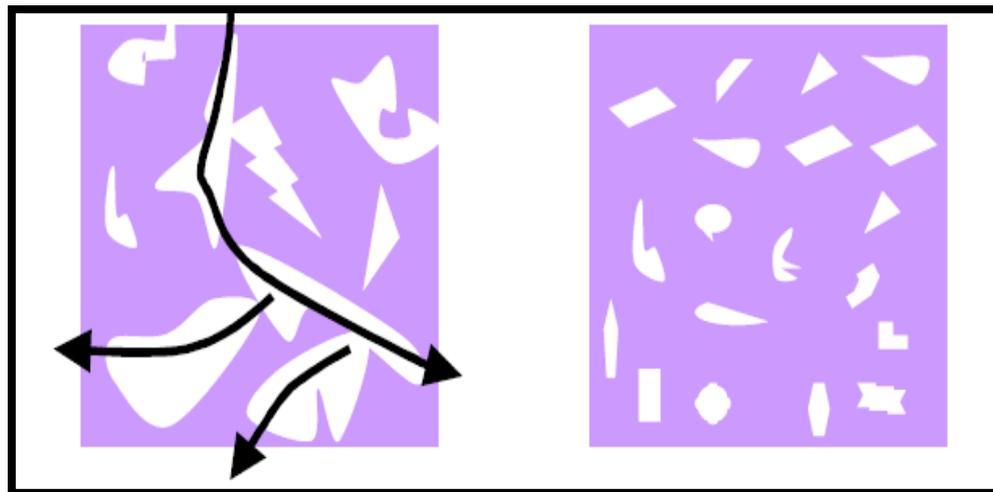
$$N(\%) = \frac{V_p}{V_t} 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} 100.$$

1.3.1 Géométrie et positionnement des pores

Ces vides se distinguent par leur forme : lorsque les formes sont convexes, globuleuses, ce sont des pores ; lorsqu'elles sont grandes, plates et étendues, ce sont des fissures. Lorsque les vides communiquent entre eux, il s'agit d'une porosité ouverte (ou libre). Lorsque les vides sont isolés, c'est une porosité occluse ou fermée.

La figure 6 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- les bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités.



Réseau de pores interconnectés
Matériau poreux perméable

Réseau de pores discontinu
Matériau poreux imperméable

Figure1.6 - Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte [45].

La porosité d'un béton apparaît comme un paramètre extrêmement important puisqu'il conditionne la rugosité de surface ainsi que la quantité d'eau potentiellement présente dans le matériau. Un matériau présentant une porosité importante offre également une surface de réaction importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact. Ceci entraîne une vitesse de dégradation potentiellement plus élevée. Par exemple, un béton de mauvaise qualité présentant initialement de nombreuses microfissures offre une surface de réaction plus importante qu'un béton sans microfissures et permet ainsi une dégradation plus importante [46]. De plus, la présence de porosités, principalement interconnectées, permet aux microorganismes de pénétrer plus facilement à l'intérieur du matériau et donc d'atteindre rapidement les zones saines [47,48]. Une porosité élevée du matériau permet donc une avance rapide du front de dégradation.

1.3.2 Tailles des porosités

Le réseau poreux des matériaux cimentaires recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre P au centimètre). La figure 1.7 présente les différents types de porosités que l'on rencontre dans les matériaux cimentaires en fonction de leur taille et de leur géométrie. Cette large gamme d'échelles de porosité impose l'utilisation conjointe de différents outils d'étude tels que la porosimétrie par intrusion de mercure ou encore la porosité totale à l'eau pour caractériser le milieu poreux.

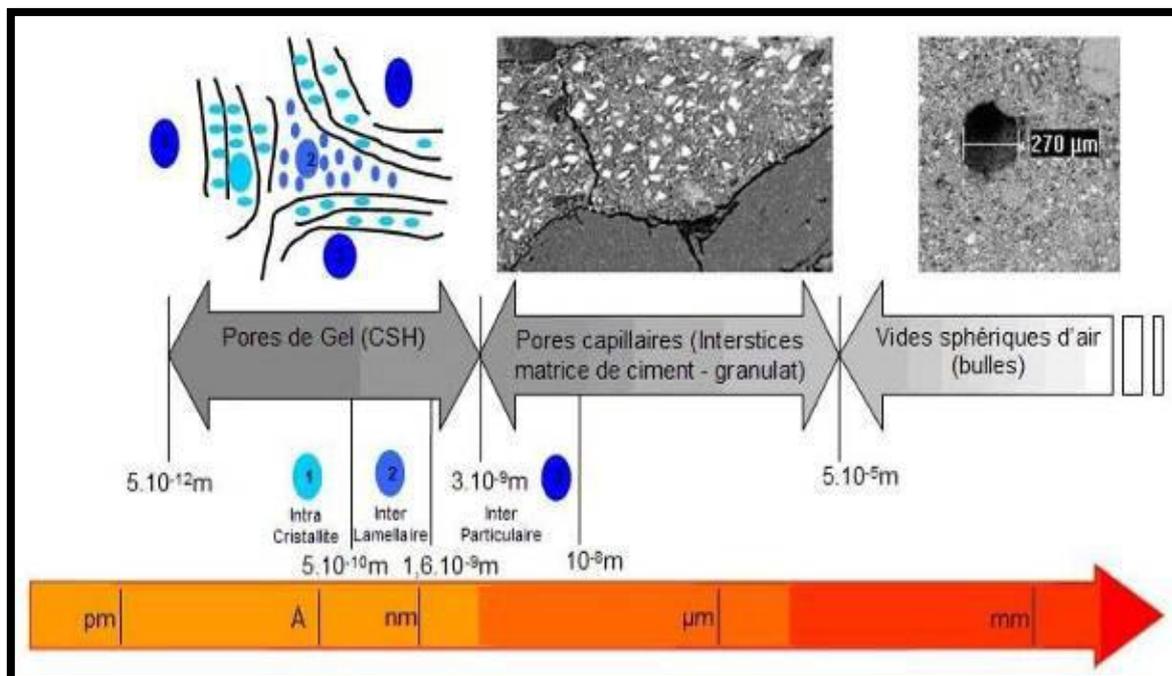


Figure 1.7 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires [49].

La porosité des matériaux cimentaires est constituée de :

- vides d'air, généralement de forme sphérique et de dimension supérieure à 50 micromètres. Ces vides sont générés par le piégeage dans le matériau à l'état frais de bulles d'air qui ne parviennent pas à s'échapper malgré le serrage (vibrations, chocs) de la pâte.
- pores capillaires, ils peuvent être modélisés sous la forme de tubes tortueux dont le diamètre varie entre 1 micromètres et 50 micromètres. Ces porosités sont liées à l'hydratation des grains de ciment ainsi qu'à la présence de granulats. On appelle « zone de transition inter faciale » (ZTI) la zone située à l'interface entre la pâte et les granulats ou tout autre élément inerte incorporé dans le matériau. Bien qu'aucune méthode précise n'existe [50] pour mesurer l'épaisseur de la zone de transition inter faciale, et que cette épaisseur dépende de plusieurs facteurs, on peut l'évaluer entre 20 et 150 μm environ.
- pores de gel, ces pores sont liés à la structure lamellaire même des CSH (silicates de calcium hydratés) et de dimension de l'ordre du nanomètre [51].

1.3.3 Phénomènes de transfert dans les matériaux poreux-cas des matériaux cimentaires :

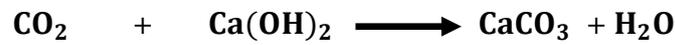
Le transport des ions agressifs dans les bétons se fait suivant deux processus principaux, superposés, par perméation des gaz et des liquides et par diffusion ionique à travers la veine liquide.

- processus de diffusion sous gradient de concentration, régi par les lois de Fick (diffusion sans interactions entre les ions diffusant) complétées par la relation de Nernst-Planck qui prend en compte les interactions entre ions ;
- processus de perméation correspondant au déplacement du fluide sous gradient de pression. Ce processus est régi par la loi de Darcy qui permet de quantifier le débit du fluide à travers le béton en fonction de la perméabilité du matériau [52].

Le transport des substances agressives se fait essentiellement par perméation et par diffusion, indicateurs majeurs de durabilité dépendant de la compacité du béton.

1.4 LA CARBONATATION

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement, un des composants des bétons durci, la portlandite et la calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité.



Dioxyde de carbone Portlandite Calcite Eau

Cette transformation s'accompagne d'une diminution de pH (le béton sain à un pH d'environ 13), ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9. A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer à l'intérieure et provoque le vieillissement de béton.

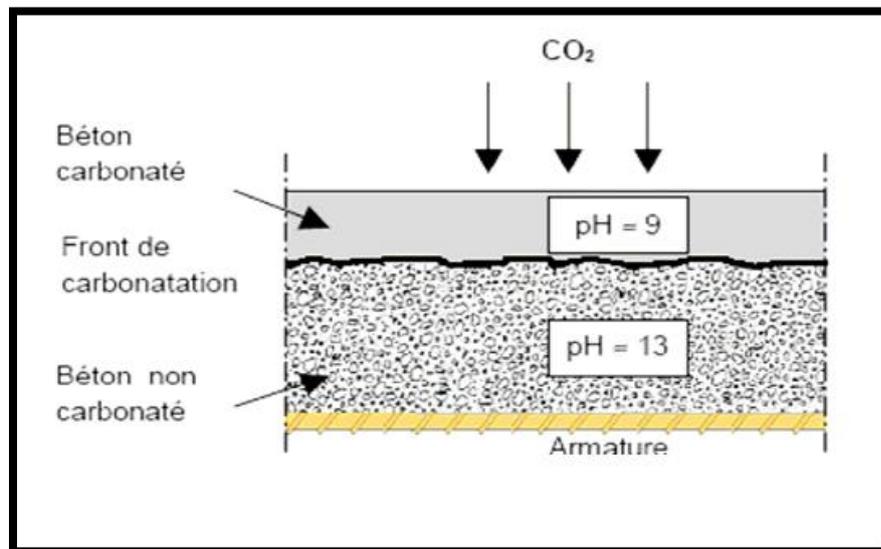


Figure 1.8. Coupe théorique d'un mur en béton.

On peut déterminer la profondeur de carbonatation par l'essai de phénophtaléine (indicateur coloré). La pulvérisation de cet indicateur, virant au rose vif lorsque le pH est supérieur à 9, permet de mettre en évidence le front carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées).



Figure 1.9 : *Détermination de la profondeur de carbonatation* [53].

1.5 LES BARRAGES

Les barrages sont des ouvrages en terre ou en béton établis au travers d'un lit de cours d'eau entre l'amont et l'aval. Ils servent à l'alimentation en eau potable, à la production d'énergie électrique.

Les crues sont des phénomènes exceptionnels. Elles peuvent être décennales, centennales ou millénaires. Elles surviennent lorsque les affluents d'un cours d'eau grossissent en même temps à cause de fortes pluies. Ainsi le cours d'eau déborde de son lit pour inonder ce qu'on appelle le lit majeur. Ces crues peuvent provoquer des dégâts sur la digue et sur les régions avoisinantes d'où la nécessité d'installation d'un évacuateur des crues.

Outre les déversoirs, des ouvrages d'évacuation sont nécessaires pour extraire l'eau du réservoir en continu. Les barrages sont généralement érigés avec des ouvrages annexes tels que : les ouvrages de prises et les ouvrages de vidange.

Cependant, les petits et moyens barrages sont très souvent équipés d'une seule conduite, en acier ou en béton [54].

1.5.1 Les différents types de barrages

La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminent le type de barrage. Les barrages sont construits en béton ou en maçonnerie; les digues (ou barrages en remblai) sont en terre ou en enrochement.

- ✓ Le barrage-voûte
- ✓ Le barrage-poids
- ✓ Le barrage à contreforts
- ✓ La digue

1.5.2 Les barrages en Algérie

L'Algérie compte plus de 60 barrages répartis sur le territoire national. La plupart servent à alimenter la population en eau potable. Parmi ces barrages, on peut citer le barrage de Ain –Zada :

Le Barrage Ain Zada est implanté sur l'oued Bousellem, 25 Km à l'ouest de Sétif ,40 Km à l'Est de Bordj Bou Arreridj et 10Km de la daïra de Ain –Taghrout.

Il permettra d'emmagasiner un volume d'eau de 121,400 Mm³ régularisant ainsi un volume 50Mm³ par an, afin d'assurer les besoins en eau potable et industrielles des populations des villes en rapide expansion de la région notamment les villes de Sétif, Bordj Bou Arréridj et EL-Eulma.

Le barrage Ain zada, de 55m de hauteur, est un barrage en enrochement avec un noyau central en argile. Il est doté d'un évacuateur de crues sans organes de réglage et d'un coursier à ciel ouvert sur l'un des cotés de la digue [55].

1.5.3 Le traitement de l'eau de barrage

La méthode utilisée pour Le traitement d'eau de barrage d'Ain-Zada c'est la floculation d'usage très répandu. Ce traitement permet de réduire la couleur et la turbidité normalement causées par les contaminants organiques et inorganiques aux niveaux acceptables pour l'eau potable ou pour les eaux usées. Le coagulant utilisé est le sulfate d'aluminium avec une quantité 25 mg/l. Les différentes expertises soulignent que l'apparition des dégradations après plusieurs années d'exposition serait attribuée aux conditions d'exposition et plus particulièrement à l'humidité.

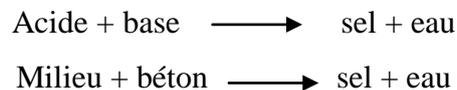
1.6 LA DURABILITE DU BETON DANS LES EAUX AGRESSIVES

En dehors des effets liés à des phénomènes proprement physiques (gel, écaillage, érosion), le béton est soumis à des agents chimiquement agressifs dont le vecteur commun est l'eau.

Les ouvrages en béton sont exposés à la pluie, à la neige, aux eaux souterraines, à l'eau de mer et à toutes solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz. Les bétons sont des solides poreux qui ont un caractère basique dû à la nature de la pâte durcie qui renferme :

- 15 à 20 (%) de portlandite (base forte)
- environ 70 (%) de CSH qui peuvent être considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte $[Ca(OH)_2]$;
- 10 à 15 (%) d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydratés
- une solution interstitielle dans les pores et les capillaires, enrichie en alcalins $[Na(OH)$ et $KOH]$ dont le pH varie de 12,5 à 13,5.

Or sauf cas exceptionnel, le pH du milieu est inférieur au pH du béton, il en résulte que le système chimique que représente la matrice cimentaire du béton est en déséquilibre avec le milieu. La réaction chimique peut s'écrire de façon simple :



Cette réaction est préjudiciable à la bonne tenue du béton si le sel formé est dénué de propriétés mécaniques, ou expansives, ou s'il est soluble.

Les observations des ouvrages ont montrés que par ordre d'importance décroissante, les causes suivantes de détérioration du béton sont :

1. corrosion des armatures suite à la contamination par les chlorures
2. action du gel dans les climats froids
3. Eaux agressives chargées en dioxyde de carbone, sulfates ou chlorures.

Cependant, un béton correctement formulé et soigneusement mis en œuvre, sera très peu poreux, par conséquent peu accessible aux fluides. Concrètement, lorsque le pH est supérieur à 6, un bon béton peut subir des altérations tolérables au cours de la durée de vie pour laquelle il a été conçu [45].

1.6.1 Mécanisme de dégradation du béton

1.6.1.1 Les divers agents agressifs :

Les agents chimiques agressifs peuvent être classés en quatre catégories :

a) les gaz: qui sont d'origine naturelle, résultant de pollutions atmosphériques et de fermentations. On peut rencontrer comme gaz:

- les dioxydes de carbone, de soufre et d'azote.
- L'hydrogène sulfuré
- Les vapeurs chlorées
- L'ammoniac

b) les liquides organiques et inorganiques : qui agissent par leur caractère acide ou basique et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.

c) les solides: qui sont soit des sols ou des déchets d'origine divers.

d) les milieux biologiques : par exemple les attaques mécaniques et chimiques par certains organismes présent dans l'eau de mer [31].

1.6.1.2 Divers modes d'action des agents agressifs

a) Mode d'action des gaz : le transfert de gaz dans le béton se fait par diffusion et dépend très fortement de l'humidité relative du béton. Il est négligeable dans le béton saturé et augmente avec la réduction de l'humidité.

Les gaz ne sont pas agressifs mais du fait de leurs solubilités, ils peuvent former avec l'eau des solutions agressives.

b) Mode d'action des liquides : les liquides peuvent faire le transfert dans le béton soit par un mouvement sous gradient de pression hydraulique ou capillarité, soit par diffusions ioniques ou moléculaires.

c) Mode d'action des solides : la nocivité des solides est liée à leur capacité d'extraction et de passage en solution dans l'eau avec lesquelles ils entrent en contact.

d) Mode d'action des agents biologiques : les réactions biologiques peuvent conduire à la production d'acides, en particulier l'acide sulfurique.

C'est l'association des agents avec l'eau (liquide ou vapeur) qui constitue la solution chimiquement agressive pour le béton [31].

1.6.1.3 Mécanisme de l'interaction entre les agents agressifs et les constituants du béton

Il existe deux modes de l'interaction entre les constituants du béton et les agents agressifs :

a) *Dissolution* :

La dissolution d'un acide, d'une base ou d'un sel dans l'eau est une réaction de dissociation totale ou partielle en ions.

La dissociation d'un acide fort, d'une base forte, des sels d'un acide fort et d'une base forte est complète ou presque complète. Ainsi, la portlandite (l'hydroxyde de calcium) Ca(OH)_2 qui est une base forte se dissocie en ions Ca^{2+} + et OH^- [31].

La solubilité de la portlandite Ca(OH)_2 dans l'eau à 25 °C est 1.15 g/l et il n'y a pas de molécule de portlandite dans la solution car la dissolution est complète :



Dans le cas d'un acide faible ou d'une base faible, la dissolution n'est que partielle.

b) *Hydrolyse* :

L'hydrolyse est le nom donné à la dissolution lorsque les ions provenant de la dissolution d'un sel d'acide faible ou de base faible réagissent sur l'eau. Cette dernière se décompose en produisant de proton H^+ (ou H_3O^+) ou d'hydroxyles OH^- .

Des phénomènes de dissolution et d'hydroxyle interviennent lorsque des eaux douces renouvelées circulent au contact du béton. La portlandite se dissout en premier en raison de sa solubilité élevée dans l'eau pure (1.2g/l à 20 °C). Ensuite, il y a décomposition des autres composés hydratés sous l'action des protons de l'eau.

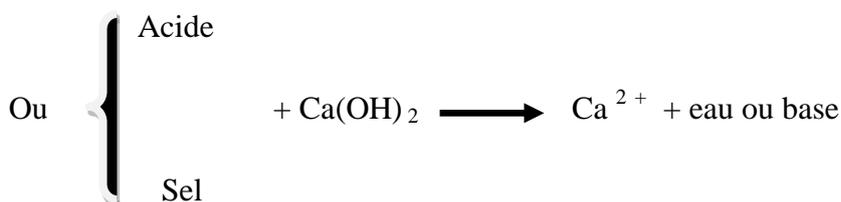
L'hydrolyse conduit à un lessivage ou à une lixiviation de la chaux des composés de la pâte du ciment durcie provoquant ainsi un accroissement de la porosité et une déstructuration progressive du liant [31].

1.6.1.4 Réaction entre le milieu environnant et la pâte du ciment hydratée :

Trois types de réactions d'altérations peuvent se présenter séparément ou simultanément :

a) *formation de sels de calcium solubles* :

Les solutions d'acides et de sels peuvent avoir une réaction avec les composés hydratés et principalement la portlandite en donnant des sels de calcium :



La dissolution progressive de la portlandite provoque une diminution de l'alcalinité, un accroissement de la porosité et une réduction de la résistance mécanique. Parmi les acides, on peut citer : les acides chlorhydriques, sulfuriques, nitriques et carboniques. Les nitrates et les chlorures (d'ammonium et de magnésium) sont les sels les plus agressifs pour le béton.

b) Formation de sel de calcium non expansif

Les anions de certains acides forment le sel de calcium insoluble ou très peu soluble qui se précipite dans les pores. Ces sels sont considérés comme peu agressifs, on peut citer par exemple les acides phosphoriques, tartriques et oxaliques.

c) Substitution d'ions calcium dans les silicates hydratés

C'est le résultat d'un échange entre les C-S-H de la pâte de ciment durcie et la solution agressive.

Les solutions de sel de magnésium peuvent remplacer progressivement les ions Ca^{2+} des C-S-H par des ions Mg^{2+} et le composé ainsi formé (Brucite) n'a pas de propriétés liantes. Lorsque la concentration d'une solution dépasse la limite de saturation, des cristaux se forment engendrant ainsi des pressions suffisantes pour provoquer la fissuration d'un matériau.

La cristallisation de composés expansifs est mise en évidence au cours de l'attaque du béton par les sulfates. En réagissant sur les constituants du ciment, ces sels donnent naissance à des composés nouveaux : le gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et l'ettringite, $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [31].

1.6.2 Durabilités du béton dans les environnements acides (risque de dissolution)

Les milieux acides susceptible d'être agressifs pour le béton débutent des eaux pures, s'étendent aux eaux douces, peu ou beaucoup chargées en dioxyde de carbone, puis aux eaux de pluie acides, acides minéraux et organique et les eaux résiduaires [31].

1.6.2.1 Durabilité du béton dans les eaux naturelles

L'agressivité d'une eau naturelle est en fonction du pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif.

-le pH d'une eau traduit son caractère acide ou basique:

Une eau est acide si elle renferme du dioxyde de carbone, des acides minéraux ou des sels d'acide fort et de base faible.

Elle sera basique si elle contient des bicarbonates, des carbonates ou des hydroxydes.

- la dureté (ou titre hydrotimétrique) d'une eau est la somme des concentrations en cations métalliques.

En France la définition du degré hydrotimétrique représente 10 mg/l de CaCO₃.

- Le dioxyde de carbone agressif représente une partie du dioxyde de carbone dissous dans toute eau naturelle :

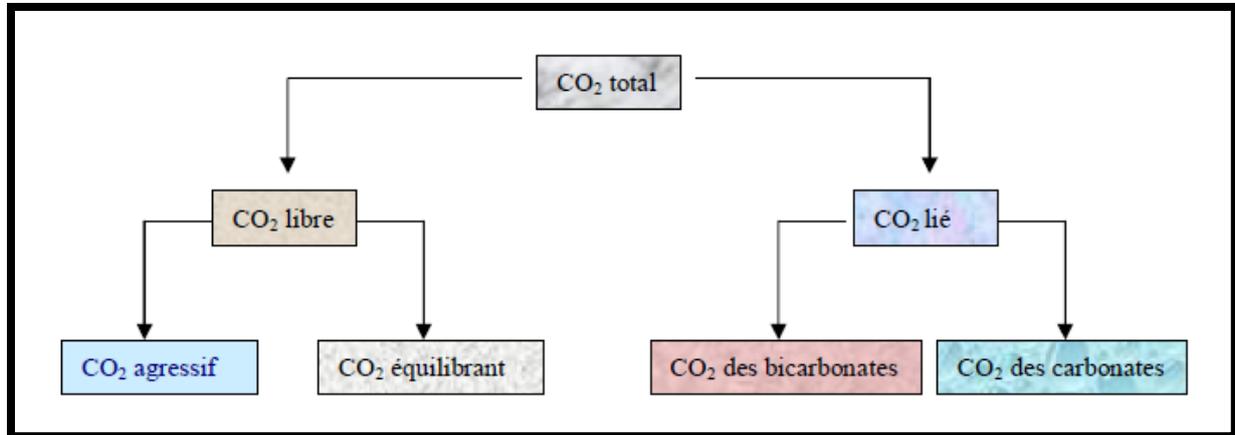


Figure 1.10: Mode d'action du CO₂ [45].

Le dioxyde de carbone équilibrant représente la quantité de dioxyde de carbone libre nécessaire pour maintenir les bicarbonates en solution, selon la relation :



Le dioxyde de carbone agressif représente le surplus du CO₂ libre par rapport au CO₂ équilibrant. La loi de Chatelier indique que l'équilibre est déplacé suivant la direction 1 : il y a dissolution du carbone d'où le CO₂ agressif qui est corrosive.

Si la teneur en CO₂ libre est inférieure à celle du CO₂ équilibrant, l'équilibre se déplace en direction 2 et il y a précipitation de carbonate [31].

1.6.2.2 Eau pure et eau douce :

Les eaux douces de titre alcalimétrique inférieur ou égale à 1 méq/l (1 méq/l = 5 degré hydrométrique et le degré hydrométrique français représente 10 mg/l de CaCO₃), de teneur en dioxyde de carbone agressif comprise entre 15 et 30 mg/l et de pH 5.5 à 6.5 sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs par la documentation AFNOR P 18 - 011. En générale, les bétons sont peu sensibles aux attaques par les eaux pures à condition qu'ils soient compacts.

Les bétons peu compacts peuvent être attaqués par les eaux pures faiblement agressives, l'attaque consiste en une dissolution de la portlandite.

Le tableau 1.5 montre que pour des températures courantes, la solubilité de la portlandite est importante.

Le tableau 1.5 : *La solubilité de la portlandite pour des températures courantes.*

Température en ° C	0	15	20	30	40	50	60
Solubilité (g/ l)	1.31	1.29	1.23	1.13	1.04	0.96	0.86

Le lessivage de la portlandite dans les eaux faiblement agressives, pH de 5 à 6 montre que la teneur en chaux diminue dans la zone superficielle, le lessivage est plus important à 20 ° C.

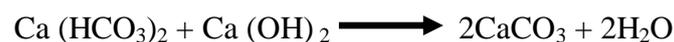
Les silicates et les aluminates moins solubles, sont attaqués plus tardivement. La dissolution de leur calcium provoque un accroissement de leur microporosité et une diminution du rapport CAO/SiO₂.

Le processus d'attaque du béton par les eaux est dû soit à la circulation des eaux à la surface provoquant une érosion progressive, soit à une percolation du liquide sous gradient de pression hydraulique. Le résultat de cette attaque est la perte de masse et d'alcalinité dues au lessivage de la portlandite provoquant une augmentation de la porosité et de la perméabilité, une chute de la résistance et une diminution de la cohésion.

Le lessivage de la portlandite est détecté visuellement par la formation à la surface du béton de concrétions, de stalactites, de coulures ou d'efflorescences blanchâtre provoquées par la précipitation de carbonate de calcium sous l'effet du CO₂ atmosphérique.

Les ciments moins riches en calcium sont plus résistants aux eaux douces. C'est le cas des ciments avec additions minérales (laitier, cendres, pouzzolane et fumées de silice) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite.

L'attaque du béton par les eaux douces chargées en dioxydes de carbone se manifeste par la dissolution de la portlandite et en degré moins des C-S-H ainsi que la précipitation de carbonate de calcium qui accroît la compacité du béton.



La précipitation de carbonate de calcium permet ainsi à nouveau la formation de bicarbonate et le processus se répète :



Comme dans le cas des bétons au contact d'eau pures, on constate que la dégradation par les eaux chargés de CO₂ est fonction de la teneur en portlandite. C'est-à-dire du type de ciment. Les bétons sont plus résistants dans le cas des ciments libérant moins de portlandite.

Il a été conclu par [31] que l'attaque par les eaux douces agressives dépend de la teneur en dioxyde de carbone agressif, des possibilités de renouvellement de l'eau, de la compacité du béton et du type de ciment. La lixiviation des ions Ca^{2+} est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux [31].

1.6.2.3 Pluies acides (cas extrêmes des eaux douces)

Les eaux de pluies « propre » ont un pH compris entre 5,6 et 7 suivant qu'elles sont conditionnées par l'ammoniac d'origine biologique ou par le dioxyde de carbone. Ces pluies n'ont pas d'effets nocifs sur les bétons.

Les pluies dite acides dont le pH peut descendre moins de 4 sont agressifs suite à la pollution par les oxydes de soufre d'origine industrielle ou domestique (combustion de charbons, carburant). Le résultat est la formation d'acide sulfurique, des sulfates (d'ammonium et de sodium) et des oxydes d'azote.

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations causant ainsi des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation des sels [31].

1.6.2.4 Durabilité du béton au contact de milieux acides

L'action des milieux acides est identique dans son principe à celle des eaux pures et douces, mais elle est plus intense : la portlandite est dissoute en premier, puis les silicates et aluminates de calcium hydratés sont attaqués et perdent leur calcium.

Le degré de la nocivité des acides dépend du caractère soluble ou insoluble des sels qu'ils forment par réaction les hydrates calciques. On peut trouver les acides fréquemment dans les milieux suivants :

- Eaux naturelles
- Milieux industriels
- Les réseaux d'égouts

Le sucre qui n'est pas un acide, mais il doit être cité dans cette section, car il tend à dissoudre facilement la portlandite et plus difficilement les C-S-H et les aluminates de calcium [31].

1.6.3 Durabilité du béton dans les environnements sulfatiques

Les sulfates sont les plus nocifs du béton. Ils peuvent être d'origine naturelle, biologique ou de pollution domestiques et industrielle.

Dans les sols, on peut trouver les sulfates avec de faible concentration (0.01 à 0.05 % du sol sec). Et on peut trouver dans des régions des concentrations qui dépassent 5% dans les sols qui contiennent du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite CaSO_4 .

Les sols alluviaux et argileux peuvent contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec formation de l'acide sulfurique qui fait réaction avec le carbonate de calcium qui donne à son tour naissance à du gypse.

Le sulfate d'ammonium peut provenir de l'utilisation intensive des engrais dans l'agriculture.

La source des sulfates peut être interne du béton dans le cas d'une pollution accidentelle des granulats (déchet de plâtre, par exemple) ou d'une utilisation de granulats gypseuse (la teneur en soufre totale, exprimé en SO_3 des granulats est limitée en France à 0.4 % par la norme **NFP 15-319** [56]). Des teneurs supérieurs peuvent entraîner des graves désordres [31].

1.6.3.1 Processus d'attaque par les sulfates seuls

La dégradation du béton par les sulfates seuls est du principalement par le phénomène d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite «ettringite secondaire».

La formation de l'ettringite secondaire est en deux étapes :

a)formation du gypse dit secondaire : par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise. Ce gypse résulte d'une substitution entre la portlandite et le sulfate. Par exemple avec le sulfate de sodium :



Si la teneur en sulfate est élevée (supérieur à 1000 mg/l) et si la concentration locale en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans la phase interstitielle du béton excède le produit de solubilité du gypse. Ce dernier précipite. Le volume du gypse précité est à peu près le double du produit de départ et une expansion peut se manifester, le gypse se dessous et se cristallise dans les espaces libres de la pâte de ciment durcie.

b) réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium : du ciment pour former l'ettringite. Plusieurs scénarios sont envisagés :

- soit à partir de C_3A anhydre :



- à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_4AH_{13} ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$.

La cristallisation de l'ettringite est expansive ou non suivant la teneur en chaux dans la phase liquide.

Dans les ciments qui libèrent moins de portlandite (CHF, CLK, ciments sursulfatés), la cristallisation de l'ettringite n'est pas expansive.

En conclusion, la dégradation du béton est définie suivant les étapes suivantes :

- Mise en contact du béton avec la solution de sulfate.

- Pénétration des ions SO_4^{2-} par diffusion dans le béton.

- Pénétration du cation associé au sulfate et réaction de substitution :

Cation (Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , ...) Ca^{2+} et formation de gypse en solution ou cristallisé suivant les concentrations en SO_4^{2-} et en $Ca(OH)_2$.

- Réaction des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4Ax et $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$) et formation in situ, d'ettringite expansive.

- Fissuration du béton sous l'effet de pression de cristallisation de l'ettringite.

- Augmentation de la pénétration des sulfates à travers les fissures.

- Progression de l'attaque et élargissement de l'épaisseur des fissures au cours du temps.

- Destruction plus au moins complète du béton [31].

1.6.3.2 Les sulfates les plus agressifs vis-à-vis du béton

Les sulfates les plus agressifs vis-à-vis du béton sont :

- les sulfates de magnésium.

- les sulfates d'ammonium.

- les sulfates de calcium.

- les sulfates de sodium.

a) Les sulfates de magnésium

Le sulfate de magnésium est très agressive (double action).

- Substitution $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$:



Il y a formation du gypse secondaire cristallisé et précipitation du brucite.

Action du gypse secondaire :



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



On peut remarquer que l'attaque des sulfates engendre deux types de produits, un gypse secondaire qui est peu expansif et l'ettringite secondaire qui représente, d'après plusieurs recherches [31], la cause principale de la détérioration des mortiers et bétons exposés aux milieux sulfuriques.

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 forme 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 (Mg-S-H) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente.

Un échantillon d'un béton ayant subi une attaque par le sulfate de magnésium est représenté dans les figures 1.11 et 1.12.



Figure1.11: *Echantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif.*

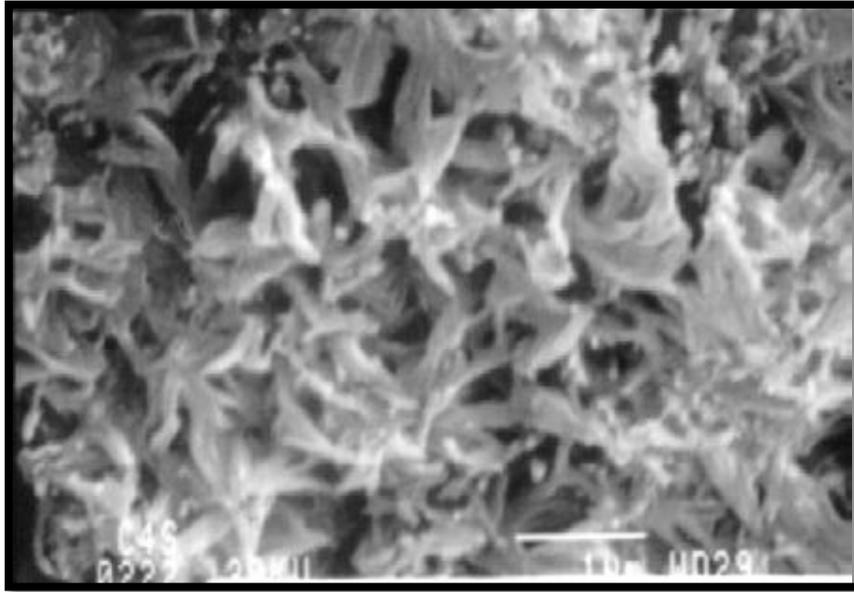


Figure 1.12: Micrographe d'une pâte dégradée parla réaction avec le magnésium.

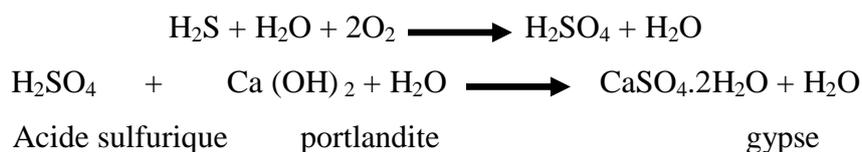
b) Les sulfates de calcium:

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.

Le sulfate de calcium n'attaque que l'aluminat de calcium hydraté pour former de l'ettringite expansive $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Le nombre de molécule d'eau peut être de 32 ou de 31 selon la pression de vapeur ambiante [31].

c) L'acide sulfurique et le sulfate d'ammonium:

Dans des cas spécifiques, le plus souvent dans les tuyaux d'égouts, certaines bactéries anaérobies libèrent du H_2S lorsqu'elles décomposent les matières organiques. Au contact avec l'air, le H_2S s'oxyde et se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4) qui, à son tour, attaque les hydrates, particulièrement la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), selon les formules suivantes :



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

Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions SO_4^{2-} qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'ettringite qui occupe

plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi de l'expansion [31].

Dans le cas de l'attaque du béton par les sels d'ammonium (nitrates, sulfates chlorures) qui sont très solubles dans l'eau, il y a formation du sel de calcium avec un dégagement gazeux d'ammoniac.

Avec le sulfate d'ammonium, la réaction avec la portlandite et les C-S-H conduit à former du gypse qui réagit à son tour avec les aluminates en donnant de l'ettringite expansive. Dans les deux cas de l'attaque par l'acide sulfurique et le sulfate d'ammonium, il y a formation principalement du gypse et d'ettringite. Pour expliquer la forme des cristaux du gypse formé dans chaque cas et leurs orientations, plusieurs recherches ont été établies. L'analyse par un microscope électronique [57] à balayage de deux mortiers dont l'une qui a été conservé dans l'acide sulfurique et l'autre dans le sulfate d'ammonium ont donné les résultats suivants :

L'échantillon exposé dans le sulfate d'ammonium a montré une couche extérieure de fibres transparentes à l'œil nu qui ressemble à une surface aciculaire. La longueur de ces cristaux était souvent de l'ordre des millimètres et de leur section, de l'ordre des dizaines de microns. L'analyse a confirmé que ces cristaux étaient du gypse.

La forme, l'orientation et la longueur des cristaux favorisent l'élargissement des microfissures et facilitent la pénétration des agents agressifs à l'intérieur du béton. La surface des éprouvettes qui a été exposé à l'acide sulfurique avait une nature tout à fait différente. Le gypse qui forme une couche blanche à la surface qui agit comme une couche protectrice. La longueur des cristaux du gypse était moins importante et leurs orientations donnent aux bétons une protection contre la pénétration des agents agressifs.

Inversement à ce qui se passe dans le cas de l'acide sulfurique, les échantillons exposés au sulfate d'ammonium ont éprouvé une détérioration significative avec formation de fissures.

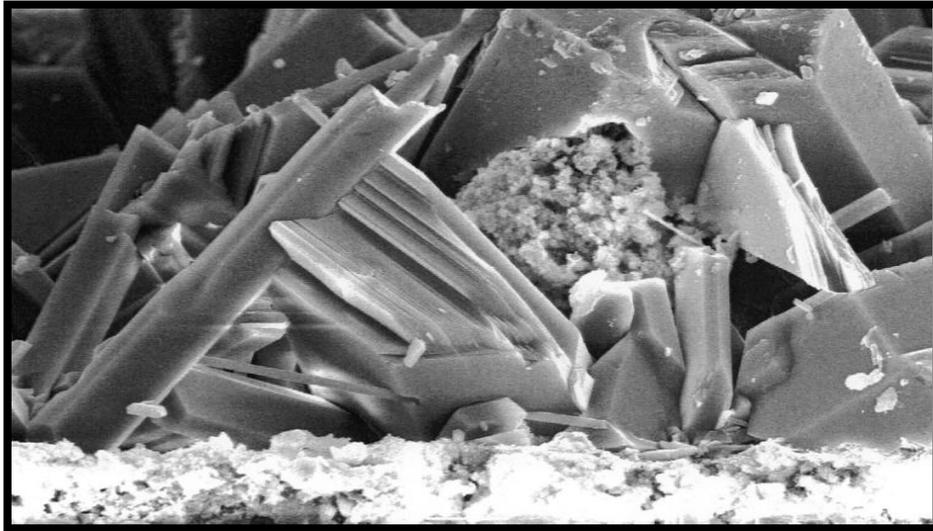


Figure1.13: *Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par le sulfate d'ammonium [57].*

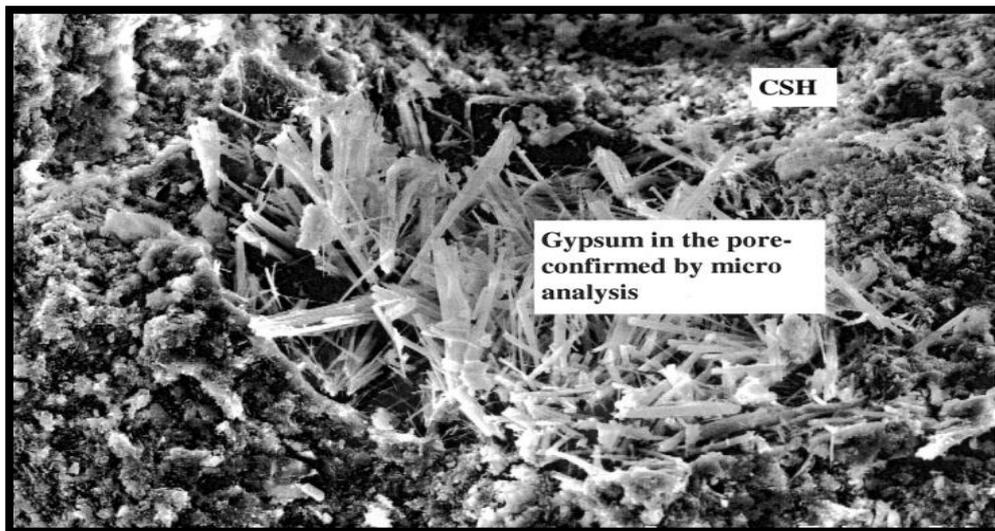


Figure1.14: *Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par l'acide sulfurique [57].*

L'analyse aux rayons X, des mortiers exposés aux solutions de sulfates, montre en plus des phases présentes pour les mortiers témoins telles que : le quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3) et la portlandite (Ca(OH)_2), il y a l'apparition d'autres phases importantes cristallisées sur la couche de surface à savoir :

- L'ettringite secondaire $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 32\text{H}_2\text{O}$.
- Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Ces deux nouveaux composés cristallisés, sont les résultats de la réaction des constituants de ciments avec les sulfates [57].

1.6.4 Les attaques internes par les sulfates

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 C₃A [31].

Les sulfates de calcium ajoutés au clinker lors de son broyage réagissent avec le C₃A 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 devienne instable. 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 absorbés 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-} absorbés 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 [60]. L'expansion conséquente se produit lorsque l'espace pour la formation différée de l'ettringite est restreint. 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 entraîné qui peuvent être obtenus en augmentation le rapport E/C (augmentation de la porosité capillaire).

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 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. Divet [58] a démontré qu'une prolongation de la période durant laquelle la température du béton est élevée favorise la formation différée de l'ettringite.

Une analyse de la microstructure du béton effectuée après 400 jours, a clairement démontré l'existence d'ettringite dense et mal cristallisée dans les interfaces entre les granulats et la pâte. Cette expérience prouve que la température élevée du béton développée par l'hydratation du ciment peut causer la formation différée de l'ettringite et l'expansion conséquente.

Le processus de la formation différée de l'ettringite est nettement différent de l'attaque externe par les sulfates où la source des sulfates est un milieu externe agressif, sulfaté et humide. Dans ce cas, les ions SO_4^{2-} de l'extérieur peuvent pénétrer dans le béton, perturber son équilibre ionique et causer la reformation de l'ettringite que l'on appelle ettringite secondaire ou encore la formation de gypse. Les cations provenant des mêmes sels sulfatés peuvent attaquer les C-S-H ou les granulats. L'attaque peut également être combinée avec l'action de l'acide qui dissout la portlandite, augmente la perméabilité et accélère ainsi la dégradation du béton.

À l'intérieur du béton, on peut distinguer les couches dans lesquelles la formation du gypse ou de l'ettringite secondaire est favorisée.

Dans le cas de la formation différée de l'ettringite cependant, les sulfates proviennent d'une source interne au béton et sont uniformément répartis dans la matrice: soit absorbés sur les C-S-H, dissous dans la solution interstitielle ou se trouvant dans la structure du monosulfoaluminate. Le gypse ne se forme pas et les C-S-H ne sont endommagés que par la fissuration. L'ettringite se forme presque uniformément dans la matrice, car l'humidité, qui est la seule composante manquante pour la formation différée de l'ettringite, se rend facilement dans les couches profondes du béton. Les méthodes de contrôle de la formation différée de l'ettringite sont simples et sûres : la décomposition de l'ettringite primaire lors de la fabrication du béton doit être évitée [58].

1.7 ORIGINE DES SULFATES

Les sulfates peuvent avoir différentes origines, provenant le plus des sols, on peut trouver les sulfates avec de faible concentration (0.01 à 0.05 % du sol sec), et on peut trouver dans des régions des concentrations qui dépassent 5% dans les sols qui contiennent du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Ou de l'anhydrite $CaSO_4$.

Les sols alluviaux et argileux peuvent contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec formation de l'acide sulfurique qui fait réaction avec le carbonate de calcium qui donne à son tour naissance à du gypse. Le sulfate d'ammonium peut provenir de l'utilisation intensive des engrais dans l'agriculture [43].

Une grande variété de sulfates, provenant le plus souvent des sols, des eaux souterraines, de certaines nappes aquifères, des eaux d'infiltration ou des eaux de mer, peut entrer en contact avec le béton et réagir chimiquement avec les hydrates. Les réactions chimiques auxquelles elle conduit ainsi que leurs conséquences physiques (augmentation de la porosité, expansion...), peuvent provoquer des dégradations plus ou moins importantes. Bien que les cas réels d'ouvrages atteints soient relativement restreints [52], l'action des sulfates est généralement considérée comme un risque sérieux. Elle a été l'objet des préoccupations de nombreux chercheurs depuis Vicat, Le Chatelier [59], Candlot [60], Lafuma [61].

La source des sulfates peut être interne du béton dans le cas d'une pollution accidentelle des granulats (déchet de plâtre, par exemple) ou d'une utilisation de granulats gypseuse (la teneur en soufre totale, exprimé en SO_3 des granulats est limitée en France à 0.4% par la norme **NF P 15-319** [56]). Des teneurs supérieures peuvent entraîner des graves désordres.

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton, ils sont la deuxième cause de la dégradation des ponts dans le monde après la corrosion des armatures.

L'action des sulfates sur le béton fait intervenir un certain nombre de phénomènes physico-chimiques complexes, dépendant de nombreux paramètres, tels que, le type de sulfate, la concentration en sulfate, type de ciment, formule du béton, les ajouts minéraux utilisés et la période d'expansion.

1.8 SOURCE DES ACIDES

Les eaux de pluies « propre » ont un pH compris entre 5, 6 et 7 suivant qu'elles sont conditionnées par l'ammoniac d'origine biologique ou par le dioxyde de carbone. Ces pluies n'ont pas d'effets nocifs sur les bétons.

Les pluies dite acides dont le pH peut descendre moins de 4 sont agressifs suite à la pollution par les oxydes de soufre d'origine industrielle ou domestique (combustion de charbons, carburant). Le résultat est la formation d'acide sulfurique, des sulfates (d'ammonium et de sodium) et des oxydes d'azote.

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite [43].

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl_2 et au nitrate de calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments Portland [62, 63].

L'acide sulfurique H_2SO_4 , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement [64] ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton. Les acides organiques, on les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigreries, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...). Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux, Ils peuvent dans certains cas avoir un effet colmatant sur le béton : c'est le cas par exemple, de l'acide tartrique (cuves à vin) ou de l'acide oxalique.

Les acides organiques tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Des dégradations importantes du béton ont pu être observées en milieu agricole dans des silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mise à nu des aciers...). Les déjections animales (purins, fumiers) contiennent également les acides acétique, propionique, butyrique, iso-butyrique, tous agressifs [65]. Bertron et al signalent également la présence d'acides gras volatiles très agressifs vis-à-vis du béton dans les cuves à purins ou lisiers [66]. Dans les tourbières et les marécages, les acides humiques sont susceptibles d'atteindre des concentrations élevées.



CHAPITRE 2

Matériaux, Matériels et Méthodes d'essais

CHAPITRE 2

Matériaux, Matériels et Méthodes d'essais

2.1 INTRODUCTION

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de l'eau de barrage sur la propriété de béton ; En d'autres termes, notre objectif est de mettre en évidence l'attaque chimique (sulfate d'aluminium) sur la résistance mécanique et la durabilité de deux bétons (BO1, BO2) confectionnés avec deux ciments fabriqués en Algérie : ciment portland artificiel (CPA) et un ciment portland composé (CPJ).

Ce chapitre est structuré en 9 parties :

- 1- ciment
- 2- gravier
- 3- sable
- 4- eau de gâchage
- 5- formulation de béton
- 6- techniques expérimentales
- 7- le milieu agressif
- 8- essais de durabilité
- 9- conclusion

2.2 CIMENT

Pour deviner la durabilité de béton dans les barrages, on a étudié la durabilité du béton immergé dans une solution agressive constituée de sulfate d'aluminium. Pour ce faire, deux bétons ont été confectionnés avec deux types de ciment :

- ✓ Ciment portland composé CPJ- CEM II/B 42.5 NA 442, de l'usine Lafarge de M'silla.
- ✓ Ciment portland CPA-CEM I 42.5, de l'usine d'Ain-Elkbira de Sétif.

2.2.1 La composition chimique du ciment

Tableau 2.1 : Analyse chimique élémentaire du ciment CPJ (% massique).

Eléments	Teneur (%)
SiO ₂	18,21
Al ₂ O ₃	4,56
Fe ₂ O ₃	2,96
CaO	59,61
SO ₃	3,32
K ₂ O	0,610
Cl ⁻	0,014
CaO libre	0,78
P A F	4,27

Tableau 2.2 : Analyse chimique élémentaire du ciment CPA (% massique.)

Eléments	Teneur (%)
SiO ₂	21,79
Al ₂ O ₃	4,29
Fe ₂ O ₃	5
CaO	64,37
SO ₃	2,11
K ₂ O	0,24
Na ₂ O	/
Cl ⁻	0
CaO libre	0,61
Perte au Feu	0,87

2.2.2 La Composition minéralogiques du clinker

Tableau 2.3 : *Composition minéralogique du clinker (CPA) (% massique).*

Éléments	Teneur (%)
C ₃ S	63,26
C ₂ S	14,43
C ₃ A	2,49
C ₄ AF	15,9

NB : La teneur en C₃A est inférieure à 4%, donc ce ciment CPA est considéré comme un ciment résistant aux sulfates (CRS).

2.2.3 Les Caractéristiques physiques des pâtes de ciment :

D'après les normes **NF EN196-3** [67], **NF EN 196-6** [68] sur les ciments, des essais physiques de prise, de masse volumique et de surface de Blaine; ont été réalisés, les résultats de ces différents essais sont portés sur le tableau 2.5 suivant :

Tableau 2.4. *Résultats des essais physiques sur les ciments*

Caractéristiques physiques		CPA-CEM I 42.5	CPJ CEM II 42.5
		Consistance normalisée H ₂ O	24.35%
Temps de prise	Début	206 mn	204 mn
	Fin	307 mn	313 mn
Masse Volumique Absolue (g/cm ³)		3,16	3,2
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)		3388	3746

2.3 GRAVIER

Les deux classes de gravier utilisé dans notre étude : Le gravier (3/8) et le gravier (8/15). Ces graviers proviennent de la carrière Sétif.

2.3.1 La masse volumique

La masse volumique apparente et absolue est réalisée selon la norme NA EN 1097-6[69].

a) La masse volumique apparente:

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent, Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³).

➤ Principe de l'essai:

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

➤ Matériels utilisés :

- Une balance avec une précision de 0.01 g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle à araser.

➤ Mode opératoire :

- Peser le récipient vide et taré.
- Prendre le matériau (gravier) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 2 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2.6 suivant :

Tableau 2.5 : Masse volumique apparente du gravier.

Gravier	N° d'essai	M (g)	M _{vid} (g)	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{moy} (kg/m ³)
3/8	1	1592	65	1,527	1,52
	2	1590	65	1,525	
8/16	1	8487	837	1,530	1,53
	2	8507	837	1,534	

b) La masse volumique absolue :

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³) [70].

➤ Principe de l'essai:

Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée :

➤ Matériels utilisés :

- Une éprouvette graduée en verre.

➤ Mode opératoire :

- Remplir l'éprouvette graduée en verre par un volume d'eau (V1 =300 ml).
- Peser une masse (M =400 g) du matériau (gravier).
- Introduire cette masse dans l'éprouvette (s'assuré de bien éliminer les bulles d'air).
- Noter le nouveau volume V2.
- Cette opération est répétée 2 fois.
- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma_{abs} = M / (V2 - V1)$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2.7 suivant :

Tableau 2.6 : Masse volumique absolue du gravier.

Gravier	N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	γ_{abs} (kg/m ³)	$\gamma_{abs moy}$ (kg/m ³)
3/8	1	400	300	450	2,66	2,66
	2	400	300	450	2,66	
8/15	1	400	300	449	2,68	2,66
	2	400	300	451	2,64	

2.3.2 Analyse granulométrique par tamisage

➤ **But de l'essai:**

L'analyse granulométrique est réalisée selon la norme **NA EN 933-5**[71], permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

➤ **Principe de l'essai:**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

➤ **Matériels utilisés :**

- Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.

Tableau 2.7 : Tamis utilisés pour le tamisage des graviers.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
(3/8)	(8 - 6,3 - 5 - 4 - 3.15 - 2.5 - et le fond)
(8/16)	(16 - 12.5 - 10 - 8 - 6.3 - 5 - et le fond)

➤ **Préparation de l'échantillon**

L'échantillon de gravier est préparé selon la norme **NF EN 933-5**[71],

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

➤ **Mode Opérateur :**

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.

L'analyse granulométrique effectuée au laboratoire est représenté sur le tableau 2.9 et la figure 2.1 :

Tableau 2.8 : *L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) et (8/16).*

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne			
Gruvier 3/8 1600g	8	15	20	24	19.666	19.666	1.229	98.771
	6.3	605	592	638	611.666	631.332	39.458	60.542
	5	442.15	470	446	452.716	1084.048	67.753	32.247
	4	318	302	278	299.333	1383.381	86.461	13.539
	3.15	187	172	181	180	1563.381	97.711	2.289
	2.5	33	35	40	36	1599.381	99.961	0.039
	Font	1	0	1	0.666	1600	100	0
Gruvier 8/16 3200g	16	7	17	21	15	15	0.468	99.532
	12.5	533	468	508	503	518	16.187	83.813
	10	1185	1181	1267	1211	1729	54.03	45.97
	8	1180	1229	1150	1186.33	2915	91.10	8.9
	6.3	294	293	256	281	3196.33	99.88	0.12
	5	4	2	1	2.333	3198.663	99.95	0.05
	Font	2	2	1	1.666	3200	100	0

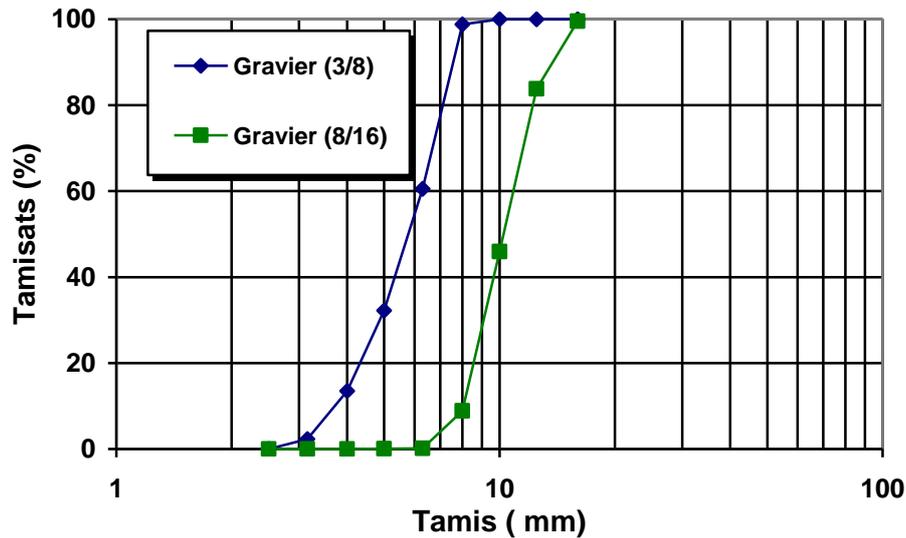


Figure 2.1 : Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/16).

2.3.3 La porosité

C'est le rapport du volume des vides contenu dans les grains au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante [72] :

$$\rho(\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

D'après les résultats obtenus précédemment (masse volumique apparente et absolue), on peut exploiter ces données afin de déterminer la porosité du gravier grâce à la relation suivante :

$$\rho(\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad \text{Ou :} \quad \rho(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right) * 100$$

D'où ;

γ : La masse volumique absolue du gravier.

ρ : La masse volumique apparente du gravier.

2.3.4 La compacité

C'est le rapport du volume des grains solides au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante [72] :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} * 100 \quad \text{Ou :} \quad C(\%) = 1 - P$$

2.3.5 L'indice des vides:

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains solides, définie par la relation suivante :

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Ou : } e(\%) = \frac{1-C}{C}$$

Les résultats sont représentés dans le tableau 2.10 suivant :

Tableau 2.9 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier.

fraction de gravier	Porosité	Compacité	l'indice de vide
3/8	42,85	57,15	0,74
8/16	42,48	57,58	0,73

2.3.6 Degré d'absorption d'eau

Le coefficient A mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat NA EN 1097-6[69]. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant, on en tient compte dans la formulation, Elle est exprimée en (%) et définit par la formule [72] :

$$A(\%) = \left(\frac{M_H - M_S}{M_S} \right) * 100$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.11 suivant :

Tableau 2.10 : Degré d'absorption d'eau des agrégats le gravais (3/8), (8/16).

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
3/8	1000	963	3,84
8/16	1000	972	2,88

2.4 SABLE :

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un mélange de :

- 50% de sable fin de la région de Boussaâda , $M_f=1.6$,
- 50% de sable concassé de la région de Sétif, $M_f=3.41$.

2.4.1 La masse volumique du sable

La masse volumique apparente et absolue du sable est déterminée selon La norme NA EN 1097-6[69].

a) Masse volumique apparente

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment. La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2.12 suivant :

Tableau 2.11 : Masse volumique apparente du sable.

	N° d'essai	M (g)	M _{vid} (g)	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{moy} (kg/m ³)
sable	1	1663	65	1,59	1,6
	2	1665	65	1,6	

b) La masse volumique absolue

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment. La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = M / (V2 - V1) \quad \text{avec : } M=300g$$

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.13 suivant

Tableau 2.12 : Masse volumique absolue du sable.

	N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	γ_{abs} (kg/m ³)	$\gamma_{abs moy}$ (kg/m ³)
sable	1	300	300	418	2,54	2,56
	2	300	300	416	2,58	

2.4.2 Analyse granulométrique par tamisage

➤ **But de l'essai:**

L'analyse granulométrique est réalisée selon la norme **NF EN 933-1**[73], permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

➤ **Principe de l'essai:**

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ **Matériels utilisés :**

- Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.

Tableau 2.13 : *Tamis utilisés pour le tamisage du sable.*

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08 et le fond)

➤ **Préparation de l'échantillon:**

L'échantillon de sable est préparé selon la norme **NF EN 933-1** [73]

La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

➤ **Mode Opérateur :**

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier, la seule différence est la durée de l'essai ; au lieu de 7 minutes pour le gravier elle va être 3 minutes pour le cas du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans le tableau 2.15 et la figure 2.2.

Tableau 2.14 : L'analyse granulométrique du sable.

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenn e			
sable 1kg	5	0	0	0	0	0	0	100
	2,5	64	66	62	64	64	6.4	93.6
	1,25	171	202	236	203	267	26.7	73.3
	0,63	145	148	146	146.33	413.33	41.33	58.67
	0,315	222	306	182	236.66	649.99	64.99	35.01
	0,160	302	216	312	276.66	926.65	92.66	7.34
	0,08	90	53	56	66.33	992.95	99.29	0.71
	Font	9	5	5	6.33	999.28	99.92	0.08

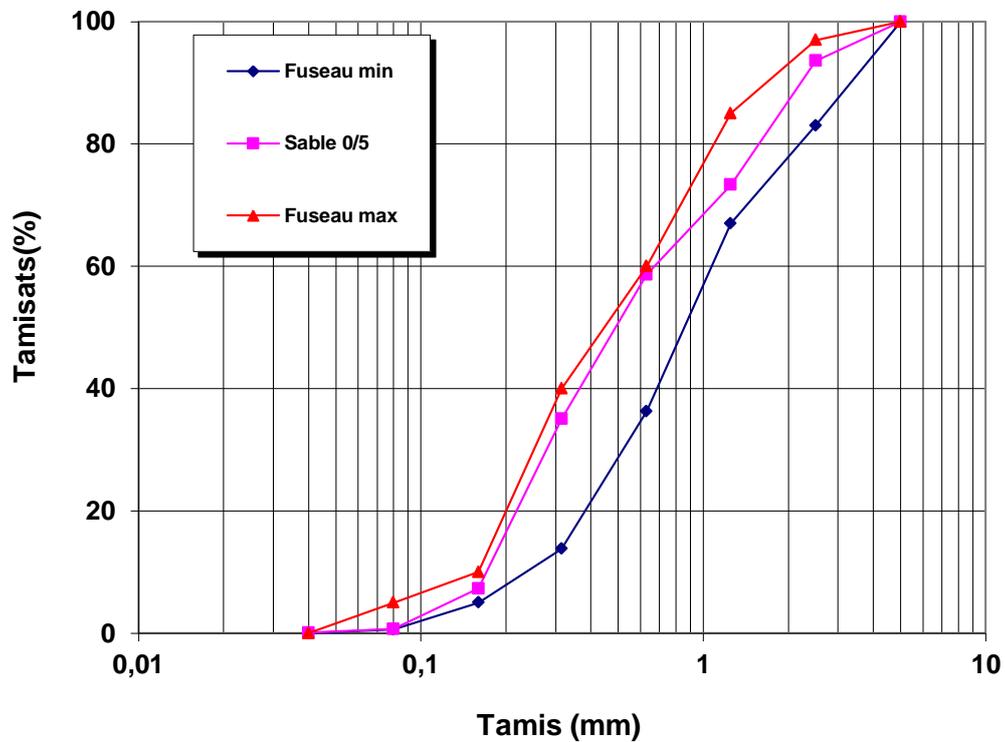


Figure 2.2 : Courbe granulométrique du sable.

2.4.3 Module de finesse:

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible plus le sable est riche en éléments fins, il est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08 [74].

Tableau 2.15 : *Modules de finesse du sable.*

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable à une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd son ouvrabilité [13], [75].

$$MF = \frac{1}{100} (\sum \text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

$$MF = (6.4 + 26.7 + 41.3 + 64.9 + 92.5) / 100 = 2.32$$

Après l'analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable testé est égal à :

$$MF = 2.32 \quad MF \text{ entre } 2 \text{ et } 2.5 \text{ (c'est un sable moyen).}$$

2.4.4 Equivalent de sable

L'équivalent de sable est réalisé selon la norme **NA EN 933-8** [76].

➤ **But de l'essai :**

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles qui diminuent la qualité du béton et mortier.

➤ **Mode opératoire :**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g), Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminer toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc.
- Placer l'éprouvette dans un agitateur mécanique pendant 3 minutes.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable.
- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

Avec :

$$E_s = (h_2/h_1) 100\%$$

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2.17 suivant :

Tableau 2.16 : Résultats d'essai d'équivalent de sable testé.

N° d'essais	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E_s (%)	$E_{s\text{ moy}}(\%)$
1	11.7	8.5	72.64	73.71
2	12.3	9.2	74.79	

2.4.5 La porosité:

C'est une caractéristique très importante qu'il faut la prendre en considération car elle influe sur certaines propriétés telles que la résistance mécanique.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$\rho (\%) = [1 - (\rho_s/\gamma)] \times 100\%$$

2.4.6 La compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité est donnée par la relation suivante [72] :

$$C = 1 - P$$

2.4.7 L'indice des vides :

Le rapport de volume des vides sur le volume des solides [72]:

$$e = p / (1 - p)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.17 : La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable.

fraction de sable	Porosité	Compacité	l'indice de vide
sable	37.50	62,5	60

2.5 EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage utilisée selon la norme **NF EN 1008** [20] dans la fabrication de notre béton c'est l'eau potable du robinet du laboratoire de génie civil, l'université de Bordj Bou Arréridj.

2.6 FORMULATION DE BETON

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme **NF EN 206-1**[15].

On a opté dans le cadre de ce travail en faveur de la méthode des volumes absolus dite méthode de SCRAMTAIEV.

2.6.1 Présentation de la méthode de formulation

Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (R_b) en fonction du rapport C/E et des quantités du liant et des granulats.

a) Définition du rapport (C/E)

- Pour $(C/E) \leq 2.5$: correspond aux bétons ordinaires plastiques.

$$C/E = R_b / (A \times R_c) + 0.5$$

- Pour $(C/E) > 2.5$: correspond au béton plutôt sec de haute résistance mécanique.

$$C/E = R_b / (A' \times R_c) - 0.5$$

R_b : classe de béton.

R_c : activité ou classe du ciment.

A, A' : coefficient admis d'après le tableau (2.19) selon les propriétés et la qualité des matériaux

C/E : rapport du poids de ciment au poids de l'eau donc l'unité de volume du mélange.

Tableau 2.18 : Valeurs des coefficients A et A' [72].

Granulats et liants	A	A'
De qualité supérieure	0,65	0,43
De qualité ordinaire	0,60	0,40
De qualité inférieure	0,55	0,37

b) Détermination de la dépense en eau:

Elle est établie approximativement d'après le tableau (2.20) qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés.

Tableau 2.19 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton [13].

La quantité d'eau L/m ³ en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons	
70	40	20	10	Maniabilité, sec	Affaissement, cm
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	140	160	80-60	0
130	135	150	165	50-30	0
140	145	160	175	30-15	0
145	155	170	185	-	2-1
160	165	180	195	-	4-3
165	170	185	200	-	5-6
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

c) Détermination de la dépense en ciment:

$$C = [(C/E) \times E]$$

d) Détermination de la dépense en gravier :

La détermination du dosage en agrégats doit remplir les conditions suivantes:

La somme des volumes absolus de tous les composants du béton est égale à 1 m³.

$$(C/\rho_C) + (E/\rho_E) + (S/\rho_S) + (G/\rho_G) = 1000 \text{ L} \dots\dots(1)$$

C, E, S et G: dépenses en ciment, eau, sable et gravier en (kg).

ρ_C , ρ_E , ρ_S et ρ_G : masses spécifiques de ciment, eau, sable et gravier en (kg/m³).

$$E + (S/\rho_S) + (C/\rho_C) = [(P_g \times a \times G/\gamma_g)] \dots\dots(2)$$

Tableau 2.20 : Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment [72].

Dosage en ciment (Kg/m ³)	E/C 0,30	E/C 0,40	E/C 0,50	E/C 0,60	E/C 0,70	E/C 0,80
250	-	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	-	1,30	1,36	1,42	-
350	-	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,31	1,40	1,46	-	-	-
500	1,44	1,52	1,56	-	-	-
600	1,52	1,56	-	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations (1) et (2) pour trouver l'expression qui permet de déterminer la quantité nécessaire de gravier.

$$G=1000/ [V_{\text{voi}} \cdot \rho_c \cdot (\alpha / \gamma_{\text{vol.oc}}) + (1/ \rho_{\text{pc}})]$$

$$G=1000/ [P_g \times (a/\gamma_g) + (1/\rho_G)]$$

e) Détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en gravier, on calcule la dépense en sable (Kg/m³) [72].

$$S= [1000 - [(C/\rho_c) + E + (G/\rho_G)]] \times \rho_s$$

2.6.2 Calculs des composants

Le béton utilisé est un béton ordinaire composé en masse, d'une partie de sable corrigé (sable 0/5 et sable concassée) et une partie gravier (gravier 3/8 et 8/15) et une partie de ciment, deux types de béton ont été confectionnés :

BO₁ : béton ordinaire avec ciment CPA.

BO₂ : béton ordinaire avec ciment CPJ.

Données de base :

- Consistance : Aff = 5-6 cm.
- Résistance souhaitée : R_{b28} = 30 MPa.
- Classe de ciment employée R_c = 42.5 MPa.
- D_{max} < 20 mm.

Tableau 2.21 : Masse volumique des matériaux.

	Sable	Gravier	Ciment
M. volumique apparent γ_s (g/cm ³)	1,6	1.53	-
M. volumique absolu ρ_{pc} (g/cm ³)	2,56	2.66	3,1

a) Détermination du rapport (E/C) :

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0.5) \text{ donc : } C/E = R_b / A \cdot R_c + 0.5$$

Avec :

- $R_b = 350$ bars classe du béton
- $R_c = 425$ bars classe du béton
- $D_{max} < 20$ mm
- Affaissement $A = 5-6$ cm

$$C/E = 1,68 \dots (BO_1), (BO_2)$$

b) Quantité d'eau :

- Aff = 5-6, pierres concassées, $D_{max} < 20$ mm

D'après le tableau $E = 192.5$ L c'est la quantité dans le cas de (CPA), et le cas (CPJ) +10L

$$E = 192.5 \text{ L/m}^3 \dots (BO_1), E = 202.5 \text{ L/m}^3 \dots (BO_2)$$

c) Quantité du ciment :

$$C = [(C/E) \times E]$$

$$C = 340.2 \text{ Kg/m}^3 \dots (BO_1), C = 323.4 \text{ Kg/m}^3 \dots (BO_2)$$

d) Quantité de gravier :

$$G = 1000 / [(P_g \alpha / \delta_g) + 1 / \rho_g]$$

- Déterminer le coefficient d'écartement, on utilise le tableau et calculer avec l'interprétation :

On a : dosage $C = 340.2 \text{ Kg/m}^3$

Donc : $\alpha = 1.41$ (BO₁)

On a : dosage $C = 323.4 \text{ Kg/m}^3$

Donc : $\alpha = 1.40$ (BO₂)

- Déterminer la cavité

On a : $V = 1 - (\delta_g / \rho_g)$ Donc : $V = 1 - (1.53 / 2.66) = 0.43$

$$G = 1295 \text{ Kg/m}^3 \dots (BO_1), G = 1300 \text{ Kg/m}^3 \dots (BO_2)$$

e) Quantité de sable :

$$S = [1000 - \{C / \rho_c + E / \rho_e + G / \rho_g\}] \rho_s$$

$$S = [1000 - (360.5/3.05 + 192.5 + 1112.73/2.609)] \times 2.309$$

$$S = 554 \text{ Kg/...}(\text{BO}_1), S = 510 \text{ Kg/m}^3 \dots(\text{BO}_2)$$

Pour 1 m³ de béton frais :

Tableau 2.22 : Dépense en matériaux pour 1 m³.

Matériaux	Eau	Ciment	Sable	Gravies
Dépense en Kg BO ₁	192,5	323,5	554	1295
Dépense en Kg BO ₂	202,5	340,2	510	1300

Mélange d'essais :

Les éprouvettes utilisées dans notre étude sont des éprouvettes cubiques [10X10X10] cm. Pour la confection de 40 éprouvettes cubiques pour chaque béton BO₁ et BO₂ :

On a $V = [(0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 40]$

$$V = 0.04 \text{ m}^3$$

Pour 0.04 m³ on a la dépense en matériaux suivante (Après majoration de 20%) :

Tableau 2.23 : Dépense en matériaux pour un mélange

Matériaux	Eau	Ciment	Sable (0/5)	Sable concassée	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Dépense en Kg (BO ₁)	9,24	15,52	13,3	13,3	31,08	31,08
Dépense en Kg (BO ₂)	9,72	16,32	12,24	12,24	31,2	31,2

2.7 TECHNIQUES EXPERIMENTALES :

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes en vigueur.

2.7.1 Malaxage :

La réaction entre les différents composants, est d'autant plus complète que le mélange est homogène. Cinq étapes constituent le mode de fabrication des bétons. Selon la norme **NA EN 12390-2** [77].

- Introduire : gravier 8/16, ciment, sable et gravier 3/8.
- Malaxer pendant 1 min et 30 secs.
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.

Mesurer l'affaissement à chaque fois avec le cône d'Abrams jusqu'à obtenir la consistance voulue [78].

2.7.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai consiste à remplir un moule tronconique ($D=20$ cm, $d=10$ cm, $h=30$ cm) en trois couches tassées par une tige d'acier de 16 mm de diamètre et d'extrémité arrondie selon la norme **NA EN 12350-2** [79].

Le piquage est exécuté selon un ordre de 25 coups par couche. On soulève, ensuite, le moule avec précaution, puis, on mesure l'affaissement.

Tableau 2.24 : *Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône* [13].

Class de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme (F)	0 à 4	± 1
Plastique (P)	5 à 9	± 2
Très plastique (TP)	10 à 15	± 3
Fluide (FL)	16	± 3

La différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement. La valeur de l'affaissement est exprimée en cm [78].

Dans notre étude l'affaissement visé est entre 5 et 6 cm c'est le cas d'un béton plastique.

2.7.3 Moulage et démoulage :

Après le malaxage qui dure environ 5 minutes, le béton est prêt à l'emploi ; des prélèvements sont réalisés dans des moules déjà graissés par un produit de décoffrage, ce dernier est exécuté à raison de deux couches vibrantes, jusqu'à la stabilisation de niveau du béton.

Le but de la vibration est le remplissage parfait du moule, à la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle selon les normes **NF P18-422**[80], **NF P18-423**[81]. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie.

2.7.4 Conservation des éprouvettes :

Le moule rempli de béton est convenablement identifié, puis placé jusqu'au moment du démoulage couvert d'un couvercle.

Le démoulage est effectué entre 20 h et 24 h après le moulage. Les éprouvettes sont alors marquées convenablement avec un crayon résistant à l'eau.

2.7.5 Conservation des éprouvettes dans l'eau :

Les éprouvettes marquées sont immergées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ dans des bacs adéquats jusqu'au moment de l'essai. Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, essuyées et laissées sécher au minimum 45 min avant que l'essai soit exécuté.

2.7.6 La résistance à la compression (essai d'écrasement):

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubiques normalisée [10x10x10] cm. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. Selon la norme **NA EN 12390-3**[28].

➤ La presse hydraulique :

La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 3000 KN.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai d'après la norme **NA EN 12390-3**[28].

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [13].

$$R_c = F/S$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2).

2.8 LE MILIEU AGRESSIF

2.8.1 Sulfates d'aluminium

Les composants du sulfate d'aluminium utilisé dans le barrage Ain-Zada représente dans le tableau suivant :

Tableau 2.25 : Fiche technique du sulfate d'aluminium utilisé dans le barrage Ain-Zada.

Aspect : Solide couleur blanche.	
- Teneur en aluminium :	17 ± 0,3% en AL ₂ O ₃ min.
- Basicité	: 0,7 à 1,1 en AL ₂ O ₃ libre.
- Fer	: 0,02 % max.
- Insolubles	: inf à 0,5 % max.
- Solubilité	: 610 à 750 g/l.
Teneurs en éléments toxiques :	
- Arsenic (As)	: 30 mg/kg max.
- Cadmium (Cd)	: 3 mg/kg max.
- Chrome (Cr)	: 30 mg/kg max.
- Plomb (Pb)	: 30 mg/kg max.
- Mercure (Hg)	: 30 mg/kg max.
- Selenium (se)	: 7 mg/kg max.
- Argent (Ag)	: 30 mg/kg max.
L'emballage: des sacs (50 Kg) ou big bag de 1000 Kg doivent être en : sac en plastique	

Le Sulfate d'aluminium hydraté est un composé chimique avec une formule Al₂(SO₄)₃.18H₂O. Le Sulfate d'aluminium est principalement utilisé comme agent flocculant dans la purification de l'eau potable et des stations d'épuration d'eau, et aussi dans la fabrication du papier.

On a choisi ce milieu comme solution agressive parce qu'il est très répandu dans notre société. Il est utilisé dans les barrages (traitement de l'eau potable) et les stations de purification d'eau. Pour cette raison on a voulu voir l'effet du sulfate d'aluminium sur les propriétés mécaniques et chimiques des matériaux cimentaires (bétons et pâte de ciment).

2.8.2 Préparation de la solution agressive

On a opté pour deux concentrations différentes de la solution en sulfate d'aluminium :

- la première solution contient 25 mg de sulfate d'aluminium par 1 litre d'eau (ce qui est généralement utilisé dans le barrage Ain-Zada).
- la deuxième solution contient 2500 mg de sulfate d'aluminium par 1 litre d'eau (c'est-à-dire que la première concentration est multipliée par 100 afin d'accélérer le phénomène de l'agression).

2.9 ESSAIS DE DURABILITE

Pour cette partie d'études on a exploré plusieurs types d'essai pour avoir des résultats qui nous permettent de confirmer la nocivité de milieu sulfatique, parmi ces essais on cite :

En plus des essais mécaniques, les profondeurs dégradées, les pertes de masses, l'évolution des dimensions et l'analyse par diffraction aux rayons X.

2.9.1 pH de la surface de l'échantillon

L'évolution du pH ne permet pas de mesurer la dégradation du béton, en revanche, les différentes phases de ce processus sont conditionnées par le pH de la surface du matériau :

- $12 < \text{pH} < 13$ → phase 1: le pH initial de la surface généralement compris entre 12 et 13 (matériau cimentaire sain) inhibe le développement de la dégradation,
- $9,5 < \text{pH} < 12$ → phase 2: suite à la carbonatation du béton, le pH de la surface diminue jusqu'à environ 9,5 et permet alors la colonisation primaire des agents agressifs,
- $4 < \text{pH} < 9,5$ → phase 3: les sécrétions métaboliques des microorganismes neutrophiles abaissent le pH de la surface colonisée jusqu'à environ 4mm laissant ainsi la possibilité aux espèces acidophiles de s'installer,
- $\text{pH} < 4$ → phase 4: les substances métabolisées par les espèces acidophiles abaissent le pH de la surface à un niveau très faible, parfois inférieur à 1, c'est la phase de l'attaque la plus critique pour le béton. Une fois la phase critique de dégradation atteinte (phase 4), il n'est plus possible de l'évaluer par l'intermédiaire du pH. Les indicateurs utilisés sont alors la perte de masse, l'évolution des dimensions et de la résistance à la compression des échantillons, ainsi que le suivi de la concentration des ions relâchés par le matériau dans le milieu environnant.

Dans cette partie, on a testé le pH en mesurant la profondeur de dégradation par la phénolphthaleïne (indicateur coloré transparent qui tourne au rose vif lorsque le $\text{pH} > 9$) qui permet de mettre en évidence le front de carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées).

2.9.2 La perte de masse de l'échantillon

La perte de masse permet de mesurer la dégradation: lorsqu'une attaque conduit à la dissolution de la matrice cimentaire, une partie de la matière est relâchée par le matériau ce qui engendre une perte de masse directe. Pour les attaques qui forment des substances expansives tel que le gypse et l'ettringite secondaires, on aura dans ce cas un gain de masse. En revanche lorsqu'une attaque conduit à la formation de produits de corrosion, ce mode de mesure de la dégradation pose le problème du brossage de l'échantillon. En effet, si

L'échantillon n'est pas brossé, les produits de corrosion subsistent à sa surface et engendrent une incertitude de mesure importante difficile à évaluer.

L'expérimentation ne peut se poursuivre dans de "bonnes" conditions après la mesure. La mesure de la perte de masse s'avère être un bon indicateur de la dégradation, mais il est préférable de ne l'utiliser qu'en fin d'expérimentation.

Les éprouvettes sont nettoyées trois fois avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite, on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.01g.

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{[M_1 - M_2]}{M_1} \times 100$$

Où :

- M_1 : masse des éprouvettes avant immersion.
- M_2 : masse des éprouvettes après immersion.

2.9.3 Evolution des dimensions de l'échantillon

L'évolution des dimensions de l'échantillon est également utilisée comme indicateur de la dégradation du béton. Cet indicateur peut être utilisé de deux manières différentes. Tout d'abord pour évaluer directement l'évolution des dimensions de l'échantillon, la dégradation entraînant généralement une diminution de celles-ci. Enfin, on peut l'utiliser pour définir, après brossage, la quantité de matériau sain conservée. La mesure des dimensions d'un échantillon peut s'avérer délicate posant des problèmes de manipulation mais surtout de repère d'origine pour les mesures. Pour palier à ce problème, certains auteurs collent les échantillons sur une plaque de verre avant de les exposer à des environnements propices à leur dégradation. Cette plaque de verre ne subissant pas ou peu de dégradation est alors considérée comme référence pour les mesures.

2.9.4 Analyse par diffraction X

La diffraction aux rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. On a utilisé cette technique pour caractériser les différentes couches formées sur les échantillons de pâte de ciment suite à l'attaque par des sulfates.



Figure 2.3 : *Diffractomètre.*

La méthode des poudres consiste en l'étude de la diffraction de rayons X par les solides cristallisés à l'état de microcristaux ou poudres. En raison de sa facilité de mise en œuvre, cette méthode est la plus répandue et la plus générale: la très grande majorité des substances à l'état solide peuvent être obtenues à l'état de poudre.

L'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière donne naissance à une émission dans toutes les directions d'un rayonnement de même longueur d'onde et de phase cohérente. Ce phénomène de diffusion conduit à des ondes d'amplitude très faible dans le cas de la diffusion par un électron ou un atome. En revanche, la diffusion par la matière, c'est-à-dire un ensemble d'atomes, entraîne une interférence des ondes cohérentes diffusées par chaque atome. Cette onde, dite diffractée, dépend de la structure atomique de la matière.

Des échantillons représentatifs de 100g sont cassés en petits morceaux à l'aide d'un marteau. Les morceaux sont ensuite, broyés dans un broyeur à billes et passés dans un tamis de 80 microns (figure 2.4).



Figure 2.4 : *Méthode de préparation d'échantillon pour DRX.*

2.10 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques des composants ont été établies. On a illustré les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs Caractéristiques, la formulation des bétons, les paramètres de composition variables, ainsi que les paramètres de traitement (mode immergé des éprouvettes).

Nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette recherche: le choix de corps d'épreuve, les conditions de conservation ainsi que le traitement des éprouvettes.

Le choix des réponses permettant d'évaluer la durabilité des Bétons sont les suivants :

- La modification du comportement mécanique est appréciée par la résistance à la Compression.
- La pénétration des agents agressifs dans les corps d'épreuves caractérisée par la profondeur de dégradation et appréciée par la perte de masse.

- La modification physico-chimique de la structure interne est appréciée par la profondeur de dégradation.
- Le suivi des phases cristallines par la diffraction aux rayons X.



CHAPITRE 3

Résultats et Discussions

CHAPITRE 3

Résultats et Discussions

3.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons exposé les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que la formulation des bétons objet de cette étude expérimentales. Le programme expérimental a consisté à étudier des éprouvettes de béton 10x10x10cm³. Les échantillons sont démoulés après 24h et conservés dans l'eau à 20°C pendant 28j, puis ils sont conservés en salle climatisée (25°C, 50%HR) jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite, ils sont conservés 03 mois dans l'eau potable et 2 mois :

- Dans une solution de sulfate d'aluminium à 25mg/l
- Dans une solution de sulfate d'aluminium à 2500mg/l

Cette partie portera sur la discussion résultats des essais expérimentaux effectués sur deux types de béton ordinaire : BO₁ à base du ciment CPA et BO₂ avec du ciment CPJ, notamment, l'essai de résistance à la compression et l'essai de durabilité. L'effet de la concentration en sulfate d'aluminium, sur l'évolution de résistance à la compression et sur la profondeur de carbonatation été étudié. L'évolution des phases cristallines des pâtes de ciment durci a été suivie par diffraction aux rayons X.

3.2 LA MASSE VOLUMIQUE

Le tableau 3.1 et la figure 3.1 présentent la masse volumique absolue des deux types de béton à l'état frais.

Tableau 3.1 : *Propriétés physiques de bétons à l'état frais.*

Type de béton	ρ (Kg/m ³)	Affaissement (cm)
BO ₁	2465	5
BO ₂	2398	6

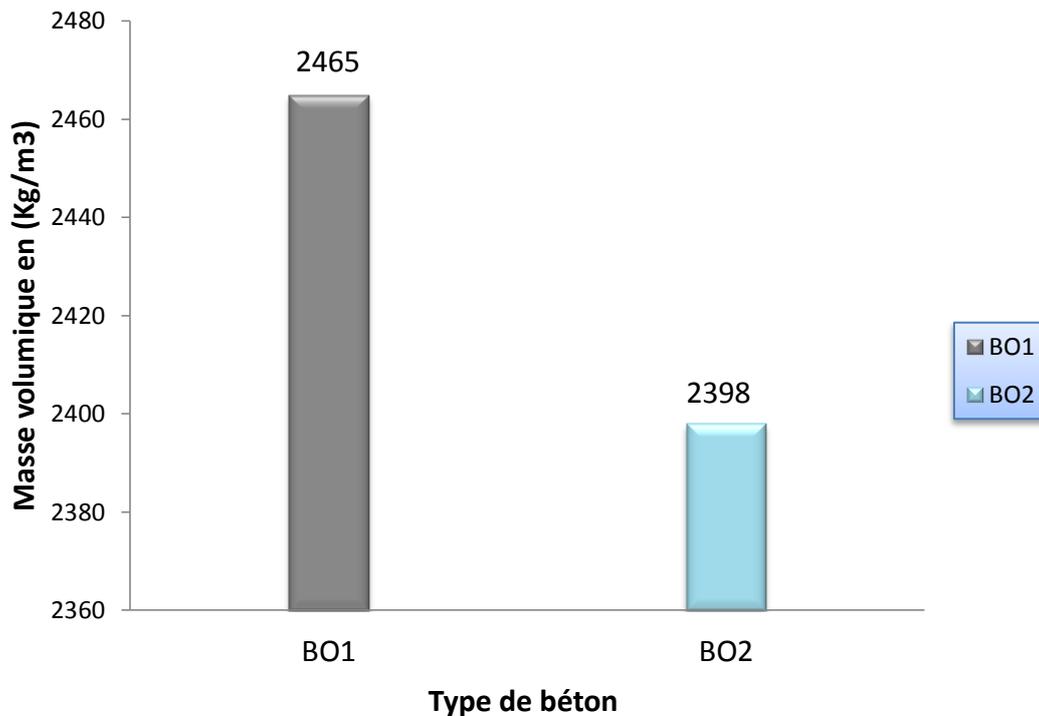


Figure 3.1 : *Masse volumique des deux bétons utilisés.*

Il est évident que la masse volumique du béton à base du CPA est légèrement supérieure à celle du béton à base du CPJ. Les ajouts sont plus légers que le clinker.

3.3 RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON TEMOIN

L'essai à la compression effectué sur le béton témoin est réalisé suivant la norme **NA EN 12390-3** [28]. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.2 et les figures 3.2 ci-dessous:

Tableau 3.2 : *Résistances à la compression du béton témoin.*

Type de Béton	Résistance à la compression Rc (MPa)	
	7jours	28jours
BO ₁	15,82	19,54
BO ₂	28,68	33,16

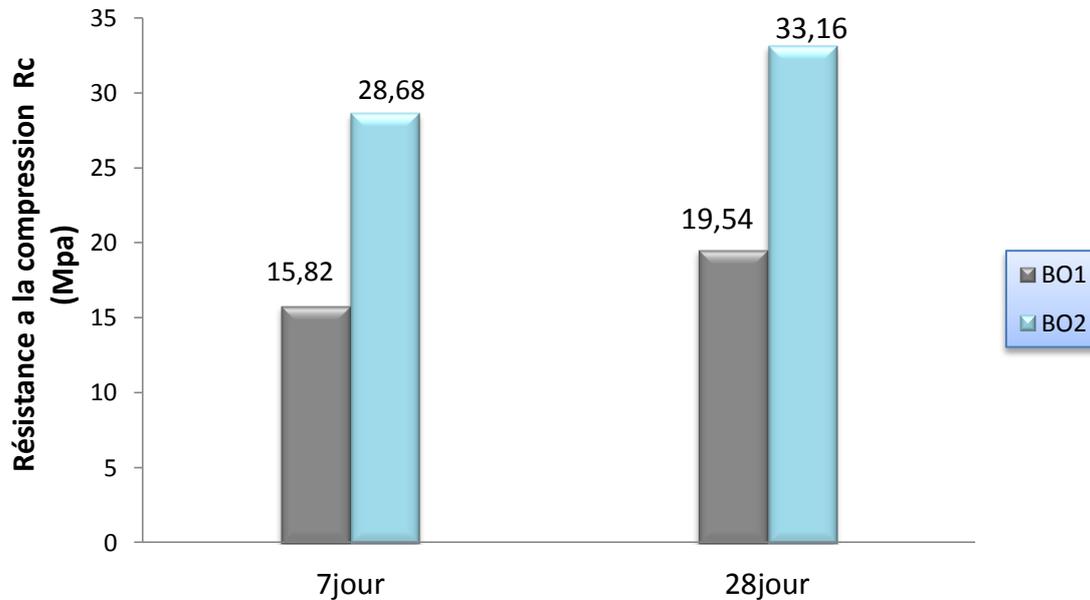


Figure 3.2 : Résistances en compression du BO_1 du BO_2 .

Les résultats des essais à la compression ne sont pas logiques du fait que la résistance du béton avec le ciment CPJ (CPJ- CEM II/B 42.5 NA 442) soit supérieure à celle du béton avec le ciment CPA (CEM I 42.5) que ce soit aux jeunes âges (7jours) ou à long terme (28jours). On pense que le ciment utilisé CPA disponible au laboratoire de Génie Civil est de mauvaise qualité. Cela dit, le but de notre étude est d'analyser l'effet d'une conservation dans le sulfate d'aluminium sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton.

3.4 ESSAIS DE DURABILITE

3.4.1 Evolution de la masse des éprouvettes

Le tableau 3.3 et la figure 3.3 présentent l'évolution de masses des éprouvettes de béton. La masse du béton attaqué (conservé dans une solution de sulfate d'aluminium pendant 2 mois) est normalisée par rapport à la masse du béton témoin non attaqué (28 jours de cure dans l'eau)

Tableau 3.3 : Perte de masse dans les solutions de sulfate d'aluminium.

Type de Béton	Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O 25 mg/l			Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O 2500 mg/l		
	Béton témoin (g)	Béton attaqué (g)	Perte de masse (%)	Béton témoin (g)	Béton attaqué (g)	Perte de masse (%)
	BO1	2384,2	2375,8	0,35	2369,5	2359,2
BO2	2371,1	2357,5	0,57	2356,9	2330,6	1,11

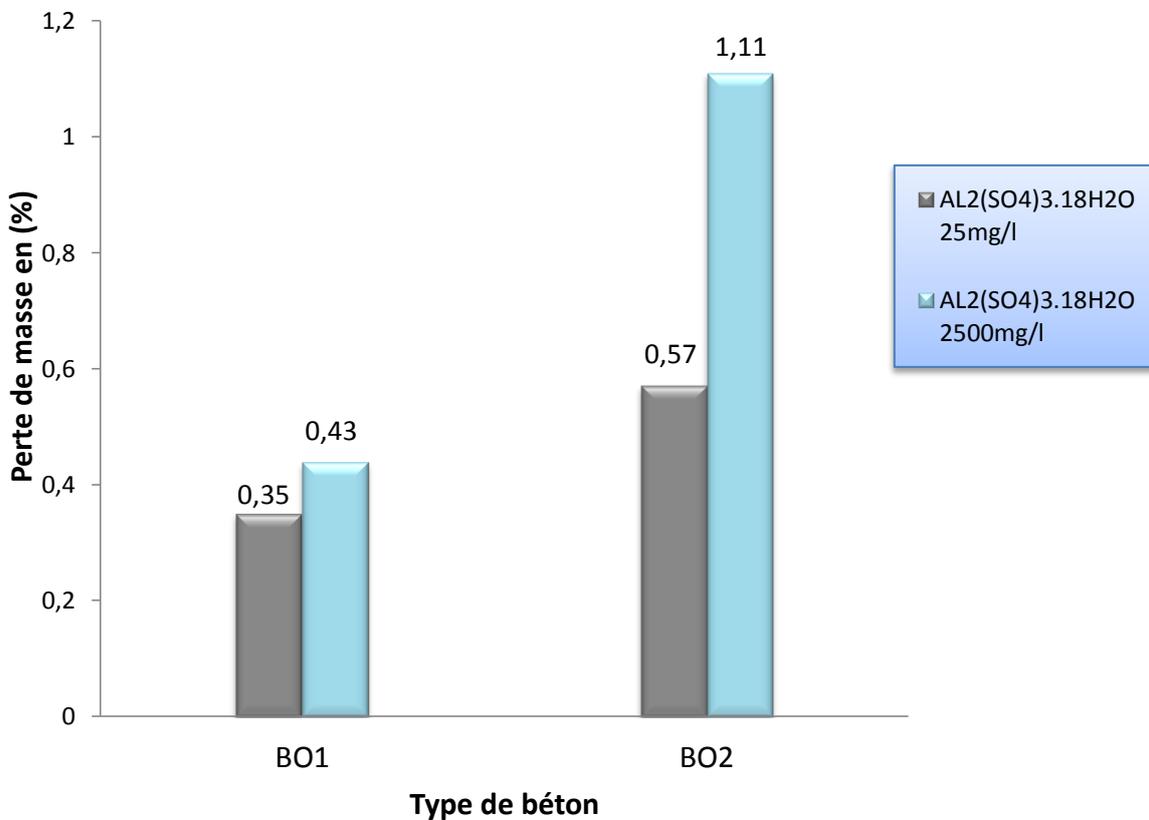


Figure 3.3 : Évolution de la masse des éprouvettes de béton immergées dans les solutions Al₂(SO₄)₃.18H₂O [25 mg/l] et [2500 mg/l].

On remarque bien que la perte de masse est beaucoup plus marquée avec le ciment CPJ qu'avec le ciment CPA (ciment résistant aux sulfates avec un C_3A de l'ordre de 4%). Néanmoins, la perte de masse n'est pas importante pour les deux types de béton (0,57 et 1,11%) et cela pour une forte concentration en sulfate d'aluminium de 2500mg/l. La perte de masse dans le bain du sulfate d'aluminium est du essentiellement à la dégradation de la surface de l'éprouvette: présence de minuscules pores visibles à l'œil nu sur la surface des échantillons. Cela laisse penser à la formation d'un sel de calcium soluble qu'on peut confirmer plus tard par analyses par diffraction aux rayons X.

3.4.2 L'influence de la solution sulfatique sur l'alcalinité de la matrice cimentaire

Le test de colorimétrie par pulvérisation avec une solution de phénolphthaléine (1g dans 100ml d'éthanol) sur des échantillons frais obtenus par cisaillement des éprouvettes de béton (la phénolphthaléine prend une teinte rose-violet quand le pH est supérieur à 9 et reste incolore dans le cas contraire) met en évidence une faible profondeur de carbonatation pour les deux ciments à différentes concentrations en solution d'aluminium (voir tableau 3.4 et figures 3.4 et 3.5). Toutefois, la profondeur d'alcalinité réduite est légèrement supérieure quand il s'agit du ciment CPJ, cela ne peut être expliqué que par sa teneur en C_3A légèrement supérieure à celle du ciment CPA utilisé. Ce résultat est en corrélation avec les pertes de masse enregistrées. Cela implique la formation d'une d'éléments secondaires qui diminuent le pH du béton.

Tableau 3.4 : *Profondeur de carbonatation de béton.*

Type des béton	Profondeur de carbonatation (mm)	
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 25mg/l	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 2500mg/l
BO ₁	0,3	0,4
BO ₂	0,8	1,2

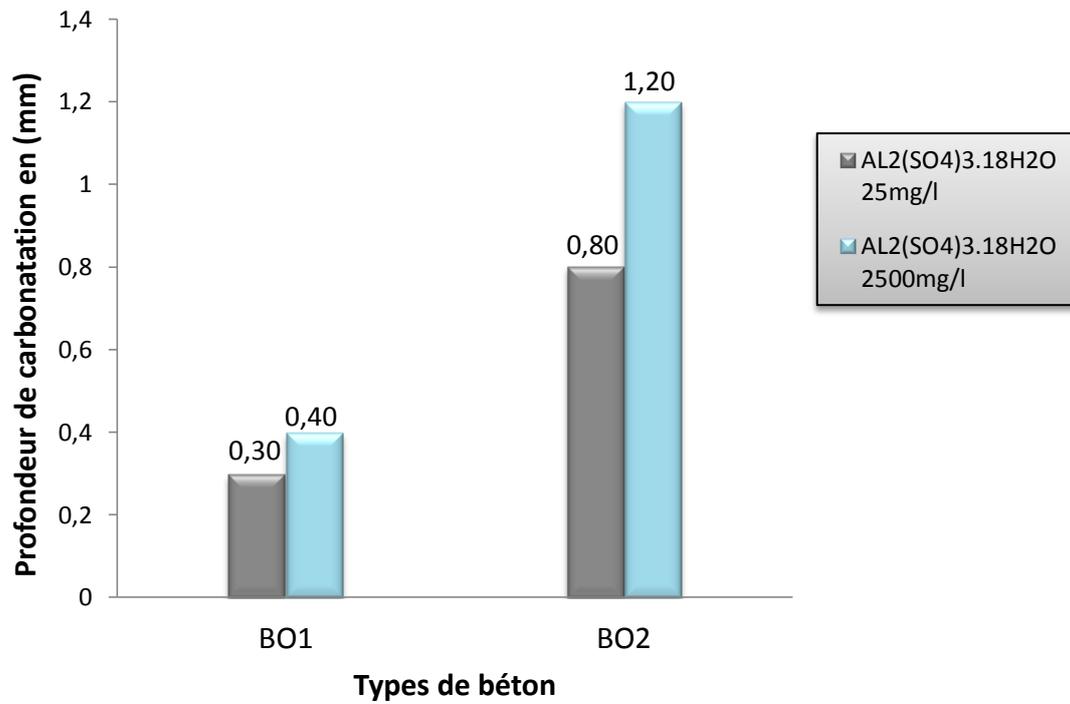


Figure 3.4 : Evolution des profondeurs dégradées des bétons immergés dans la solution $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$.

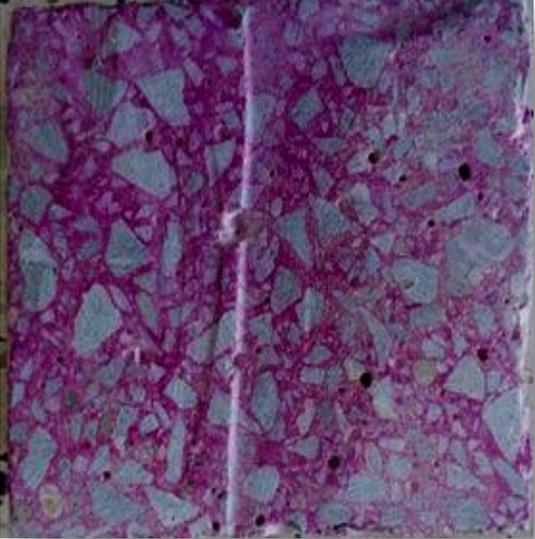
	
<p>BO₁ 25mg/l</p>	<p>BO₁ 2500mg/l</p>
	
<p>BO₂ 25mg/l</p>	<p>BO₂ 2500mg/l</p>

Figure 3.5 : Mesure de pH par la phénolphtaléine : béton dans la solution $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$.

3.5 L'INFLUENCE DE LA SOLUTION SULFATIQUE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES

Le tableau 3.5 et les figures 3.6 et 3.7 présentent les résultats des résistances à la compression résiduelles (normalisée par rapport à la valeur de la résistance du béton témoin non attaqué par le sulfate d'aluminium) en fonction du type de béton et de la concentration en sulfate. On observe, une augmentation de résistance de l'ordre de 30% pour une faible concentration en sulfate d'aluminium (25mg/l) et pour une concentration cent fois supérieure (2500mg/l) pour le béton à base du ciment CPA (CRS). Pour le béton à base du CPJ, on observe une augmentation de 10% des résistances pour une faible concentration en sulfate d'aluminium (25mg/l) et un maintien des résistances pour une concentration cent fois supérieure (2500mg/l). Ces résultats peuvent être expliqués par :

Le ciment CPJ gagne encore en maturité par suite d'ajouts minéraux actifs (16%): le laitier a un pouvoir hydraulique latent et la pouzzolane riche en silice, ces deux minéraux consomment la portlandite libérée par l'hydratation du clinker pour former d'autres CSH, élément responsable de la résistance;

- le ciment CRS, à faible teneur en C_3A , d'une part, il ralentit l'hydratation et diminue les réactions avec le gypse et donc il y aura moins d'ettringite expansible.

Tableau 3.5 : Résistances mécaniques des bétons immergés dans la solution de sulfate d'aluminium.

Types de béton	Résistance à la compression R_c en (MPa)		
	Témoin (H ₂ O)	Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O 25mg/l	Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O 2500mg/l
BO₁	21,26	28,73	27,90
BO₂	34,02	37,84	34,48

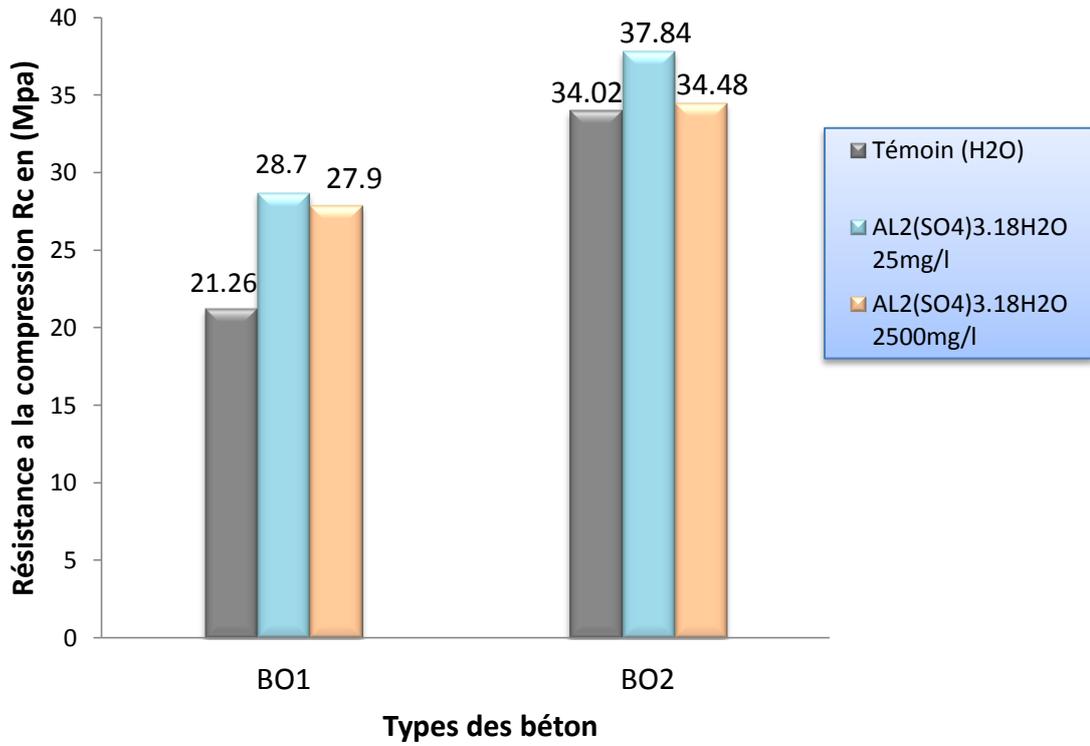


Figure 3.6 : Evolution de la résistance en compression dans la solution de sulfate aluminium $AL_2(SO_4)_3.18H_2O$.

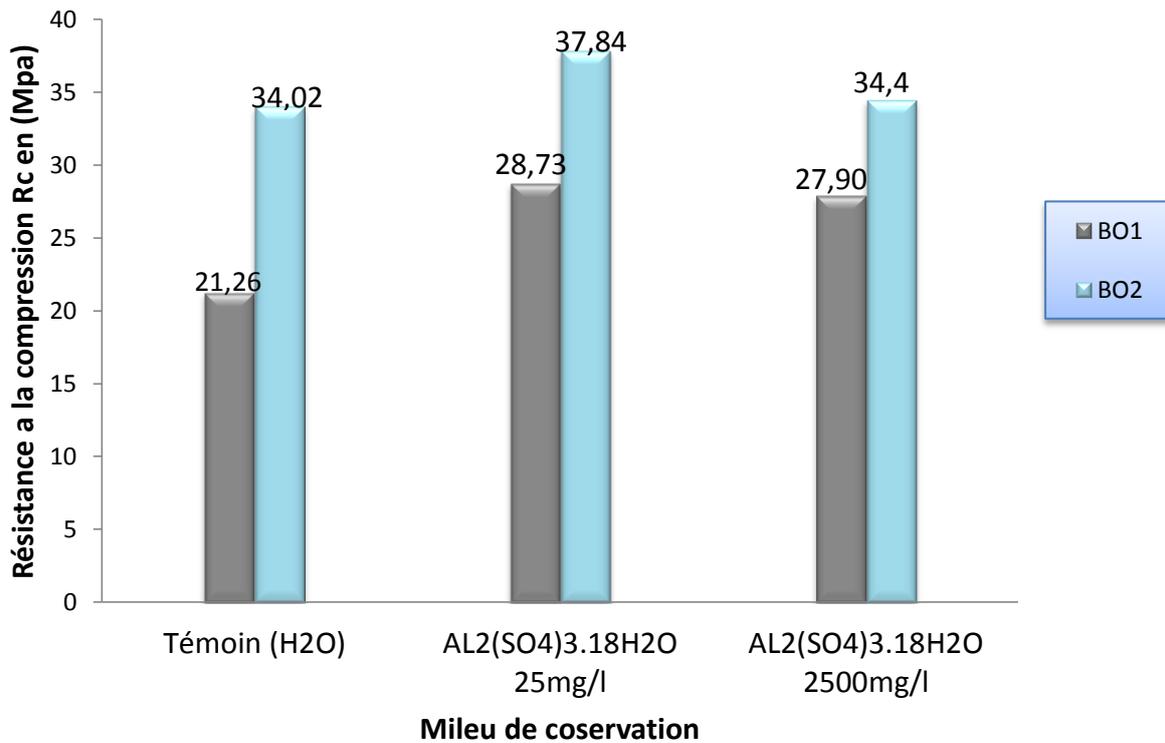


Figure 3.7 : Variation de la résistance en compression.

3.6 OBSERVATIONS VISUELLES

Les observations visuelles des éprouvettes de béton en contact avec les sulfates sont un moyen d'évaluation de la détérioration des propriétés et la dégradation de l'aspect extérieur des échantillons

Après 2 mois de conservation dans la solution de sulfate d'aluminium, le béton à base des deux types de ciment, ont montré des pores visibles à l'œil nu. En effet, la surface des éprouvettes a changé de forme par rapport à celle conservée dans de l'eau (figure 3.8).

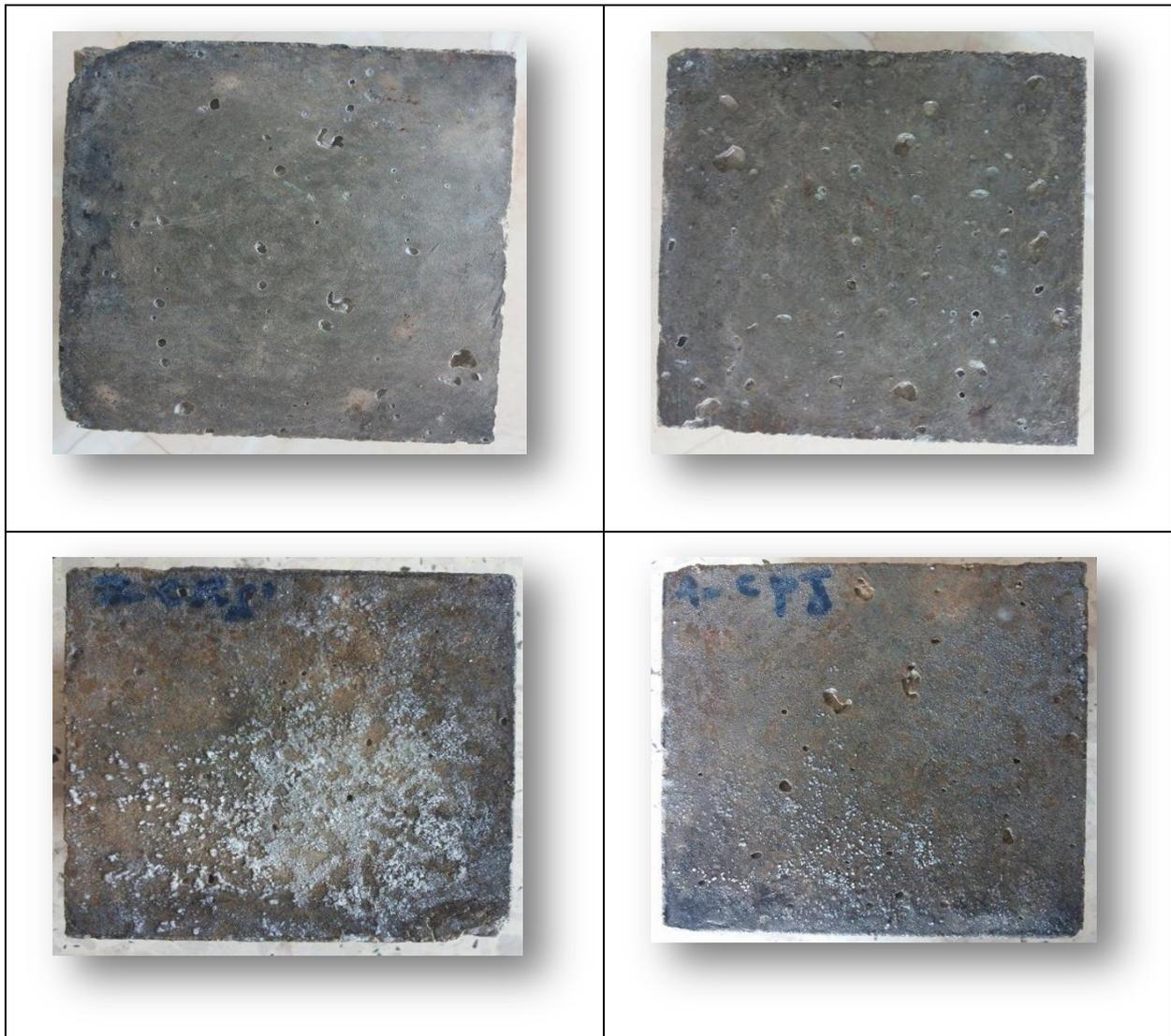


Figure 3.8 : *Observations visuelles de la surface des éprouvettes de béton immergées dans les solutions de sulfate d'aluminium.*

3.7 ANALYSE PAR DIFFRACTION X

La diffraction aux rayons X permet de déterminer la structure des minéraux, s'ils sont amorphes ou cristallisés et la nature des phases cristallines. Les analyses ont été effectuées sur poudre de pâte de ciment après un broyage fin ($<50\mu\text{m}$) des pâtes de ciment durci conservées trois mois dans l'eau et dans la solution de sulfate d'aluminium à forte concentration (2500mg/l). Le ciment utilisé est à base du ciment CPJ. Les résultats sont bien illustrés sur les figures 3.9 et 3.10.

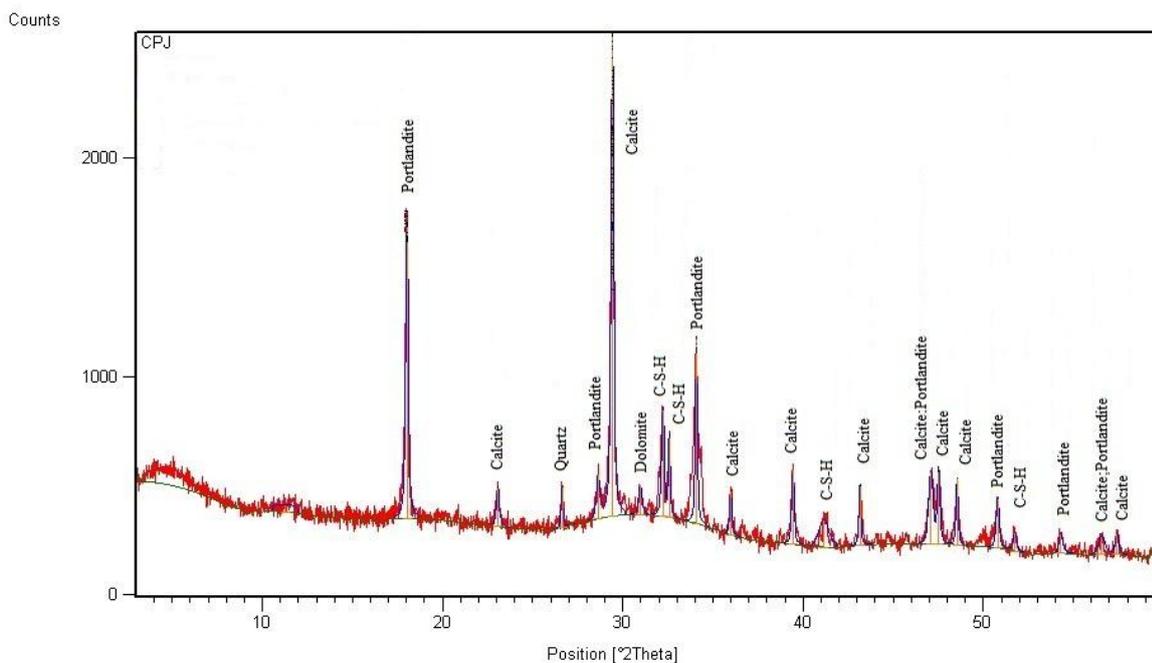


Figure 3.9 : *Diagramme de diffraction X de poudre de pâte de ciment témoin à base de ciment CPJ.*

La figure 3.9 présente le diffractogramme de l'échantillon témoin. On observe des pics de cristaux des produits d'hydratation du ciment : C-S-H, portlandite. La présence de la calcite (CaCO_3) et de la dolomite (Mg.CaCO_3) montrent que le ciment utilisé contient un ajout de fillers de calcaire.

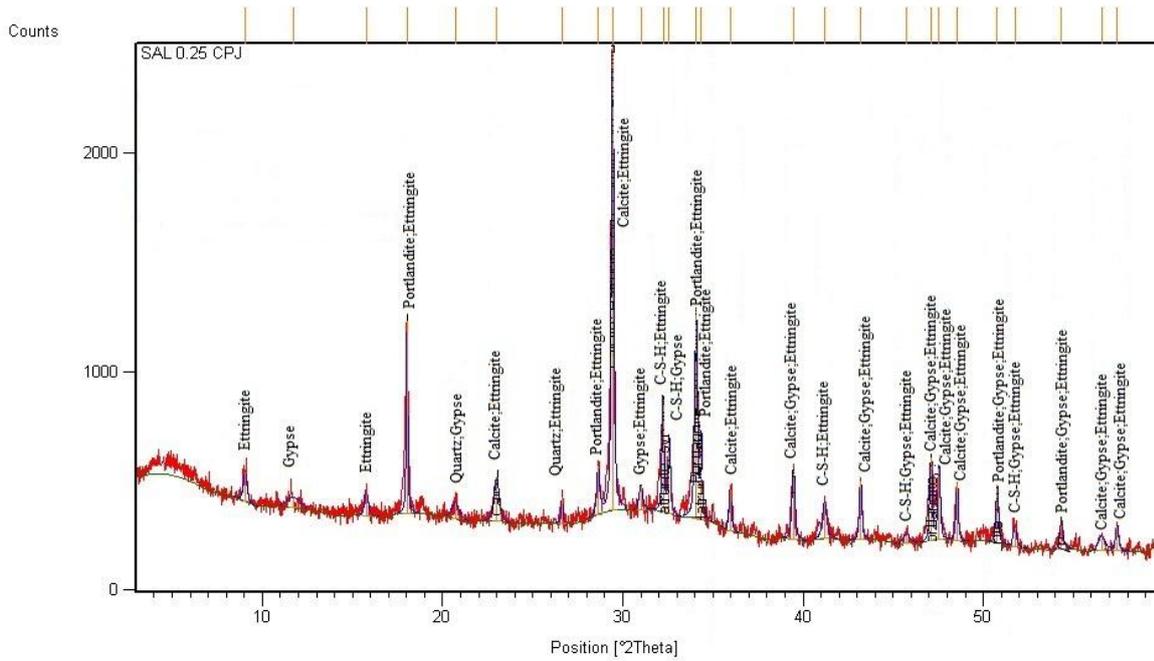
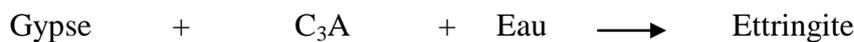
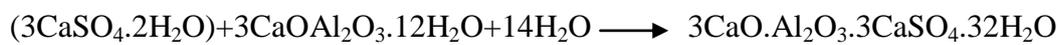


Figure 3.10 : Diagramme de diffraction X de poudre de pâte de ciment à base de ciment CPJ immergé dans $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ à 2500mg/l

Dans le diffractogramme de poudre de pâte de ciment conservé dans le sulfate d’aluminium à forte concentration (figures 3.10), l’intensité des pics caractérisant la portlandite a fortement diminuée alors que la phase du gypse a augmenté avec la présence de l’ettringite.

La présence de l’ettringite est expliquée par la réaction du gypse avec les C_3A qui donne naissance à une ettringite secondaire expansive suivant la réaction :





Conclusion

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Cette étude expérimentale étudie la durabilité de béton de barrage qui sont exposés à une eau traitée avec du sulfate d'aluminium. Le programme expérimental a consisté à étudier des éprouvettes de béton $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$: béton à base du ciment CPA et béton avec du ciment CPJ. Les échantillons sont démoulés après 24h et conservés dans l'eau à 20°C pendant 28j, puis ils sont conservés en salle climatisée (25°C , 50%HR) jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite, ils sont conservés pendant 02 mois dans des solutions de sulfate d'aluminium à 25mg/l et 2500mg/l.

Après 2 mois de conservation dans la solution de sulfate d'aluminium, le béton à base des deux types de ciment, ont montré des pores visibles à l'œil nu. En effet, la surface des éprouvettes a changé de forme par rapport à celle conservée dans de l'eau.

L'étude de la perte de masse a montré que la perte est beaucoup plus marquée avec le ciment CPJ qu'avec le ciment CPA (ciment résistant aux sulfates avec un C_3A de l'ordre de 4%). Néanmoins, la perte de masse n'est pas importante pour les deux types de béton (0,57 et 1,11%) et cela pour une forte concentration en sulfate d'aluminium de 2500mg/l. La perte de masse dans le bain du sulfate d'aluminium est du essentiellement à la dégradation de la surface de l'éprouvette: présence de minuscules pores visibles à l'œil nu sur la surface des échantillons. Cela est dû à la formation d'un sel de calcium soluble confirmé par analyses par diffraction aux rayons X que c'est du gypse et de l'ettringite secondaires.

Le test de colorimétrie par pulvérisation avec une solution de phénolphthaléine met en évidence une faible profondeur de carbonatation pour les deux ciments à différentes concentrations en solution d'aluminium. Toutefois, la profondeur d'alcalinité réduite est légèrement supérieure quant il s'agit du ciment CPJ, cela ne peut être expliqué que par sa teneur en C_3A légèrement supérieure à celle du ciment CPA utilisé. Ce résultat est en corrélation avec les pertes de masse enregistrées.

L'analyse mécanique montre une augmentation de résistance de l'ordre de 30% pour une faible concentration en sulfate d'aluminium (25mg/l) et pour une concentration cent fois supérieure (2500mg/l) pour le béton à base du ciment CPA (CRS). Pour le béton à base du CPJ, on observe une augmentation de 10% des résistances pour une faible concentration en sulfate d'aluminium (25mg/l) et un maintien des résistances pour une concentration cent fois supérieure (2500mg/l). Ces résultats peuvent être expliqués par :

Conclusion

- Le ciment CPJ gagne encore en maturité par suite d'ajouts minéraux actifs tels que le laitier et la pouzzolane. En effet, le laitier a un pouvoir hydraulique latent et la pouzzolane riche en silice, ces deux minéraux consomment la portlandite libérée par l'hydratation du clinker pour former d'autres CSH, élément responsable de la résistance;

- Le ciment CRS, à faible teneur en C_3A , ralentit l'hydratation et diminue les réactions avec le gypse et donc il y aura moins d'ettringite expansible.

Comme conclusion générale, on peut affirmer que malgré des concentrations fortes en sulfates d'aluminium, la résistance des bétons étudiés n'a pas été affectée, au contraire, une amélioration des résistances est enregistrée surtout avec le ciment CRS. Cela confirme sa résistance élevée aux sulfates.

Comme perspective, nous proposons de faire l'étude avec un béton confectionné avec du ciment aux ajouts minéraux locaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jauberthie R, Robu I, Lanos CH, Mortreuil FX, Camps J-P. Caractérisation par diffraction X de l'attaque superficielle de pâtes de ciment en milieu sulfatique. *J. Phys IV*, 1998. 8: 519 – 523.
- [2] Jauberthie R, Lanos C-H, Temimi M, Laquerbe M, Rendell F. Concrete damage due to sulphate attack. *Proceedings of Second International Conference on Concrete under Severe Conditions*, Tromsø, Norway, vol. 1, London E and FN Spon, 1998. p. 232- 241.
- [3] Jauberthie R, Laquerbe M, Rendell F. Dégradation de mortiers sous différents milieux sulfatiques. *Annales du bâtiment et des Travaux Publics*, 1999. 4 : 21- 28.
- [4] Rendell F, Jauberthie R, Camps J-P. The influence of surface absorption on sulphate attack. In: R.K. Dhir, M.J. McCarthy (Eds.), *Proceedings of Creating with Concrete, Concrete Durability and Repair Technology*, Dundee, Thomas Telford, London, 1999. p. 197-208.
- [5] Rendell F, Jauberthie R. The deterioration of mortar in sulphate environments. *Construction and Building Materials*, 1999.13: 321-7.
- [6] Jauberthie R, Rendell F. Physicochemical study of the alteration surface of concrete exposed to ammonium salts. *Cement and Concrete Research*, 2003. 33: 85-91.
- [7] Biczok J. *Concrete Corrosion and Concrete Protection*. 8th ed. Akademiai Kiadó, Budapest, 1972.
- [8] Cao H.T, Bucea L, Ray A, Yozghatlian S. The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 1997.19 (2): 161-71.
- [9] Achoura D, Redjel B, Jauberthie R, Lanos C. Influence des conditions de maturation sur les comportements physico-chimique et mécanique des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment. *Matériaux & Techniques*, 2008. 96 : 189-99.
- [10] Naceri A, Messaoudene I. The chemical and physical effects of the granulated blast furnace slag on concrete compressive strength. *World Journal of Engineering*, 2006. 3(3): 43-51.
- [11] Naceri A, Messaoudene I. Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier. *Lebanese Science Journal*, 2006. 7 (2): 85-96.
- [12] El-bachir Y. *Chimie des Matériaux Industrielles*. Université Mohamed Boudiaf, Faculté de chimie, Département de génie des matériaux ,2014.p13.
- [13] Dreux G, Festa J. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, huitième édition. Paris, Eyrolles, 1998.
- [14] Lott J.-P, al, *Cimbéton : Centre d'information sur le ciment et ses applications, Ciment et béton, conception et réalisation*, Am principe Paris, 2005.

Références bibliographiques

- [15] **NF EN 206-1** : Norme française partie 1, Béton : spécification, performance, production et conformité.
- [16] **NF EN 197-1** : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment Courants. p15-101-1.
- [17] Chikouche M.A. Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires. Thèse de Magister. Université de M'sila, 2008.
- [18] Neville A. M. Propriétés des bétons. ed, Crib. Paris, Eyrolle, 2000.
- [19] Houst Y.F. Diffusion de gaz, Carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département des matériaux.
- [20] **NF EN 1008** : Eau de gâchage pour béton s—Spécifications d'échantillonnage, D'essai et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, Y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, P18-211.
- [21] **XP P 18-540** : Granulats —Définitions, conformité, spécifications, p18-540.
- [22] Witier P, Et AL. Analyse et caractérisation de matériaux de construction. Techniques de l'Ingénieur, 1999. p1, 27.
- [23] Dreux. G. Nouveau guide du béton. Paris, Eyrolles, 1979. p 201.
- [24] Gabrysia F. Matériaux, Chapitre 4, bétons, 2007.
- [25] Adamm N. Propriétés des bétons, Paris, Eyrolles, 2000.
- [26] Venant M. Ciment et bétons, 2ème édition, 1973.
- [27] Groupe Eyrolles. Cône d'Abrams, Paris, Eyrolles, 2010.
- [28] **NA EN-12390-3**: Essais pour béton durci, Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes ,2009.
- [29] Jihad Z. Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages. Thèse de docteur. l'école normale supérieure de Cachan, 2009. p9.
- [30] Durabilité du béton, Durabilité et réparation du béton. Université de Sherbrooke, GCI 714, Article d'internet, Chap 2, pp 28 ,62.
- [31] Baron J, Ollivier J. Introduction à la durabilité du béton, la durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, ISBN 2- 85978-184-6 Paris 1992, pp 100, 106.
- [32] Andriamanantsilavo N.R. Comportement des matériaux cimentaire dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussé et du processus de maturation. Thèse doctorat. Université de Bretagne sud, 2003.

Références bibliographiques

- [33] Bertron A. Durabilité des matériaux cimentaires soumise aux acides organiques cas particulière des effluents d'élevage. Thèse doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2004. p 31,32.
- [34] Sierra R. Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques. Rapport de recherche No 39. LCPC, Septembre 1974.
- [35] Diamond S. Cement paste microstructure: an overview at several levels. Proc, of the conference of Sheffield on hydraulic cement pastes, cement and concrete Association. 8-9, April 1976.
- [36] Kantro D. L, Brunauer S, Weise C. H. J. Phys. Chem. 66,1962. pp 1804-1809.
- [37] Pokkuluri K. Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range. Master thesis. Virginia University, October 1998. 210 p.
- [38] Older Y. Hydration, Setting and hardening of Portland cement, Chemistry of Cement and Concrete, Chap.6, Arnold, 4théd, 1998.
- [39] Gane R. Cours de durabilité et Réparation des bétons, Chapitre 2. Université de Sherbrooke, Canada, 2002. p32.
- [40] Li G. Etude du phénomène d'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobes de déchets radioactifs sulfates. Thèse de doctorat. ENPC, 1994. 241 p.
- [41] Cohen M.D. Theory of expansion in sulfoaluminate, type expansive cement—schools of thought, cement and concrete research. Vol. 13, pp 809-818.
- [42] Chatterji S. Jeffery J.W. A new hypothesis of sulphate expansion, Magazine of concrete research. Vol. 15, No 44, 1963. pp 84-86.
- [43] Escadeillas G, Hornain H. Cours de durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs . chapitre 12. p 616-617-632-661-662.
- [44] Monicard R. Caractéristiques des roches et réservoirs. Analyse des carottes, Cours de production de l'IFP. 1975: Ed Technip 2eme édition. 94.
- [45] Messaoudene I. Cour de durabilité. Master. Université de Mouhamed el Bachir Ibrahim Bordj Bou Arreridj Département de génie civil, 2016.
- [46] Tulliani J.M, AL. Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters Cement and Concrete Research, 2002. 32(6): p 843-849.
- [47] De Belie N, AL. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. Cement and Concrete Research, 2004. 34(12). p 2223-2236.
- [48] Davis J.L, AL. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. International Biodeterioration & Biodegradation, 1998. 42(1).p 75-84.

Références bibliographiques

- [49] Delmas L, Baillot T. Influence de la mise en oeuvre sur la porosité des bétons, Projet de Recherches Technologiques, Institut National des Sciences Appliquées, Projet de Recherches Technologiques, 2006. 62 p.
- [50] Otis N. Influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pâte/granulat dans les matériaux cimentaires, M.Sc. Thesis, Université de Sherbrooke, Département de Chimie.
- [51] Plassais A. Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Physique et chimie des matériaux, 9/01/2003, p167.
- [52] Neville A. The confused world of sulphate attack on concrete. Cem. Concr. Res., vol. 34, 2004, p 1275-1296.
- [53] Concret durabilité .Article d'Internet.
- [54] Introduction Les barrages sont des ouvrages en terre.Chapitre4, conception et dimensionnement de la retenue. Article d'Internet, p82.
- [55] Fiche technique de barrage d'Ain-zada bordj-bou-arréridj, 2016.
- [56] **NF P 15-319** : Liants hydraulique, Ciment pour travaux en eaux a haute teneur en sulfates, 1995.
- [57] Rendell F, Jauberthie R. The deterioration of mortar in sulphate environments. Department of Civil Engineering, Rennes, France. Article d'internet ,1999.
- [58] Petrov. Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite.Thèse de Ph D.Université de Sherbrooke, 2003.
- [59] Le chatelier H.Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Thèse.Paris, 1887.
- [60] Candlot.Ciments et chaux hydrauliques. Baudry édit. Paris, 1898.
- [61] Lafuma H.Théorie de l'expansion des liants hydrauliques. Rev. Mat. Constr. dec. 1929 et janv. 1930.
- [62] Zivica V, Bajza A. Acidic attack of cement based materials, a review. Part 2: Factors of rate of acidic attack and protective measures. Construction and Building Materials, 16, 2002. p 215-222.
- [63] Dugnolle E. Corrosion biologique des bétons au contact avec les eaux résiduaires. Revue CSTC, n° 4, 1973. p 26-28.
- [64] Bertron A, Duchesne J, Escadeillas G. Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure. Cement and Concrete Composites, vol. 27, n° 10, 2005. p 898-909.

Références bibliographiques

- [65] Yamanaka T, Et Al. Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth. *Water Research*, 2002. 36(10), p2636-2642.
- [66] Bertron A, Coutand M, Cameleyre X., Escadeillas G, Du- Chesne J. Attaques chimique et biologique des effluents agricoles et agroali-mentaires sur les matériaux cimentaires. *Matériaux et Techniques*, 93 (hors série), 2005. p111-121.
- [67] **NF EN 196-3** : Méthodes d'essais des ciments, Détermination du temps de prise et de la stabilité .p 15-471-3.
- [68] **NF EN 196-6** : Méthode d'essais des ciments, Détermination de la finesse (Indice de Classement) .p 15- 476.
- [69] **NA EN 1097-6** : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2005. p 18-650-6.
- [70] Ghomari F. Science des matériaux de construction. Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, 2006.
- [71] **NF EN 933-5** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 5 : détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons, Juin 1998.
- [72] Belagraa L. Court matériaux de construction. Université de mouhamed elBachir Ibrahim Bordj Bou Arreridj, 3eme licence, département de génie civil, 2012.
- [73] **NF EN 933-1** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 1 : détermination de la granularité, Analyse granulométrique par tamisage, Mai 2012.
- [74] Dupain R, Lanchon R, et Saint-Arroman J.C. Granulats, Sols, Ciments et Bétons, caractérisation des mâtereaux de génie civil par les essais de laboratoire, Paris. Éditions Casteilla, 2ème Édition, 2000.p26 - 394.
- [75] Neville Adam M. Propriété des bétons. Paris. Editions Eyrolles.p103 – 726.
- [76] **NF EN 933-8** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats évaluations des fines, Equivalent de sable, 2006. p18-620-8.
- [77] **NA EN 12390-2** : Essai pour béton durci, Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, 2007.
- [78] Daupin R, Saint-Arroman J-C. Granulats, sols, ciments et bétons .édition, 2009.
- [79] **NA EN 12350-2** : Essai pour béton frais, Essais d'affrondissement, 2007.
- [80] **NF P18-422** : Bétons, Mise en place par aiguille vibrante 1992.
- [81] **NF P18- 423** : Bétons, Mise en place par piquage 1992.