



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Travaux public
Voies et ouvrages d'arts

Réf. : V22 /2018

Présenté et soutenu par :
Larroum mohamed

Le : lundi 25 juin 2018

Recherche bibliographique sur l'effet de l'attaque sulfatique externe et interne sur la durabilité des bétons

Jury :

Dr.	Houhou nabil	MCA	Université de Biskra	Président
M.	Feia sadok	MCB	Université de Biskra	Examineur
Dr.	Guettala abdelhamid	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Page de garde

Remerciement :

Merci !C'est un petit mot tout simple mais qui pèse lourd . Un grand merci, un petit merci , peu importe sa taille,il n'a pas de dimension .C'est un signe de reconnaissance qui ne connaît pas d'indifférence .

Merci ,Pr A.guettala , qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail .

Merci, chers parents, vous, source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.

Merci et encore merci mes professeurs qui ont contribué à mon apprentissage et à mon savoir depuis l'école primaire jusqu'à l'université

Merci, à ma famille, mes frères et mes soeurs de m'avoir encouragé et soutenu.

Merci, mes chères amies et mes chers camarades pour m'avoir permis de passer cinq belles années à l'université.

Merci, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce mémoire à :

· Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes sœurs Wafa, Sarah et Iman qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Résumé

ملخص:

الهدف من البحث المقدم هو دراسة هجوم الكبريتات الخارجية و الداخلية, و مختلف العوامل المتحكمة بها, وتأثيرها على ديمومة الخرسانة, ولهذا الغرض قمنا بدراسة نسبة الكبريتات و قيمها القصوى المحددة في الاسمنت , و في جميع مكونات الخرسانة(ماء الخلط الرمل و الحصى), ثم قمنا بتحديد خصائص كل خرسانة حسب الظروف البيئية المعرضة لها, علما ان هذه الخصائص تلعب دورا كبيرا في تحديد سرعة الهجوم من طرف الكبريتات, و من بين اهمها, نذكر تركيز ونوعية الاسمنت في الخرسانة, و نسبة الماء على الاسمنت.(E/C), حيث انه كلما زادت نسبة هذه الأخيرة زادت نفاذية الخرسانة, و بالتالي يكون اختراق و انتشار ايونات الكبريتات أسرع في الخرسانة.

وبهذا اقترحنا بعض الحلول التي من شأنها أن تزيد في الديمومة, و نذكر منها, التقليل في النسبة الماء على الاسمنت.(E/C), و زيادة مسافة التغليف للتسليح, و طلاء الخرسانة بمادة عازلة (فلينتكوت), و التي تمنع اختراق العوامل العدوانية بها, وبهذا نساهم في زيادة متانة الخرسانة, ومقاومتها لهجوم الكبريتات على مدى السنوات

الكلمات المفتاحية: هجوم الكبريتات , تدهور الخرسانة , ديمومة الخرسانة , ايترنجيت, نسبة الماء على الاسمنت.(E/C)

Résumé :

L'objectif de la recherche présentée est l'étude d'une attaque externe et internes par des sulfates sur le béton, et les facteurs limitant l'attaque, et leur l'effet sur la durabilité du béton. A cet effet, nous avons étudié la proportion des sulfates et des valeurs maximales spécifiées dans le ciment, et dans tous les composants en béton (eau de gâchage, sable et gravier ...etc.). Les caractéristiques de chaque béton sont déterminées en fonction des conditions environnementales auxquelles il est soumis, ces caractéristiques déterminent la vitesse de l'attaque par le soufre, notamment la concentration et la qualité du ciment dans le béton, le rapport l'eau sur le ciment (E/C), ce dernier augmente la perméabilité du béton, et donc la pénétration est la propagation des ions soufre plus rapidement dans le béton.

De cette manière, nous avons proposé quelques solutions, qui augmenteront la durabilité, telles que la réduction de l'eau sur le ciment (E/C), l'augmentation de l'enrobage, pour le renforcement et le revêtement du béton avec flintkote, qui empêche la pénétration des agents agressifs, ça augmente la résistance accrue du béton et la résistance aux attaques de sulfate au cours des années.

Mots-clés : Sulfate Attaque, Dégradation du béton, Durabilité du Béton, Ettringite, Rapport de l'eau sur le ciment (E/C).

Abstract:

The objective of the research presented is the study of an attack of foreign and internal sulphates, and various control of the factors, and their impact on the durability of the concrete. For this purpose we have studied the proportion of sulphates and maximum values specified in cement, and in all concrete components (mixture of sand, gravel and water). The characteristics of each concrete are determined according to the environmental conditions to which it is subjected, these characteristics determine the speed of the attack by the sulfur, in particular the concentration and the quality of the cement in the concrete, the percentage of water on the cement, the latter increases the permeability of the concrete, and therefore the penetration is the propagation of sulfur ions more rapidly in the concrete.

In this way, we have proposed some solutions, which will increase the durability, such as the reduction of water on the cement (W/C), the increase of the coating, for the reinforcement and the coating of the concrete with flintkote, which prevents the penetration of aggressive factors, it increases the increased resistance of the concrete and the resistance to sulphate attack over the years.

Keywords: Sulfate Attack, Concrete Durability, Degradation, Ettringite, Water to cement ratio (W / C).

Sommaire :

Introduction générale.....	a-c
CHAPITRE 1	4
Introduction :.....	5
1- Définitions :.....	6
2- Les constituants de ciment :.....	6
3- Différents types de ciments :.....	8
4- les classes de résistance :.....	9
5- Les exigences chimiques :.....	10
6- Etapes de fabrication du ciment Portland :.....	11
7- Le pourcentage de clinker dans quelques types des ciments:.....	14
8- L'hydratation :.....	14
9- Les formes cristallines du sulfate dans le clinker :.....	15
10- Sulfate de calcium ou anhydrite :.....	16
11- Concentration maximale et rôle du soufre dans le Ciment :.....	16
12- Les constituants du béton :.....	17
13- La perméabilité du béton :.....	22
14- Quels sont les ciments à haute résistance aux sulfates ?.....	23
15- Le choix de type du ciment on fonction environnement :.....	24
16- Le choix du ciment on fonction de l'agressivité:.....	26
17- La composition et les propriété du béton selon l'environnement.....	28
l'attaque chimique « XA » et l'eau de mer « XS » :.....	28
18- Les exigences relatives au béton exposé aux attaques des sulfates :.....	29
Conclusion :.....	30
CHAPITRE 2	32
Introduction :.....	33
1- Définition de l'attaque sulfatique :.....	34

2- Sources des sulfates :	34
3- Mécanisme d'attaque du béton par les sulfates :	37
4- A) Processus d'attaque par les sulfates internes :	38
5- Différents types d'ettringite :	42
6 -Les mécanismes physico-chimiques de la réaction sulfatique interne (RSI) :	45
7 – Les facteurs limitant l'attaque du béton par les sulfates :	47
8- Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :	50
9- Quelles sont les conséquences du gonflement lié à l'ettringite ?	50
10- Comment réduire les risques de formation d'ettringite expansive ?	52
11- Que faire lorsque les ouvrages sont atteints par une expansion sulfatique ?	52
12- Bilan des structures :	56
13- Détermination du niveau de prévention nécessaire :	57
Conclusion :	63
CHAPITRE 3	64
Introduction	65
1- Travaux de Gagné :	66
2- Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques :	67
3- L'effet de l'attaque sulfatique externe (M ^{ed} Rissel Khalifa) :	71
4- Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton:	77
5- Effets de l'attaque de sulfate de magnésium sur des mortiers à base des ciments composés au calcaire :	81
Conclusion	85
CONCLUSION GÉNÉRALE	93
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE	97

Liste des tableaux :

Tableau 1 - Les différents types de ciments.....	8
Tableau 2 – Définition des classes de résistance.....	9
Tableau 3 – Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants (Doc. Cimbéton)	10
Tableau 4 -les normes des additions caractéristiques physico-chimique.....	18
Tableau 5 - les teneurs en différents constituants d'eau de gâchage.....	19
Tableau 6 - les ciments à haute résistance aux sulfates	23
Tableau 7.A: Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines selon la norme NF EN 206-1.....	26
Tableau 7.B : recommandations pour le choix des ciments, d'après le tableau 7.A.....	27
Tableau 8 - les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton.....	29
Tableau 9 - Les exigences relatives au béton.....	29
Tableau 10 : épaisseurs minimales d'enrobage des armatures à respecter en fonction des conditions d'exposition selon le BAEL 99.....	55
Tableau 11 - étude comparative des différents facteurs déterminants de la RSI rencontrés dans des ponts expertisés.....	56
Tableau 12 - exemples d'ouvrages ou éléments d'ouvrage classés par catégorie.....	57
Tableau 13 – classes d'exposition de la partie d'ouvrage vis-à-vis de la RSI.....	59
Tableau 14 - choix du niveau de prévention.....	60
Tableau 15 : Caractéristiques et performances mécaniques des différents BAP.....	72
Tableau 16 : Valeurs des porosités et des résistances à 28j des quatre types de béton.....	73

Liste des figures :

Figure 1 : Fabrication théorique du ciment.....	5
Figure 2 : Etapes de fabrication du ciment.....	11
Figure 2-A : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO ₃)	13
Figure-3 : Image de clinker par microscope optique.....	15
Figure-4 : CaSO ₄ dans le clinker (CS) (BARKAKATI et al, 1993).....	16
Figure 5 : Effet des paramètres influençant la perméabilité (d'après Scrivener, 2001).	22
Figure 6-A : ciment portland résistant aux sulfates (CPA CEM 42,5 CSR)	23.
Figure 6-B : ciment portland composé (CPJ CEM II/A 42,5)	23
Figure 7 : Localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain.	33
Figure 8 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.	34
Figure 9 : L'origine des sulfates (interne ou externe).....	35
Figure 10 : Origine de la pollution de l'atmosphère, exemple la centrale à cycle combine de production d'électricité (chegga-Biskra)	36
Figure 11 : Etapes d'attaque du Béton par les sulfates.....	38
Figure 12 : La formation de l'ettringite secondaire.....	38
Figure 13 : Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates.....	39

Figure -14 : Ettringite (CARDE, 2007).....	42
Figure 15 : Aiguilles d'ettringite primaire non expansive dans la pate de ciment (microscope électronique à balayage).....	43
Figure 16 : Ettringite ayant des propriétés extensives et localisée a l'interface pate/granulat (microscope électronique à balayage)	45
Figure 17 : Influence du dosage en ciment et de la teneur en C ₃ A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na ₂ SO ₄ à 10%).	47.
Figure 18-A : fissuration multidirectionnelle localisé sur la face verticale à l'extrémité d'un chevet du pont	51
Figure 18-B : Attaque sulfatique externe (pile du pont).....	51
Figure 18-C : Fissuration très marqué dans la partie de la pile en contact avec l'eau.....	51
Figure 18-D : Extrémité d'une traverse de chemin de fer présentant un réseau de fissures provoquées par une RSI.....	51
Figure 19 : flintkote.....	53
Figure 20 -A : La teinture du flintkote.....	53
Figure 20 -B : Flintkote	53
Figure 20 -C : Un ouvrage souterrain (béton armé)	54
Figure 20 -D : Une semelle isolée (flintkote).....	54
Figure 21-A : Quelques échantillons de roches gypseuses existantes dans les sols.....	65
Figure 21-B : Origine de la pollution de l'atmosphère, exemple d'une cimenterie.....	65
Figure 22 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.....	66
Figure 23 : Presse des éprouvettes 11x22cm de l'Ecole Polytechnique d'Orléan.....	71
Figure 24 : Confection des éprouvettes cylindriques en béton autoplaçant.....	72

Figure 25 : Immersion des échantillons de l'eau dosée à 5 % de Na ₂ SO ₄ , 10H ₂ O.....	73
Figure 26 : La résistance BAP en fonction de leurs porosités.....	74
Figure 27-A : Fissuration des éprouvettes 11x22 cm en béton CEM II/59 après 5 mois d'immersion complète.....	75
Figure 27-B : Fissuration des éprouvettes 11x22 cm en béton CEM II/49 après 5 mois d'immersion complète.....	75.
Figure 27-C : Etat intact des éprouvettes 11x22 cm en CEM I/59 et en CEM I/49 après 6 mois d'immersion complète.....	75
Figure 28 : Evolution des résistances à la compression des cylindres 11x22 cm.....	76
Figure 29 : Eprouvette cubique de 10x10x10 cm ³	77
Figure 30 : Protocole de test accéléré de la solution(a): d'H ₂ SO ₄ 5000 ppm et (b) de Na ₂ SO ₄ 5000 ppm.....	78
Figure 31 : Résistance à la compression en fonction du temps des cubes vieillis dans 5000ppm d'H ₂ SO ₄ et dans 5000 ppm de Na ₂ SO ₄	78
Figure 32 – (A) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 172heures dans 5000 ppm d'H ₂ SO ₄	79
Figure 32 – (B) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 696heures dans 5000 ppm d'H ₂ SO ₄	79
Figure 32 – (C) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 847heures dans 5000 ppm d'H ₂ SO ₄	79
Figure 33 : Evolution de l'expansion en fonction du temps d'exposition.....	83
Figure34 : plan de vue du bâtiment.....	87

Figure 35 : Abaissement dans le sol provoquant une élévation des trottoirs.....	87
Figure 36 : Béton détérioré par une attaque par les sulfates (90 logements Biskra).....	88
Figure 37 : L'expansion du volume ou le gonflement.....	89
Figure 38 : remplacement des poteaux de départ par des massifs en béton armé.....	90

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeurs. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part des pays, et très nombreux sont les professionnelles qui se livrent à cette activité.

Cependant, si le métier de construire a une grande importance pour l'homme, la durabilité des ouvrages constitue l'une de ces préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil

Les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer. Pour combien de temps? Il est difficile de répondre à cette question

Désormais, les ouvrages sont donc dimensionnés pour une durée de vie explicitement prescrite tout en prenant en compte l'environnement dans lequel ils se trouvent. Certains pour des durées de vie exceptionnelles comme c'est le cas du tunnel sous la Manche (120 ans), du pont sur le Tage (120 ans), du viaduc de Millau (120 ans). Pour respecter de telles prescriptions, le calculateur doit disposer de règles de dimensionnement basées sur la connaissance des modes de dégradations du béton (et du béton armé ou précontraint) et sur des modèles prédictifs des dégradations. L'ingénieur matériau doit, lui, apporter des solutions permettant aux ouvrages de mieux résister aux agressions de l'environnement. La garantie d'une durée de vie satisfaisante doit être trouvée en associant des matériaux adaptés à l'environnement, des méthodes de mises en œuvre et de cure soignées, des outils de calculs prenant en compte les dégradations possibles des ouvrages tout en maintenant une bonne sécurité.

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative. En raison de l'interaction du béton avec des influences externes, les propriétés mécaniques et physiques du béton peuvent être menacées.

Parmi les facteurs menaçants l'attaque des produits chimiques tels que les acides qui sont nocifs pour le béton.

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation - c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par

Introduction générale

conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

L'attaque chimique constitue un sujet d'importance croissante, en raison de la propagation des dommages des structures en béton dans les zones urbaines et industrielles. Bien que le ciment Portland ordinaire est le plus couramment utilisé dans la construction d'infrastructures, sa résistance aux attaques chimiques, tels que les sulfates est un sujet préoccupant de plus en plus à travers tout le monde.

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories.

- Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique ;
- Les liquides inorganiques ou organiques qui, indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir ;
- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses ;
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies.

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratés ne sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

Au contraire, si les produits de réactions sont insolubles, deux cas peuvent se présenter suivant que la nouvelle phase est ou non expansive. Si les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, ils comblent progressivement la porosité des bétons et ainsi diminuent la perméabilité et augmentent la durabilité

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe, les facteurs et les mesures de protection des matériaux à base de ciment contre ces attaques sont utiles. En

Introduction générale

d'autres termes La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures.

Après une présentation sommaire du ciment Portland, et de ses composantes, on entame dans le deuxième chapitre les pathologies dues aux attaques par les sulfates externes et internes, Le mécanisme d'attaque du béton par les sulfates. Les conséquences de l'attaque sulfatique, Et pour le troisième chapitre : Les travaux sur l'attaque sulfatique et Diagnostic et réparation d'une structure en béton armé.

CHAPITRE 1

Introduction :

Le mot ciment est dérivé eu latin « caementum » qui signifie « pierre non taillé ». Les normes internationales modernes le définissent comme étant les résultats de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile (figure1)

Actuellement le ciment est le matériau de base pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil. La production de l'industrie cimentaire est directement liée à l'activité du secteur de construction en général. Elle est donc étroitement tributaire de la conjoncture économique général

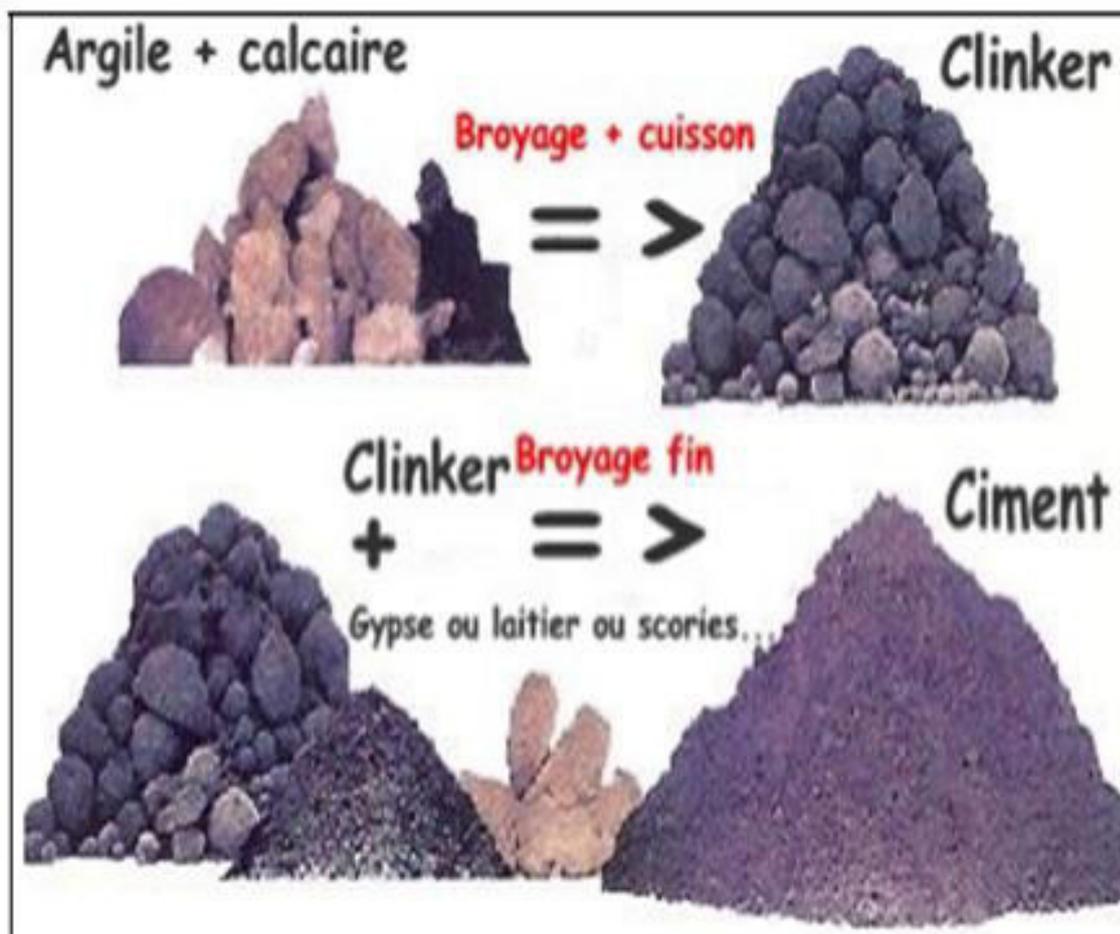


Figure 2 : Fabrication théorique du ciment

1- Définitions :

Ciment : Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau

Constituant principal: Matériau minéral spécialement choisi, représentant une proportion supérieure à 5% en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires

Constituant secondaire : Matériau minéral spécialement choisi, représentant une proportion inférieure ou égale à 5% en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires

Valeur caractéristique : Valeur correspondant à une propriété requise en dehors de laquelle se situe un pourcentage spécifié, le percentile P_K de toutes les valeurs de la population étudiée[7]

2- Les constituants de ciment :

Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituants. [10]

Propriétés hydrauliques – C'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;

Propriétés pouzzolaniques – C'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables ;

Propriétés physiques – Elles améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...).

Clinker Portland (K) – Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO , SiO_2 , Al_2O_3 apportés par les calcaires et argiles de

CHAPITRE1

roches soigneusement sélectionnées. Ce constituant entre dans la composition de tous les ciments.

Laitier granulé de haut fourneau (S) – Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Le laitier granulé de haut fourneau doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi en cimenterie.

Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q) – Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

Cendres volantes siliceuses (h) ou calciques (W) – Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

Schistes calcinés (T) – Sous réserve de caractéristiques convenables définies dans la norme les schistes calcinés peuvent être utilisés.

Calcaires (L, LL) – Ce sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.

Fumées de silice (D) – Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe.

Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

Sulfate de calcium – Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

CHAPITRE 1

Constituants secondaires – Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment. Ils ne peuvent excéder 5 % en masse.

Additifs – Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment.

La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment (exception faite des pigments). La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

3- Différents types de ciments :

Les différents types de ciments sont résumés dans le tableau 1 en fonction de leur composition. Tous ces ciments peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courants)		Composition (pourcentage en masse) ^(a)											
			Constituants principaux									Constituants secondaires		
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaïque		L		LL	
K	S	D ^(b)	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100										0-5	
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35										0-5
CEM II	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94		6-10									0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94			6-20								0-5
		CEM II/B-P	65-79			21-35								0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20							0-5
		CEM II/B-Q	65-79				21-35							0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94					6-20						0-5
		CEM II/B-V	65-79					21-35						0-5
		CEM II/A-W	80-94						6-20					0-5
		CEM II/B-W	65-79						21-35					0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94							6-20				0-5
		CEM II/B-T	65-79							21-35				0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94								6-20			0-5
		CEM II/B-L	65-79								21-35			0-5
		CEM II/A-LL	80-94									6-20		0-5
CEM II/B-LL		65-79									21-35		0-5	
Ciment Portland composé ^(c)	CEM II/A-M	80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65									0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80									0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95									0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^(c)	CEM IV/A	65-89		11-35	11-35	11-35	11-35	11-35				0-5	
		CEM IV/B	45-64		30-55	30-55	30-55	30-55	30-55				0-5	
CEM V	Ciment composé ^(c)	CEM V/A	40-64	18-30		18-30	18-30	18-30					0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50		31-50	31-50	31-50					0-5	

Tableau 1 - Les différents types de ciments

4- les classes de résistance :

Définition des classes – Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196.1 (août 1995) – Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques, et exprimée en N/mm^2 :

$$(1 N/mm^2 = 1 MPa = 10 daN/cm^2 = 10 bars).$$

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau 2.

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-		
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	-		
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-		

Tableau 2 – Définition des classes de résistance

5- Les exigences chimiques :

Les exigences chimiques sont définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants, elles sont données en pourcentage en masse du ciment produit fini [9]

LES CEMENTS				
Tableau 3 – Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants (Doc. Cimbéton)				
1	2	3	4	5
Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences ^(a)
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Résidu insoluble	EN 196-2 ^(b)	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5 N	≤ 3,5 %
		CEM II ^(c) CEM IV	32,5 R 42,5 N	
		CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
CEM III ^(d)	Toutes classes			
Chlorure	EN 196-21	Tous types ^(e)	Toutes classes	≤ 0,10 % ^(f)
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

1) Les exigences sont données en pourcentage en masse du ciment produit fini.

2) Le ciment de type CEM II/B-T peut contenir un **maximum de 4,5 % de SO₃** quelle que soit la classe de résistance.

CHAPITRE1

3) Le ciment de type CEM III/C peut contenir un **maximum de 4,5 % de SO₃**. (Les sulfates)

6- Etapes de fabrication du ciment Portland :

Le ciment est produit à partir de roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5%) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire....etc.

Le processus de fabrication de ciment Portland est schématisé dans la figure 2:

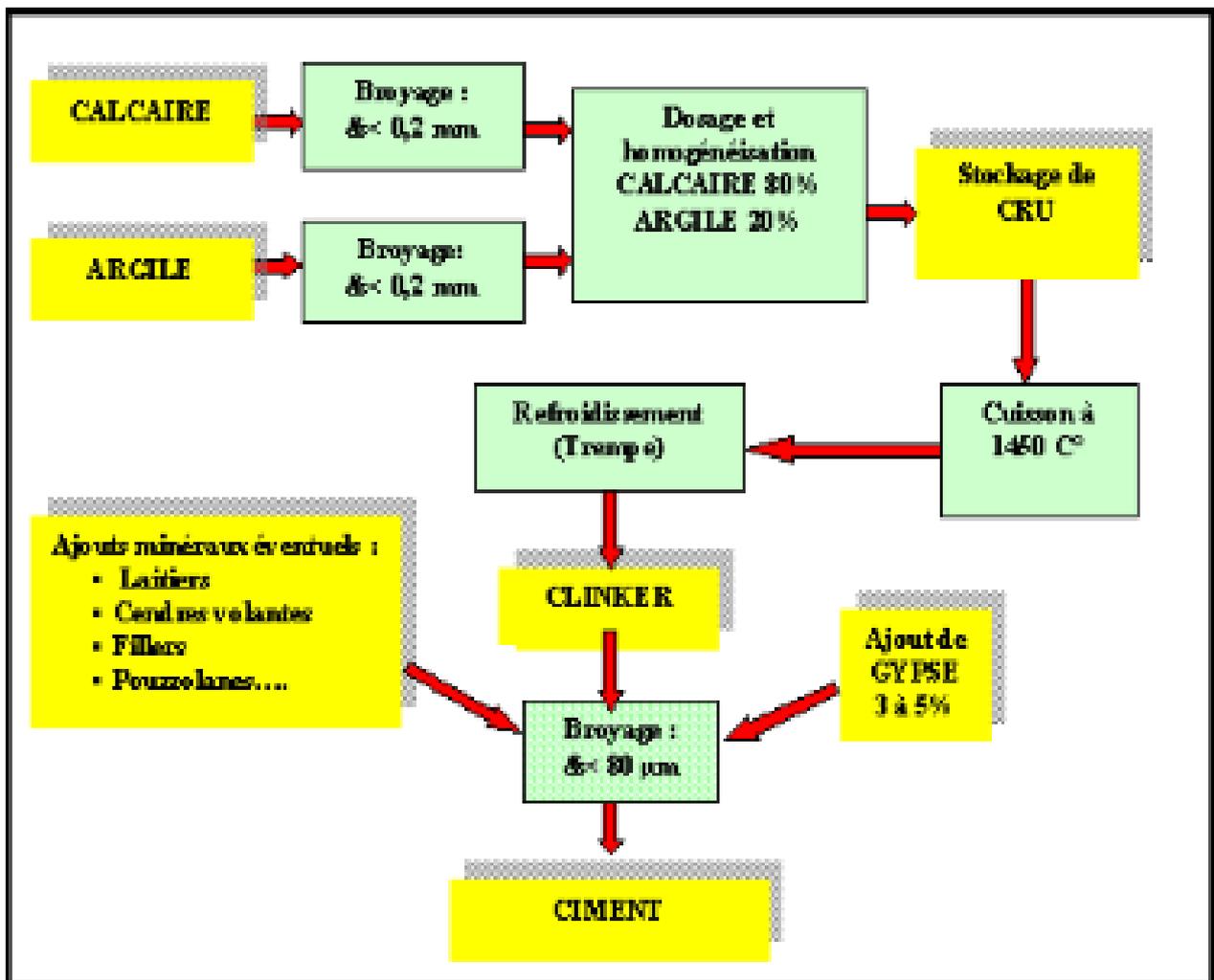


Figure 2: Etapes de fabrication du ciment.

A- Extraction et préparation des matières premières:

Les matières premières sont extraites de carrières. Dans la plupart des cas, l'usine est implantée près de la carrière essentielle de calcaire plus au moins marneux, vu l'importance de ce dernier dans la production du ciment.

L'ensemble des matières premières après leurs concassages, sont stockées dans des réserves. Pour la préparation de cru, les matières premières repris de stock, dosées et éventuellement pré homogénéisées, sont envoyées dans des broyeurs qui les réduisent en poudre à grains. Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec), ou en présence d'eau (procédé humide) qui est pratiquement abandonné pour sa forte consommation d'énergie lors de la cuisson.

B – cuisson

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four,. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450 C° ; en s'approchant de cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le « clinker ». Les réactions chimiques de transformation de cru dans le four, sont comme suit :

- jusqu'à 100°C : évaporation de l'eau libre.
- $T > 100^{\circ}\text{C}$: Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- $T > 600^{\circ}\text{C}$: Décomposition des matières argileuses. (Silice SiO_2 , Alumine Al_2O_3 , Ferrite Fe_2O_3).
- $T > 850^{\circ}\text{C}$: Décarbonatation du calcaire. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- $T > 900^{\circ}\text{C}$: Commencement des processus d'interaction et de combinaisons chimiques entre la chaux (CaO) et les oxydes d'argile (Silice SiO_2 , Alumine Al_2O_3 , Ferrite Fe_2O_3).
- $T = 1450^{\circ}\text{C}$: Clinkérisation.

CHAPITRE1

A sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

C- Broyage :

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

Le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns (comme l'indique la figure 2-A).

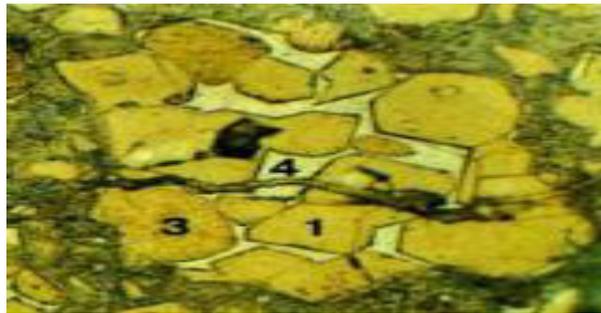


Figure 2-A : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO_3)



Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant. **[18]**

7- Le pourcentage de clinker dans quelques types des ciments:

Ciment Portland : CEM I – Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

Ciment Portland composé : CEM II/A ou B – Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

Ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B – Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.

Ciment de haut fourneau : CEM III/C (ex. ciment de laitier au clinker) – Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

Ciment au laitier et aux cendres CEM V/A ou B – Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier[20]

8- L'hydratation :

A) Hydratation du ciment :

Les quatre composés principaux du clinker sont : le silicate tricalcique noté C_3S , le silicate bicalcique ou C_2S , l'aluminate tricalcique C_3A et l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF . En présence d'eau, ces composés vont réagir et former les principaux hydrates de la pâte de ciment, à savoir : le silicate de calcium hydraté ou C-S-H, la portlandite $Ca(OH)_2$, le trisulfoaluminate de calcium appelé aussi ettringite (noté AFt) et le monosulfoaluminate (noté AF_m). Les réactions chimiques d'hydratation du ciment se font essentiellement à partir des quatre phases minérales du clinker C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF .

B) Hydratation du C_3A :

Le C_3A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C_4AH_{13} , C_2AH_8) qui se transforment en un aluminate de calcium hydraté C_3AH_6 .

CHAPITRE1

L'aluminate tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. En l'absence de gypse, l'hydratation du C3A est extrêmement rapide, . Il s'en suit un phénomène de prise très rapide, empêchant la mise en oeuvre du matériau. Pour remédier à cela, les cimentiers incorporent systématiquement du gypse dans la composition de leur ciment. Ainsi, la réaction des aluminates avec le sulfate contenu dans le gypse, forme de l'ettringite (AFt) qui précipite en masse autour du grain de C3A et inhibe sa dissolution. Celle-ci, une fois le gypse totalement consommé, se décompose pour former du monosulfoaluminate (AFm). La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de C3A par rapport au gypse. **[18]**

9- Les formes cristallines du sulfate dans le clinker :

Plusieurs études ont pu mettre en évidence la présence de plusieurs formes cristallines du sulfate dans le clinker. Dans la littérature, on retrouve des controverses à ce sujet, mais la plupart des recherches menées depuis 1951, montrent que le sulfate se trouve sous la forme de sulfate d'alcalis et dans les cristaux de clinker surtout dans les belites (NEWKIRK, 1951). La forme, la solubilité et le pourcentage du soufre dans le clinker ont une très grande influence sur la réactivité des phases du clinker (MEHTA et MONTEIRO, 2001) et peuvent influencer le mécanisme des réactions du superplastifiant dans le béton.

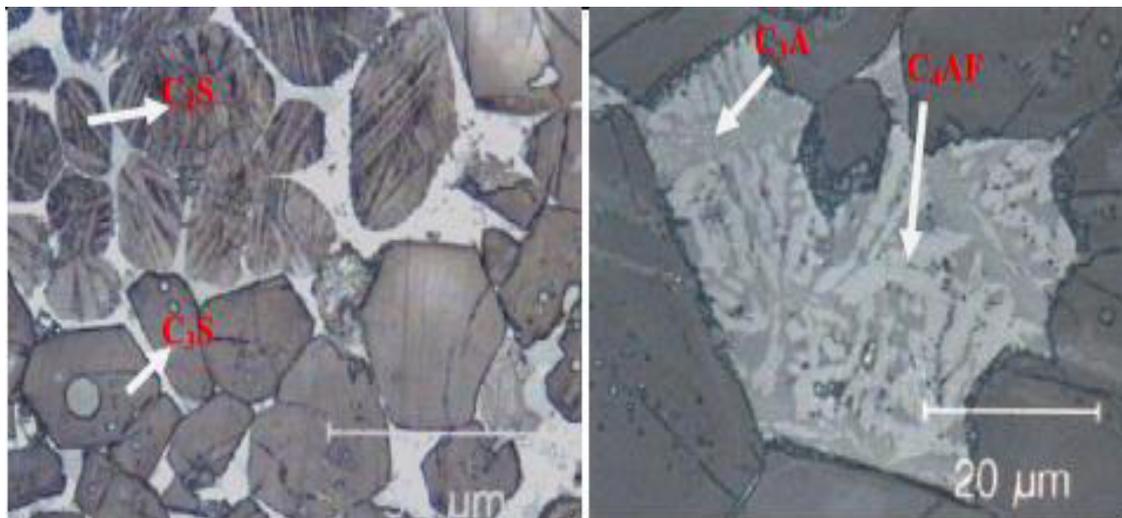


Figure-3 : Image de clinker par microscope optique

La présence de sulfate de potassium, dans le clinker, réduit la réactivité de C₃A (LOCHER et al, 1982). La solubilité du sulfate dépend non seulement du pourcentage total de SO₃ dans le clinker mais aussi de la quantité d'alcalis (JØNS, 1996). **[20]**

10- Sulfate de calcium ou anhydrite :

L'utilisation d'un carburant contenant 2 à 6 % de soufre augmente le pourcentage du SO_3 dans le clinker jusqu'à 3,28 %, surtout sous forme CaSO_4 (figure 4) (BARKAKATI et al, 1993).

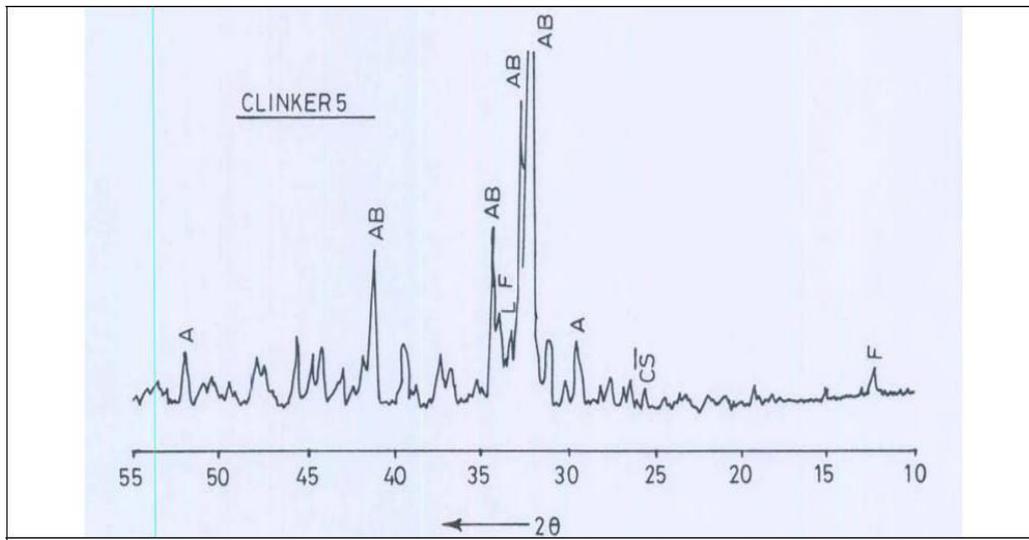


Figure-4 : CaSO_4 dans le clinker (CS) (BARKAKATI et al, 1993)

Lorsque le pourcentage d'alcalis est très bas et le pourcentage de SO_3 est élevé, des cristaux très petits ($5\mu\text{m}$) de sulfate de calcium CaSO_4 peuvent être détectés (FLAMENT, 1992).

11– Concentration maximale et rôle du soufre dans le Ciment :

L'hydratation du ciment correspond à une suite de réactions chimiques entre les différents composants du clinker, le gypse et l'eau. L'ordre de réactivité des composants du ciment est $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ (GHOSH, 1992).

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, la quantité de gypse ajouté au clinker est 3-5 % (comme indiqué dans la fabrication du ciment) .

La quantité de C_3A présente dans la plupart des ciments est relativement faible, mais son comportement structural et sa relation avec les autres phases du ciment jouent un rôle important dans la rhéologie du ciment.

La teneur en SO_3 est limitée pour tous les ciments, les valeurs limites diffèrent selon les types et les spécifications complémentaires (ciment prise mer, ciment résistant au sulfate). Un excès de sulfate peut provoquer des gonflements par réactions tardives avec l'aluminate tricalcique (BARON et OLLIVIER, 1997) ce qui augmente la vitesse de dégradation et la détérioration du béton (ZAYED, 2004). Un essai de détermination de la teneur optimale en SO_3 dans le ciment est spécifié par la norme ASTM C563. Cette teneur est limitée par la norme ASTM C150 à 3 % et pour la norme européenne EN 197 à 3,5 %.

Les compositions chimiques et physiques des sulfates dans le ciment peuvent avoir une forte influence sur les réactions d'hydratation au jeune âge des aluminates (TANG, 1992) à titre d'exemple les sulfates d'alcalis, présents dans le clinker, affectent l'hydratation et la prise du ciment en changeant la concentration des groupes ioniques dans la phase liquide (MANDER et SKALNY, 1977). **[20]**

12- Les constituants du béton :

A)- *Les additions :*

Les additions pour béton sont définies dans la norme EN 206-1 :

Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières.

Il existe deux types d'additions :

- Les additions quasiment inertes (type I);
- Les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II).

Chaque NORME ADDITION définit leurs caractéristiques physiques et chimiques.

- Les caractéristiques physico-chimiques :

Composant	Classe	
	A	B
SiO ₂	> 85	70 à 85
CaO	< 1,2	20
Humidité par étuve à 105°C	< 1	
SO₃ Sulfate	< 2,5	
Na ₂ OK ₂ O	< 4	
Cl ⁻ Chlorures	< 0,2	
Carbone libre	< 4	

Tableau 4 -les normes des additions caractéristiques physico-chimique[7]

Le taux de sulfates dans les additions de ciment **ne dépasse pas 2,5 %**

B)- L'eau de gâchage :

Ex : L'utilisation d'eau de mer ou d'eau sulfatée pour gâcher le béton

L'eau de mer contient des sulfates en solution. On peut aussi les retrouver en solution dans les eaux souterraines, dans les eaux usées industrielles et dans certains sous-produits industriels.

- Dans les eaux souterraines, les concentrations plus élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfates de magnésium (MgSO₄) ou de sulfates alcalins (K₂SO₄ – Na₂SO₄).

- Les sulfates d'ammonium (NH₄)₂SO₄ se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux en milieux agraires.

CHAPITRE1

Pour convenir à la confection de béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment (Ex :les sulfates), les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles

Des analyses chimiques portant sur les teneurs en différents constituants dont le pourcentage dans l'eau doit satisfaire aux prescriptions suivantes :

Constituant	Limites en % de l'eau (en masse)		
	Béton précontraint	Béton armé	Béton non armé
Insoluble	< 0,2	< 0,2	< 0,5
Matières dissoutes	< 0,2	< 0,5	< 1,0
Carbonates + bicarbonates alcalins	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfates en SO_3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfites en S	< 0,01	-	-
Sucres	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Phosphates en P_2O_5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nitrates en NO_3	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zinc	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Sodium (Na+) et Potassium (K+) ⁹	< 0,1	< 0,1	
Acidité en pH	> 4	> 4	> 4
Acidité humiques		pas de coloration	

* Cette caractéristique est impérative dans le cas d'utilisation de granulats potentiellement réactifs.

Tableau 5- les teneurs en différents constituants d'eau de gâchage[11]

Les sulfates peuvent réagir sur le ciment pour former de l'ettringite qui s'accompagne de gonflement et peut provoquer une dislocation du béton. En faible proportion ils ont une action sur le temps de prise et de durcissement du ciment pouvant s'ajouter à l'effet du $SO_4 Ca$ du ciment :

Les ions soufre provoquent la corrosion des armatures et sont plus particulièrement à craindre dans le cas des bétons précontraints pour lesquels la teneur maximale est fixée suivant les cas à 0,2 ou 0,5 % (cette dernière valeur étant pontée à 0,7 %)

- Le rôle d'eau de gâchage et le rapport E/C :

Le rôle de l'eau est d'abord d'hydrater le ciment pour donner un matériau cohésif. Elle sert aussi de lubrifiant lors de gâchage des constituants. Ainsi ajuste-t-on sa quantité afin d'obtenir une pâte homogène et facilement « ouvrable ». De par ce rôle de lubrifiant, l'eau se trouve généralement en excès vis-à-vis de la réaction d'hydratation : On utilise couramment des quantités d'eau de l'ordre de 0.5 en rapport massique (E/C), alors que l'hydratation complète ne nécessiterait qu'un E/C d'environ 0.35 . Ce rapport prend en compte : les proportions stoechiométriques des réactions d'hydratations, qui indiquent que la proportion massique d'eau liées aux hydrates correspond environ à 20% de la masse initial de ciment, et la quantité d'eau nécessaire pour remplir l'espace interfeuillet des hydrates, soit environ 15% d'eau libre, sans laquelle la réaction d'hydratation est incomplète.

Au cours du durcissement et à des degrés divers suivant les conditions environnementales, l'espace occupé par cette eau non consommée fait place à de la porosité qui pénalise la résistance mécanique. Pour améliorer cette dernière, il est donc nécessaire de réduire la quantité d'eau introduite initialement dans la gâchée. C'est en suivant cette idée qu'ont été développés les bétons à « hautes performances ». Mais il reste à assurer une ouvrabilité suffisante, Pour cela, on fait recours à des adjuvants.

C)-Les granulats :

Ex : L'utilisation de granulats contenant des sulfates et, notamment des calcaire contenant des pyrites framboïdales mal cristallisées

Les granulats comme la grande majorité des matériaux de construction doivent être conformes à des normes. Les granulats constituent le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne donc celles du béton. La nature des liaisons qui se créent à l'interface granulats / pâte de ciment favorise les résistances mécaniques et les performances du béton. **[12]**

Les granulats pour bétons dont l'objet de deux principales normes de références :

- Granulats pour béton :

-*Caractéristiques chimiques* :

- teneur en chlorures

-*Composés contenant du soufre* :

- Sulfates solubles dans l'acide
- Soufre total

- *Autres constituants* :

- Constituants réduisant le temps de prise et la résistance du béton

D)- Le Sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les bétons et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, et surtout de sulfates...et dans le cas de sable concassé: des poussières, des plaquettes, des aiguilles.

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique

- La plupart des sols contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4). Ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton.

13- La perméabilité du béton :

La perméabilité du béton influence la durabilité des structures indirectement en gouvernant la vitesse de pénétration d'agents agressifs, une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.

La perméabilité définit la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Bien que la perméabilité d'un milieu poreux dépend fortement de sa porosité, d'autres paramètres du réseau poreux l'influencent également. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : la connectivité, la tortuosité, ainsi que la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores. L'effet de ces paramètres vis-à-vis de la résistance au flux est montré sur la Figure 5 (d'après Scrivener, 2001)

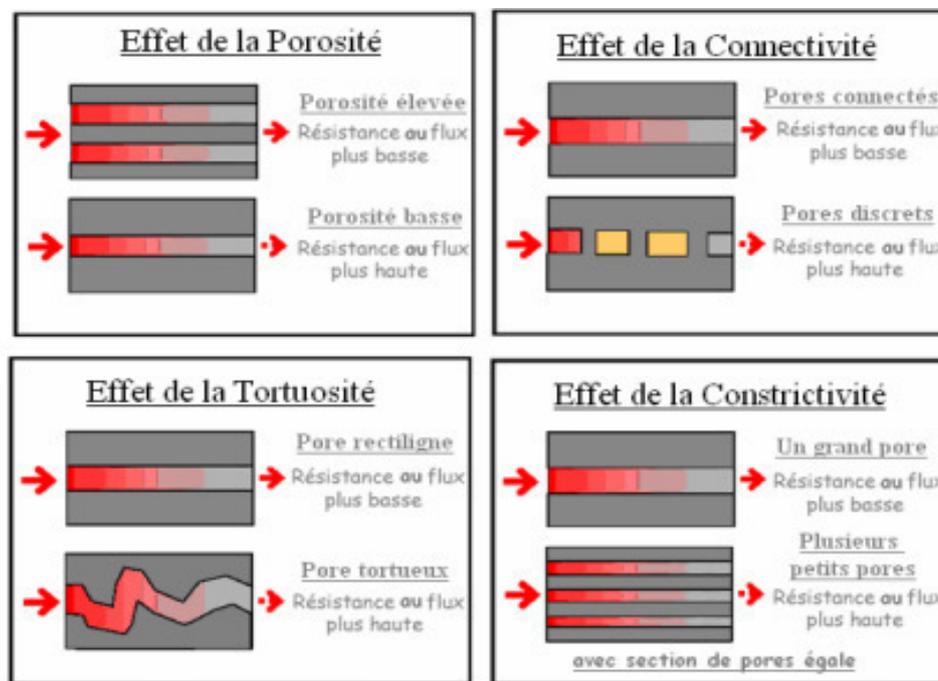


Figure 5 : Effet des paramètres influençant la perméabilité (d'après Scrivener, 2001). [6]

La perméabilité du béton dépend de ses constituants (type, quantité) et est donc fonction : - du rapport Eau / Ciment (Hearn et al., 1996), directement lié à la porosité. Toutefois, on ne connaît pas exactement l'influence des additifs dans la pâte de ciment (fumées de silice, laitiers ou cendres volantes) sur la perméabilité. - de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent respectivement créer l'auréole de transition et modifier la tortuosité. En effet, la résistance en compression est fonction de la porosité totale du matériau, tandis que la perméabilité dépend pour l'essentiel de la porosité connectée.

14- Quels sont les ciments à haute résistance aux sulfates ?

Lors de la réaction d'hydratation (la réaction du ciment en présence d'eau), certains constituants du ciment (les oxydes de calcium et les aluminates, par exemple) forment des produits pouvant réagir avec les sulfates et provoquer une réaction expansive. En limitant ou en évitant complètement ces constituants dans le ciment, on obtient une plus grande résistance aux sulfates du béton réalisé avec ce ciment. On retrouve cette propriété dans :

- les ciments Portland naturellement pauvres en aluminates C_3A
- les ciments de haut fourneau à forte teneur en laitier
- les ciments composés dont la teneur en chaux (CaO), source d'ion calcium, est faible.

Types de ciment à (haute) résistance aux sulfates en fonction des différentes normes			
Type de ciment	Norme belge NBN B 12-108:2006	Norme européenne NBN EN 197-1:2011	Norme belge NBN B 12-108:2015
Ciment Portland	CEM I HSR $\leq 3,0 \% C_3A$	CEM I-SR 0 = 0 % C_3A CEM I-SR 3 $\leq 3 \% C_3A$ CEM I-SR 5 $\leq 5 \% C_3A$	CEM I-SR 0 = 0 % C_3A CEM I-SR 3 $\leq 3 \% C_3A$
Ciment de haut fourneau	CEM III/B HSR CEM III/C HSR	CEM III/B-SR CEM III/C-SR	CEM III/B-SR CEM III/C-SR
Ciment pouzzolanique	/	CEM IV/A-SR $\leq 9 \% C_3A$ CEM IV/B-SR $\leq 9 \% C_3A$	/
Ciment composé	CEM V/A (S-V) HSR	/	CEM V/A (S-V) HSR (*)
Ciment sursulfaté	SSC HSR	/	SSC HSR

(*) Le ciment de type CEM V/A (S-V) HSR est considéré comme 'Ciment à Haute Résistance aux Sulfates selon la NBN B 12-108' s'il répond aux exigences complémentaires spécifiques de la norme belge. Ainsi, il ne peut contenir qu'au maximum 50,0 % de chaux (CaO).

Tableau 6 - les ciments à haute résistance aux sulfates [5]

D'un point de vue normatif, ces considérations scientifiques ont été traduites par des exigences imposées aux ciments. Le tableau ci-dessus répertorie les types de ciment à (haute) résistance aux sulfates selon les différentes normes



Figure 6-A: ciment portland résistant aux sulfates (CPA CEM 42,5 CSR)



Figure 6-B: ciment portland composé (CPJ CEM II/A 42,5)

15- Le choix de type du ciment on fonction environnement :

Pour certaines classes d'expositions ou certains ouvrages particuliers, des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises. [7]

Les ciments possédant ces caractéristiques font l'objet de normes spécifiques :

• Ciment pour travaux a la mer	NF P 15-317
• Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint	NF P 15-318
• Ciment pour travaux en eaux a haut teneur en sulfates	XP P 15-319

A)- Ciment pour travaux a la mer :

- Définition :

Les ciments pour travaux à la mer ont une composition minéralogique qui leur permet de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique C3A

- Ces ciments sont :

Des CEM I, CEM II/A, CEM III/A, B ou C, CEM V/A et B, conformes à la norme NF EN 197-1;

Des ciments prompts naturels (CNP), conformes à la norme NF P 15-314; Des ciments alumineux fondus (CA), conformes à la norme NF P 15-315.

Cette norme définit des prescriptions de composition et de caractéristiques physiques et chimiques complémentaires à la norme NF EN 197-1.

B)- Ciments à teneur en sulfures limitée :

- Définition :

Les ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint sont : des CEM I, CEM II/A et B, CEM III/A et B, CEM IV/A et B, CEM V/A et B, conformes à la norme NF EN 197-1 qui présentent, en outre, une teneur en ions sulfure limitée.

- *Teneur en ions sulfures :*

- *2 classes de ciments*

- Classe CP 1 : ions sulfures $S^{2-} < 0,7 \%$
- Classe CP 2 : ions sulfures $S^{2-} < 0,2 \%$

- *désignation :*

- CP1 ou CP2 selon la teneur en ions sulfures

- *Recommandations d'utilisation :*

- CP 1 : Précontrainte par post-tension
- CP 2 : Précontrainte par pré-tension

C)- Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates :

Cette norme définit les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates. Elle spécifie les types de ciment pouvant être ainsi désignés et prescrit des limites de composition ainsi que des spécifications physiques et chimiques complémentaires de la norme NF EN 1971.

- *Définition :*

Les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ont une composition minéralogique qui leur permet de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique C3A

- *Note :*

Selon le fascicule de documentation P 18-011, sont considérées comme eaux à haute teneur en sulfates, les solutions présentant une concentration en ions $SO_4^{2-} \square 1500 \text{ mg/l}$.

- *Ces ciments sont :*

Des CEM I, CEM II/A et B, CEM III/A et B, CEM III/C, CEM V/A et B, conformes à la norme NF EN 197-1

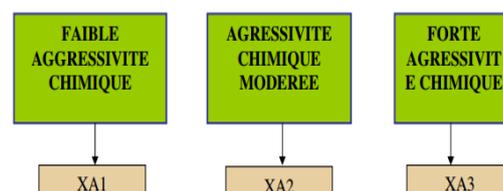
Des ciments alumineux fondus (CA), conformes à la norme NF P 15-315

16- Le choix du ciment en fonction de l'agressivité:

Ainsi, comme il a été écrit précédemment, le choix du ciment en ambiance chimique agressive vise à éviter à la fois la dissolution des phases solubles (la présence de pouzzolanes permet de remplacer la portlandite, de forte solubilité, par des silicates et aluminates de calcium hydratés, moins solubles) et la formation de phases pathologiques (limitation de la teneur en C3A du clinker pour éviter la formation ultérieure d'ettringite en présence de sulfates).

Les milieux chimiquement agressifs, correspondent aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et les eaux souterraines. Ils sont définis dans trois classes d'exposition en fonction de valeurs limites :

- XA1 : environnement à faible agressivité chimique ;
- XA2 : environnement d'agressivité chimique moyenne
- XA3 : environnement à forte agressivité chimique.



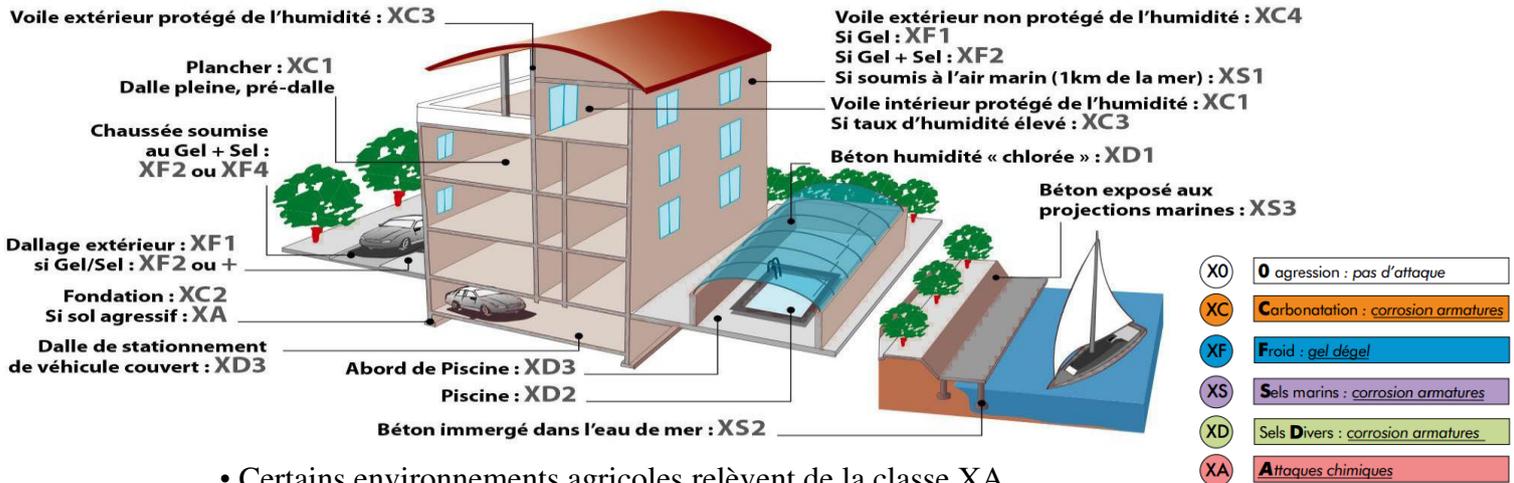
Les valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines sont données dans le tableau 7.A. Le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique conduisant à l'agression la plus élevée. Lorsqu'au moins deux caractéristiques agressives conduisent à la même classe, l'environnement retenu doit être normalement celui correspondant à la classe immédiatement supérieure.

Caractéristique chimique	XA1	XA2	XA3
Eaux de surface et souterraines			
SO ₄ ²⁻ en mg/L	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3000	> 3 000 et ≤ 6 000
pH	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
CO ₂ agressif en mg/L	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100
NH ₄ ⁺ en mg/L	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ²⁺ en mg/L	≥ 300 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000
Sols			
SO ₄ ²⁻ en mg/kg	≥ 2000 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 12000	> 12000 et ≤ 24000
Acidité en ml/kg	> 200 Baumann Gully	N'est pas rencontré dans la pratique	

Tableau 7.A: Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines selon la norme NF EN 206-1, [16]

CHAPITRE1

Le prescripteur définit la classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement.



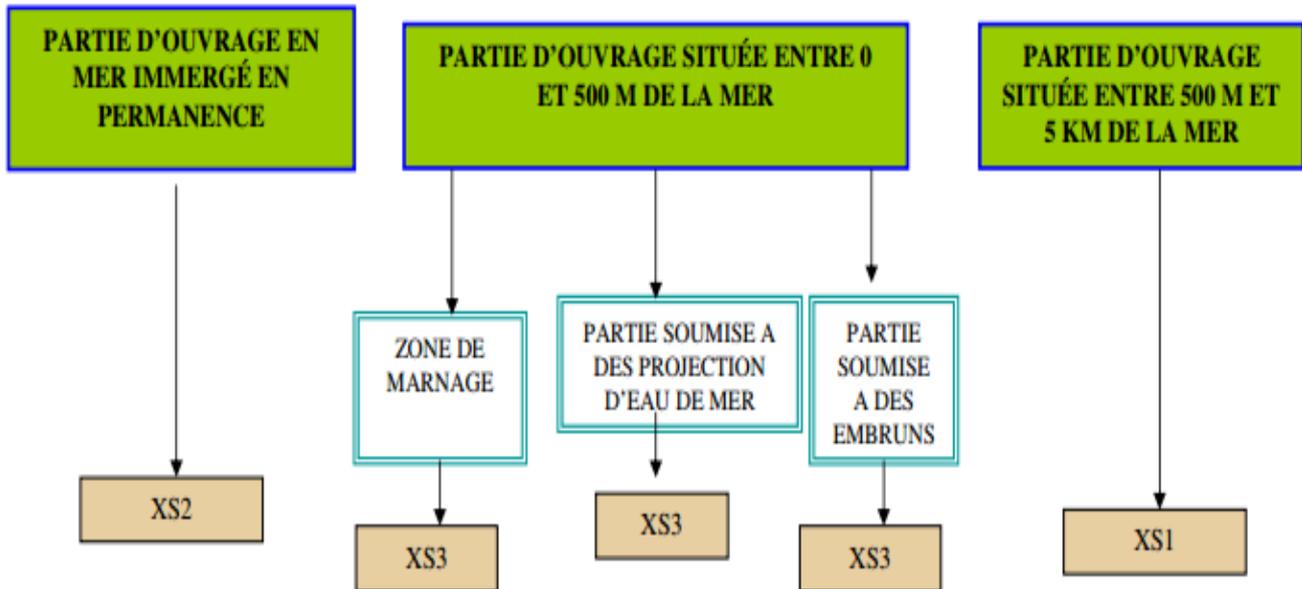
- Certains environnements agricoles relèvent de la classe XA.
- Si les milieux industriels sont classés dans les classes d'exposition XA, il est cependant nécessaire que le maître d'ouvrage, le maître d'oeuvre ou l'entreprise fasse une étude pour déterminer le niveau réel d'agressivité de l'environnement.

Les recommandations particulières concernant le choix du ciment sont données dans le tableau 7.B.

Milieu contenant des sulfates (solutions) à l'exclusion de l'eau de mer	XA1		pas de recommandations particulières
	XA2	(au-dessous de 1500 mg/l)	XA2 ciments conformes à la norme NF P15-317 (PM) ou NF P15-319 (ES)
	XA3	(au-dessus de 1500 mg/l)	ciments conformes à la norme NF P15-319 (ES)
Milieu contenant des sulfates (sols)	XA1		pas de recommandations particulières
	XA2		ciments conformes à la norme NF P15-317 (PM) ou NF P15-319 (ES)
	XA3		ciments conformes à la norme NF P15-319 (ES)
Milieux acides	XA1		CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A conformes à la norme NF EN 197-1, CEM III/A conforme à la norme NF EN 197-4, ciments conformes à la norme NF P15-317 (PM) ou NF P15-319 (ES), et CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
	XA2		CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-P, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A conformes à la norme NF EN 197-1, CEM III/A conforme à la norme NF EN 197-4 ciments conformes à la norme NF P15-319 (ES) et CEM IV/A et B conformes à la norme NF EN 197-1
	XA3		CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P15-319, ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647, CEM IV/B conformes à la norme NF EN 197-1
Eaux pures	XA1		CEM III/A, B et C, CEM V/A et B conformes à la norme NF P15-319
	XA2		ciments d'aluminates de calcium conformes à la norme NF EN 14647
	XA3		CEM IV/B conformes à la norme NF EN 197-1

Tableau 7.B : recommandations pour le choix des ciments, d'après le tableau 7.A [16]

17- La composition et les propriétés du béton selon l'environnement l'attaque chimique « XA » et l'eau de mer « XS » :



- Sévérité croissante de XS1 à XS3 :

-Critères : concomitance des chlorures et de l'eau, et cycles d'immersion / séchage favorisant la pénétration des ions.

-Critères associés à la distance à la côte, à la permanence ou non de l'immersion, à l'exposition aux embruns et à l'air véhiculant du sel marin, avec une latitude interprétative par rapport au seul critère de distance.⁹

- Les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton :

- Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis pendant sa durée d'utilisation à PLUSIEURS ACTIONS ENVIRONNEMENTALES.

- Il convient donc, pour chaque partie d'ouvrage de déterminer la COMBINAISON des CLASSES D'EXPOSITION pour prendre en compte avec précision l'ensemble des actions environnementales auxquelles est soumis le béton.

- Le béton doit respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition et donc la SELECTION DES PLUS SEVERES EXIGENCES ET SPECIFICATIONS.

CHAPITRE1

Les valeurs limites applicables sur le béton :

	Eau de mer			Environnement chimiquement agressifs		
	XS1	XS2	XS3	XA1	XA2	XA3
Rapport Eeff/liant éq maximal	Valeurs numériques à XS2	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale		C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur mini en liant éq(kg /m ³)		330	350	330	350	385
Teneur minimal en air (%)		-	-	-	-	-
Cendre volantes (*)		0,15	0,15	0,30	0,30	0,00
Fumées de silice (*)		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Laitier moulu (*)		0,15	0,15	0,30	0,30	0,00
Addition calcaire (*)		0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Addition siliceuse (*)		0,15	0,15	0,00	0,00	0,00
Nature du ciment		PM	PM	-	-	-

(*) Rapport maximal A/A+C

Tableau 8- les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton[2]

18- Les exigences relatives au béton exposé aux attaques des sulfates :

- La **sévérité de l'attaque** est fonction de la **concentration en sulfates**
- La norme **CSA A23.1 section 15, Tableau 9** présente quelques exigences de formulation en fonction du degré d'exposition aux sulfates.

Classe d'exposition	Degré d'exposition	Sulfates hydrosolubles (SO ₄) dans l'échantillon de sol %	Sulfates (SO ₄) dans les échantillons d'eau de la nappe phréatique mg/l	Résistance minimale spécifiée à la compression à 28 jours MPa	Rapport maximal eau / liant	Type de ciment portland à utiliser
S-1	Très intense	Plus de 2	Plus de 1000	35	0,40	50
S-2	Intense	0,2 à 2	1500 à 10000	32	0,45	50
S-3	Modérée	0 .1 à 0.2	150 à 1500	30	0.50	20 ; 40 ou 50

Conclusion :

Le ciment est le matériau de base pour la construction d'ouvrages de bâtiment, ponts, et des barrages même pour les différents arts (sculpture).

Le ciment est un liant hydraulique très répandu. En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du ciment et son dosage jouent un rôle primordial sur le comportement des matériaux cimentaires vis-à-vis des milieux chimiquement agressifs.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe de fabrication et l'hydratation du ciment sont utiles. Cela nous permet de mieux comprendre l'interaction entre le type de ciment utilisé et l'environnement auquel sera exposé.

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment pour ce qui concerne les problèmes d'environnement critiques.

CHAPITRE 2

Introduction :

En Algérie, les sulfates sont très répandus dans les sous-sols et les eaux souterraines. La localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain est présentée sur la figure 6.

Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse, on peut rencontrer des concentrations élevées (>5%).

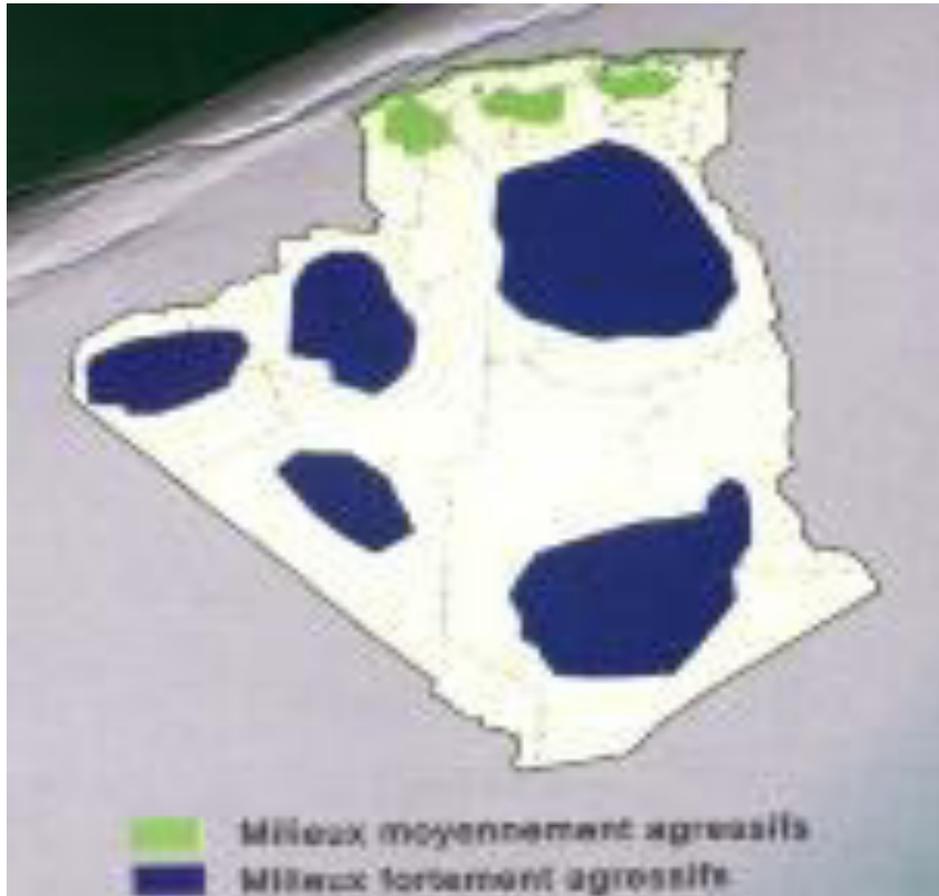


Figure 7 : Localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain. **[18]**

Dès les années 1950, les premières réglementations, un peu par tout dans le monde, en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique, recommandaient l'utilisation de ciment à faible rapport E/C, à taux de C_3A limité et à ajouts pouzzolaniques accrus. Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates réactifs et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne.

1- Définition de l'attaque sulfatique :

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

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

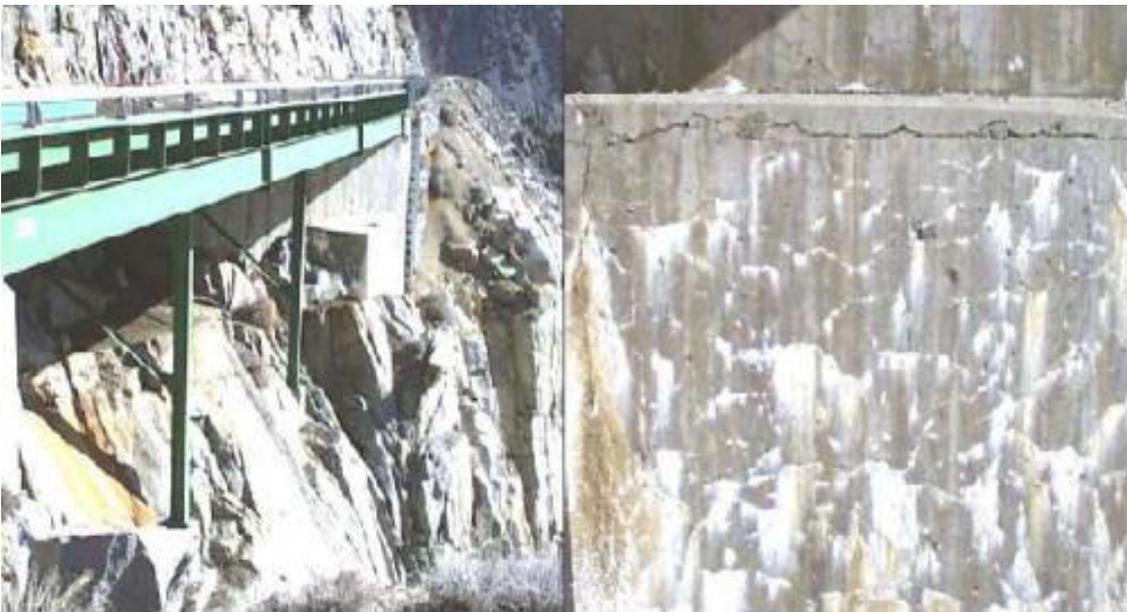


Figure 8 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [18]

2- Sources des sulfates :

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. (Figure 8)

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque

CHAPITRE 2

par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

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

Comme le montre La figure 8, l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

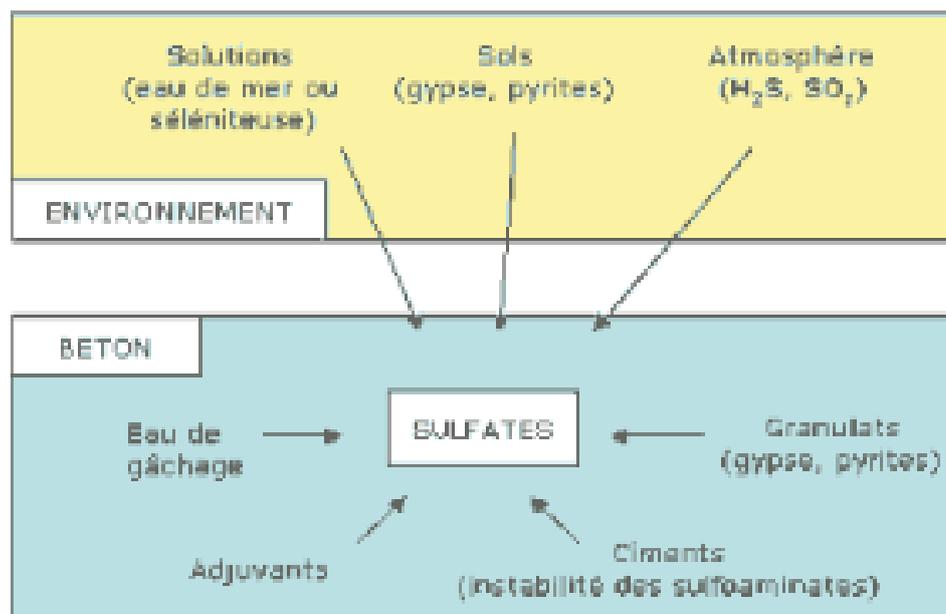


Figure 9 : L'origine des sulfates (interne ou externe). [18]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines: Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle.

· Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, hémihydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$, langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.

CHAPITRE 2

· Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).

· Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2):

- Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes, leur concentration moyenne est comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec.

Des concentrations beaucoup plus importantes ($> 5\%$) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite CaSO_4 . La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$, provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

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

- Dans les environnements industriels et urbains (Figure 9), l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.

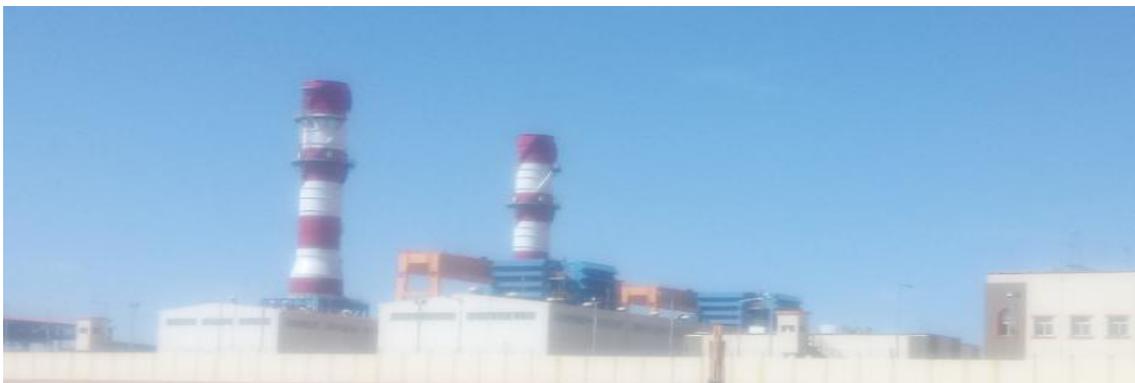


Figure 10 : Origine de la pollution de l'atmosphère, exemple la centrale à cycle combiné de production d'électricité (chegga-Biskra)

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

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

3- Mécanisme d'attaque du béton par les sulfates :

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans une période courte (10-15 ans) (GAGNE, 2004). Une enquête de l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) réalisée en 1989 indique que l'attaque par les sulfates est la deuxième cause des dégradations relevées sur 800000 ponts de par le monde, après la corrosion des aciers (DIVET, 2002). La dégradation des bétons par les sulfates est principalement due à la formation d'ettringite (CARDE, 2007).

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques : l'expansion et la perte des propriétés liantes des silicates de calcium hydratés C-S- H (GAGNE, 2004).

Les mécanismes de destruction sont en fonction de la concentration et de la source des ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment (GAGNE, 2004). Trois types de comportements vis à vis du gonflement sont dissociés : les gonflements négligeables (l'expansion ne dépasse pas 0.04%), les gonflements faibles (l'expansion est comprise entre 0.04% et 0.2%) et les gonflements importants, qui se traduisent par des expansions sigmoïdes, et dont l'amplitude finale dépasse généralement 0.4%. Ce comportement provoque une chute du module dynamique du matériau (BRUNETAUD, 2005).

Le processus théorique de l'attaque sulfatique est très simple. Durant l'hydratation, le C_3A se transforme en monosulfoaluminate qui est très réactif. Au moment de l'ajout d'une quantité de sulfate de source extérieure ou intérieure, le monosulfoaluminate se transforme en ettringite secondaire ou différée, entraînant une augmentation du volume du béton (JOHANSEN et al, 2002). A la fin de cette transformation, les molécules de monosulfoaluminate augmentent de 55% à 129 % en volume (CLIFTON et PONNERSHEIM, 1994).

CHAPITRE 2

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs (figure 10) ce qui conduit à augmenter la perméabilité (fissures) et à diminuer la résistance du béton (GAGNE, 2004). Le gonflement n'a lieu que lorsque les bétons sont immergés dans l'eau (PAVOINE, 2003).

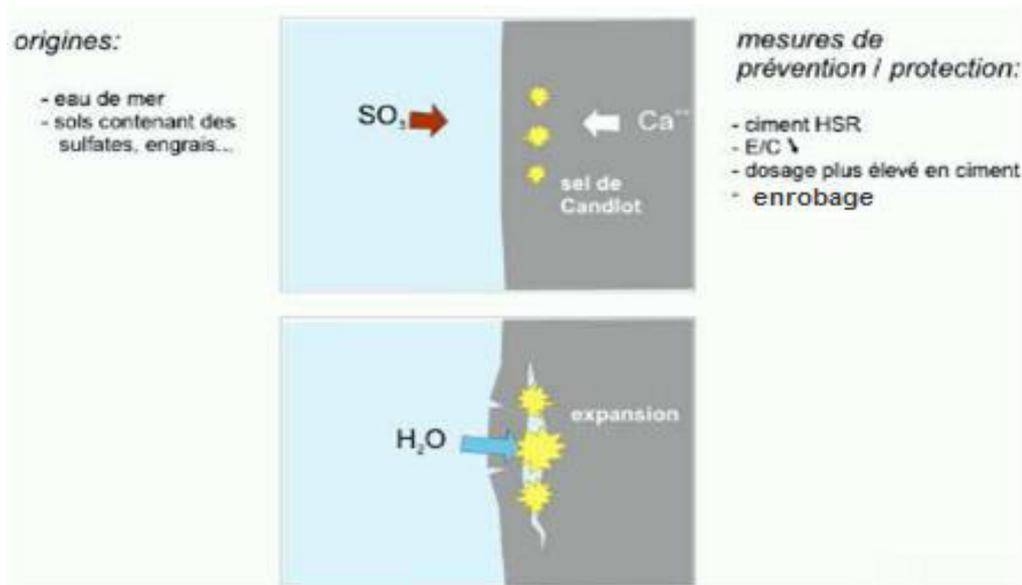


Figure 11 : Etapes d'attaque du Béton par les sulfates [20]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion ;
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

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

4- A) Processus d'attaque par les sulfates internes :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

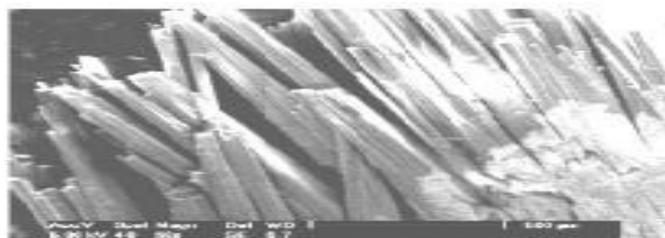


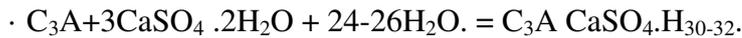
Figure 12 : La formation de l'ettringite secondaire. [18]

CHAPITRE 2

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

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

- Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :



- Soit à partir de l'aluminate tetracalcique hydraté C_3AH_{13} ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$.

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

B) Processus d'attaque par les sulfates externes :

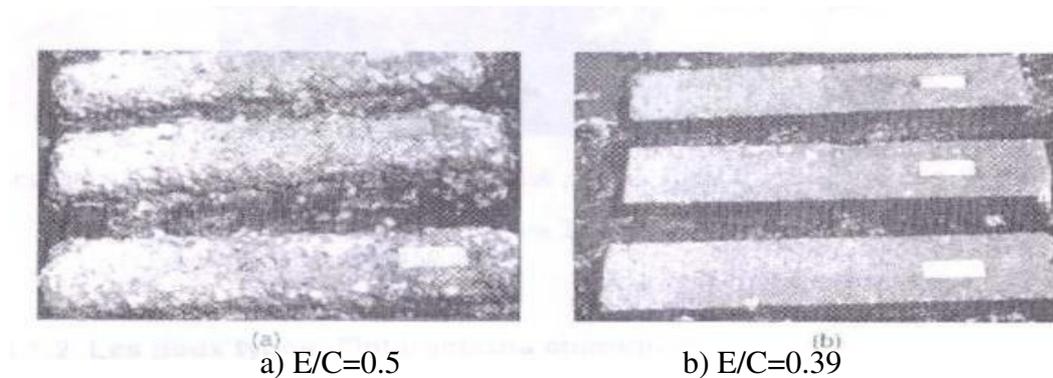


Figure 13 : Epreuve de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates.

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation.

CHAPITRE 2

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

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

Exemples de l'attaque par les sulfates :

-Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4) :

A- Formation de gypse secondaire :



NaOH : alcalinité élevée ? Stabilisation des C-S-H

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

B-Formation d'ettringite secondaire :

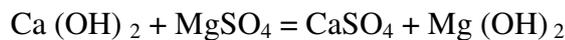
- à partir du C₃A anhydre résiduel



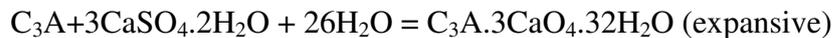
- à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



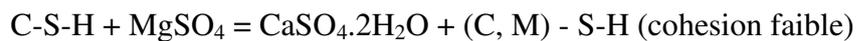
-Le cas de sulfate de magnésium Mg SO₄ (double action) :



Mg(OH)₂ : brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



Substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺ dans les C-S-H :



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

la formation d'ettringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion.

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

5- Différents types d'ettringite :

Aujourd'hui, plusieurs termes sont employés dans la littérature pour bien distinguer les différents modes et échéances de formation de l'ettringite dans le béton. On distingue alors trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Nous retiendrons la dénomination proposée par l'association française de Génie civil, qui résulte des travaux du groupe GranDuBé (Grandeurs associées à la durabilité des bétons) :

- de formation primaire qui ne provoque pas d'expansion ;
- de formation secondaire qui peut provoquer une expansion ;
- de formation différée, consécutive à une élévation de température subie par le béton au jeune âge, qui peut aussi provoquer une expansion. [3]

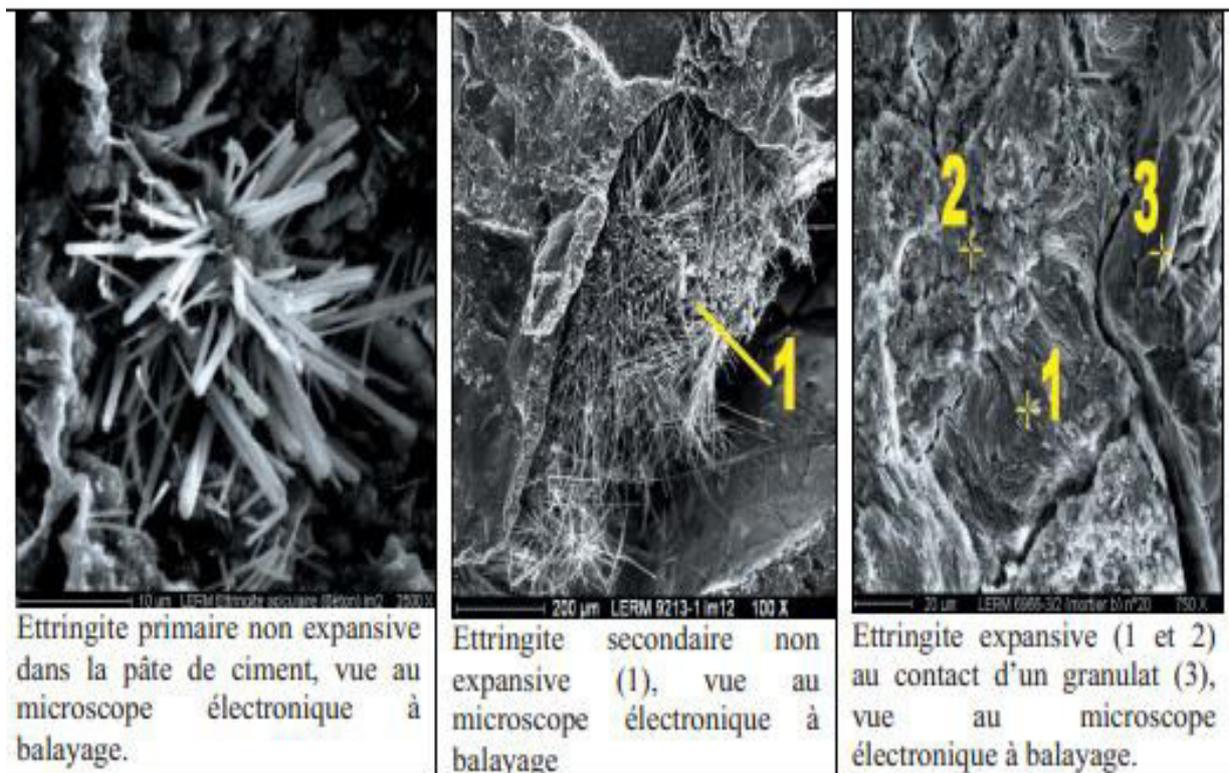


Figure -14 : Ettringite (CARDE, 2007) [20]

A) *Ettringite de formation primaire :*

Cette ettringite correspond à un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) et l'aluminate tricalcique ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A en notation cimentière) du clinker.

L'ettringite se rencontre sous l'aspect de cristaux de forme aciculaire, comme le montre la figure 14.

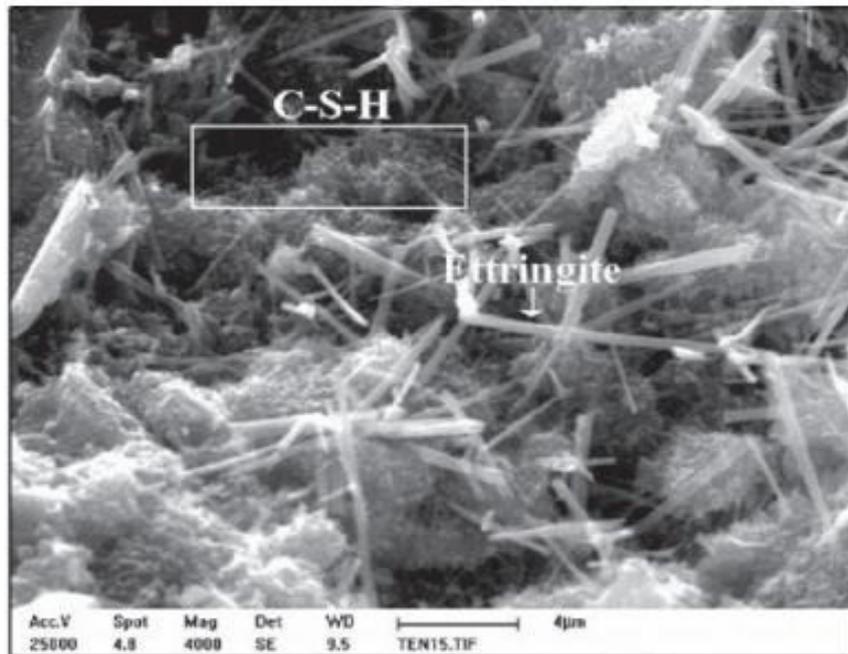


Figure 15 : Aiguilles d'ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment (microscope électronique à balayage)

Ces cristaux ne provoquent pas de gonflement car ils se forment avant le durcissement du béton et dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte du ciment au jeune âge par une diminution de la porosité et une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange. Ce phénomène est notamment prépondérant dans le cas de la prise des ciments sursulfatés et des ciments sulfoalumineux. [3]

B) Ettringite de formation secondaire :

Elle se forme quand le béton a déjà durci et résulte de mouvements d'eau à l'intérieur (phénomènes de dissolution/précipitation), et d'apports en sulfates d'origine externe (par exemple, les sols gypseux, les eaux salées, les remblais de schiste houiller, etc.) ou interne (utilisation de granulats contenant des sulfates et, notamment, des calcaires contenant des pyrites framboïdales mal cristallisées, utilisation d'eau de mer ou d'eau sulfatée pour gâcher le béton, etc.). Dans ce dernier cas, le respect des textes normatifs permet d'éviter cette réaction (chapitre 1)

Pour les phénomènes de dissolution/précipitation, l'ettringite cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton et ne présente généralement pas de caractère expansif. Par contre, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe de sulfates est susceptible de générer des gonflements. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée.

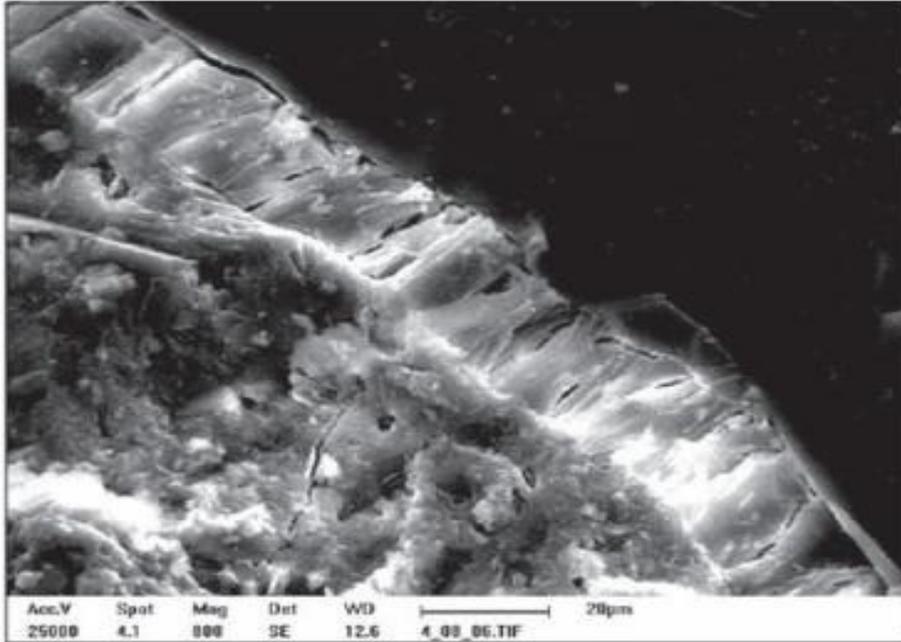
Les déordres liés à ce type d'ettringite concernent les bétons fabriqués avec des ciments non résistants aux sulfates (généralement les ciments riches en C_3A et libérant du $Ca(OH)_2$ lors de leur hydratation).

C) Formation différée :

Cette ettringite se rencontre uniquement dans les bétons ayant subi au jeune âge un échauffement supérieur à $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au-delà de cette température, l'ettringite de formation primaire ne se forme pas au cours des réactions d'hydratation du ciment et/ou est décomposée.

La source des ions sulfate est donc d'origine interne car elle provient de l'absence, ou de la décomposition, de l'ettringite primaire. Après retour à température ambiante et en présence d'humidité, l'ettringite peut se former ou se reformer. Elle est alors susceptible de générer des pressions de gonflement dans certaines conditions (figure 15).

Dans la suite, c'est ce type de réaction que nous désignerons par le sigle RSI.



Grossissement x 800

Figure 16 : Ettringite ayant des propriétés extensives et localisée à l'interface pâte/granulat (microscope électronique à balayage) [3]

6 -Les mécanismes physico-chimiques de la réaction sulfatique interne (RSI) :

La RSI se traduit donc par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire, après la prise, sans apport de sulfates externes. Le mécanisme peut être décomposé schématiquement en plusieurs séquences. Il s'agit principalement de la constitution d'une source en sulfates potentiellement remobilisable, de la précipitation différée de l'ettringite et de l'expansion qui se traduit par la fissuration du béton.

La constitution d'une source en sulfates :

Une élévation conséquente de la température modifie les réactions d'hydratation du ciment. En effet, les sulfates apportés par le régulateur de prise ne sont pas alors mobilisés en totalité pour former l'ettringite primaire.

La précipitation de l'ettringite :

Après durcissement du béton et retour à la température ambiante, la précipitation de l'ettringite peut se produire au niveau des sites réactifs contenant des aluminates. et à la formation d'ettringite dans un espace confiné, d'une ettringite souvent qualifiée de mal cristallisée. Elle peut développer localement des pressions élevées et provoquer un gonflement.

° La **précipitation rapide de l'ettringite** conduit à la formation de cristaux très fins dont le **volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur**.

Nature gonflement:

Gonflement du aux

Sulfates

Magnésium

Alcalins

Calcaire

Augmentation du

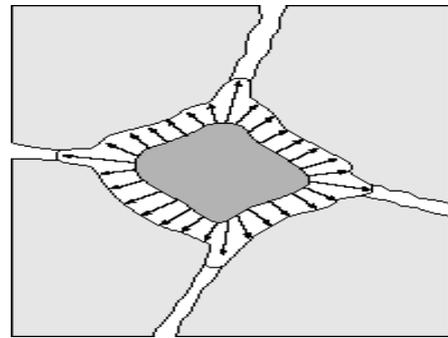
volume:

8x

2.2x

> 2x

1.7x



L'expansion :

Les deux principaux mécanismes plus ou moins associés ont été proposés pour expliquer le gonflement induit par la formation d'ettringite :

- un gonflement en relation avec les pressions de cristallisation associées à la croissance des cristaux d'ettringite,
- un gonflement en relation avec les pressions osmotiques dues à la croissance d'une ettringite colloïdale.

Dans la réalité, il est vraisemblable que les deux mécanismes puissent entrer en jeu simul-tanément et ne peuvent être vraiment dissociés. **[3]**

7 – Les facteurs limitant l'attaque du béton par les sulfates :

Les facteurs limitant l'attaque du béton par les sulfates sont[20] :

1. Les facteurs en relation avec la production et protection du béton.
2. Les facteurs en relation avec les propriétés physiques et chimiques du ciment.

1-Les facteurs en relation avec la production et la protection du béton :

La teneur en ciment : La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment (VERBECK, 1967). Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qu'un béton normal ce qui ralentit la pénétration des sulfates.

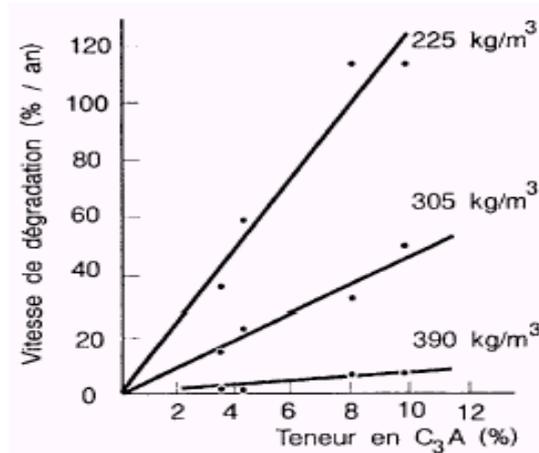


Figure 17 : Influence du dosage en ciment et de la teneur en C₃A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na₂SO₄ à 10%).

Les caractéristiques du béton : La résistance à la compression, la perméabilité, la connectivité, la diffusivité et le contrôle du transport de la solution dans le système, ont une influence sur l'expansion de l'ettringite différée (SHIMADA et al. 2005).

Le rapport (eau /ciment) : Ce rapport est le facteur le plus important qui affecte la résistance du béton aux sulfates (STARK, 1982). La diminution du rapport (eau/ciment) est la meilleure solution pour minimiser l'attaque extérieure du sulfate (CONCRETE, 2003). Il est préférable d'être plus petit que 0.45 (ACI, 1992).

CHAPITRE 2

La présence des fissures et d'autres défauts dans la structure du béton : Elle favorise l'expansion de l'ettringite différée (SHIMADA et al. 2005). L'utilisation des fibres, dans la production du béton, peut minimiser les fissures (REINHARD, 2005).

La réduction de la température à jeune âge : Elle peut affecter la formation d'ettringite secondaire ou différée, ce qui augmente la résistance aux sulfates (SHIMADA et al, 2005).

La température interne du béton : Cette température doit être inférieure à 56°C pour réduire le risque de la formation d'ettringite différée (FOLLIARD et al, 2006).

La température de cure du béton à jeune âge : Elle doit être inférieure à 60°C pour réduire le risque concernant la formation d'ettringite différée [(TRACY et al. 2004).

Le mode du régime de chauffage ou de refroidissement : Il peut favoriser la formation d'ettringite différée, ce qui réduit la résistance du béton aux sulfates (DAY, 1992).

La concentration élevée du sulfate soluble dans la terre (plus grande que 2 %) ou celle dans l'eau (plus grande que 10⁴ppm) : Elle réduit la résistance du béton aux sulfates (ACI, 1992).

L'humidité relative du milieu (CARLES-GIBERGUES et HORNAIN, 2008) : Elle a une influence négative si elle dépasse 92 % (GARF, 2007).

2-Les facteurs liés aux propriétés du ciment :

Le pourcentage de C₃A : Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C₃A du ciment (VERBECK, 1967).Le refroidissement rapide du clinker peut générer une forme vitreuse de C₃A qui a une meilleure résistance au sulfate que les formes cristallines (DUDA, 1977). Des études pratiques sur le béton ont montré que le pourcentage de C₃A dans le ciment est le facteur le plus important pour l'expansion aux sulfates seulement lorsque le rapport (eau/ciment) est entre 0,45 et 0,55 (STARK, 1997). D'autres études ont assuré l'influence de C₃A sur le taux de détérioration du béton par les sulfates (FERRARIS et al. 1997).

Le pourcentage et la solubilité de SO₃ : La teneur en SO₃ est limitée pour tous les ciments.

Les valeurs limites diffèrent selon les types et les spécifications complémentaires (ciment prise mer, ciment résistant au sulfate). La quantité initiale du soufre dans le ciment Portland joue un rôle important dans le phénomène d'expansion aux sulfates (MOBASHER et FERRARIS, 2004). Un excès de sulfate peut provoquer des gonflements par réactions tardives avec l'aluminat tricalcique (BARON et OLLIVIER, 1997).

Le rapport SO₃/Al₂O₃ du ciment : Day supposait qu'il n'y aurait formation d'ettringite différée que pour un rapport SO₃/Al₂O₃ supérieur à 0,7 (DAY, 1992). En se basant sur les contradictions dans la littérature entre les recommandations précédentes de Day, la conclusion de Zhang (qui suggère que la valeur critique du rapport SO₃/Al₂O₃ est de 0,8) et les résultats des travaux de Fu et de Famy (qui montrent que l'expansion atteinte semble passer par un maximum pour une valeur de ce rapport de 1,1), Leklou avait détecté que ce rapport n'est pas suffisant pour prédire correctement les expansions engendrées par la DEF (LEKLOU, 2008).

Le pourcentage de C₃S : Un pourcentage élevé de C₃S peut affecter négativement la résistance du béton aux sulfates mais cette influence est mineure par rapport à celle de C₃A (HOOTON et al, 2005). La norme française NF P 15-317, (Ciment pour travaux à la mer), limitait l'indice de Sadran (C₃A + 0.27 C₃S) à 23.5%.

Le rapport C₃S/C₂S : Le risque d'attaque du béton par les sulfates augmente avec l'élévation du rapport C₃S/C₂S dans le ciment (RASHEEDUZZAFAR, 1992). L'hydratation de C₃S (3CaO.2SiO₂) produit plus d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) que l'hydratation de C₂S (2CaO.SiO₂). Ce risque augmente avec la formation de gypse secondaire et de la décomposition des silicates de calcium hydratés C-S-H (3CaO.2SiO₂.8H₂O) (ROZIERE, 2007).



Le pourcentage d'alcalis : un pourcentage élevé d'alcalis, dans le béton, augmente le risque d'expansion après un traitement thermique (ESCADEILLAS et al, 2007). Le déclenchement de la DEF est accéléré avec l'augmentation du degré de lessivage des alcalins (LEKLOU, 2008).

8- Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :

- **Perméabilité** - Une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Rapport E/C** - Un rapport E/C faible diminue la porosité, la perméabilité et retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Recouvrement** - Il faut prévoir un bon recouvrement (60 mm) des aciers d'armature pour éviter la corrosion métallique.
- **Type du liant**
 - Un ciment à faible teneur en C3A (Type V) et en C3S peut être nécessaire
 - Utiliser un ciment ayant un rapport C3A/SO₃ inférieur à 3
 - Le choix du type de liant est un paramètre important de la durabilité des bétons en milieu marin
 - L'expérience européenne montre que les liants contenant une forte teneur en laitiers (>60%) ont un bon comportement en eau de mer. **[10]**

9- Quelles sont les conséquences du gonflement lié à l'ettringite ?

Les désordres consécutifs aux pressions de gonflement liées à la formation d'ettringite correspondent à des phénomènes de fissuration multidirectionnelle. Cette fissuration peut diminuer la capacité portante des ouvrages. Il convient néanmoins de souligner que dans le cas des attaques sulfatiques externes, liées à la présence d'une source de sulfates dans le milieu environnant, la dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments en béton.

CHAPITRE 2

En revanche, dans le cas d'une formation d'ettringite liée à une source interne de sulfates (ettringite différée ou réserve excessive en sulfates dans les constituants du béton), la dégradation affecte la masse des éléments en béton (réaction de gonflement interne), conduisant ainsi à des désordres plus préoccupants et plus sévères. Enfin, les désordres sur ouvrages peuvent, d'une part, apparaître au bout de quelques mois ou de quelques années en fonction du contexte environnant (apport de sulfates, conditions d'humidité, nature des ciments...). Et, d'autre part, la présence d'une fissuration en parement est susceptible d'accélérer l'apparition d'autres phénomènes pathologiques tels que la corrosion des armatures, par exemple. [8]



Figure 18-A : fissuration multidirectionnelle localisée sur la face verticale à l'extrémité d'un chevet de pont



Figure 18-B : Attaque sulfatique externe (pile du pont)



Figure 18-C : Fissuration très marquée dans la partie de la pile en contact avec l'eau



Figure 18-D : Extrémité d'une traverse de chemin de fer présentant un réseau de fissures provoquées par une RSI

10- Comment réduire les risques de formation d'ettringite expansive ?

La formation d'ettringite est très dépendante de la teneur en aluminates de calcium et de la quantité de chaux disponible, cette dernière ayant une influence significative sur la solubilité de l'ettringite. En conséquence, la nature du ciment est une condition essentielle à la limitation du risque de formation d'ettringite expansive. Dans cette optique, les ciments de type ES (résistant aux sulfates) conformes à la norme NF EN 197-1 sont adaptés à ces problématiques, de même que les ciments renfermant des additions minérales (laitier de haut fourneau et cendres volantes notamment) limitant la quantité de chaux dans la solution interstitielle du béton. D'autre part, les constituants du béton doivent renfermer des quantités limitées de sulfates définies par les normes correspondantes (NF EN 197-1 pour les ciments, XP P 18-545 et NF EN 12-620 pour les granulats).

Dans le cas particulier de l'ettringite de formation différée, les facteurs influant sont la température maximale atteinte dans le béton au jeune âge et la durée de son maintien, la teneur en sulfates, en aluminates et en alcalins, le dosage en ciment et les conditions d'humidité régnant dans le béton. Dans la mesure où l'étude de ce type de pathologie est assez récente, il n'existe pas, pour le moment, de valeurs seuils permettant de réduire le risque d'expansion. Néanmoins, la publication, en mai 2003, d'un projet de méthode d'essai LCPC (méthode LPC n° 59), intitulé "Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne", permet de valider l'utilisation d'une formulation de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne, sur la base d'un critère de performance. Enfin, des recommandations pour la prévention de cette pathologie sont actuellement en cours d'élaboration dans le cadre d'un groupe de travail coordonné par le LCPC

11- Que faire lorsque les ouvrages sont atteints par une expansion sulfatique ?

En premier lieu, les bétons suspectés d'être affectés par un problème d'ettringite expansive, doivent faire l'objet d'un diagnostic par un laboratoire spécialisé, diagnostic s'articulant autour d'examen au microscope électronique à balayage, seule technique permettant de diagnostiquer avec certitude le caractère potentiellement expansif de l'ettringite. Ce diagnostic doit aussi permettre de recenser tout ou partie des données historiques de l'ouvrage (bétons massifs ou étuvés, nature du ciment...) et de son contexte (source de sulfates, humidité...). Ces données sont essentielles dans ce type de pathologie, car elles permettent de cerner les causes d'origine du phénomène. A ce titre, l'ouvrage GranDuBé (à paraître) donnera une méthodologie de diagnostic assortie d'une charte photographique. Par ailleurs, un essai LPC n° 59 peut être réalisé afin d'estimer le potentiel de gonflement résiduel. Dans le cas d'une attaque externe, les ouvrages peuvent être réparés de façon traditionnelle par purge du béton "pollué", mise en œuvre d'un produit de réparation adapté et d'une protection de surface. En revanche, dans le cas d'une réaction interne, les phénomènes peuvent tout au plus, comme dans le cas de l'alcali-réaction, être

CHAPITRE 2

ralentis en appliquant une protection de surface visant à limiter la pénétration d'humidité dans le béton. Le LCPC a par ailleurs édité en 2003 un guide méthodologique destiné entre autres aux maîtres d'ouvrage et aux gestionnaires. Cet ouvrage s'intitule "Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne".[8]

•Flintkote :

Exemple de la protection de la surface : l'utilisation de flintkote

Emulsion anionique de bitume surstabilisée exempte de charges, destinée à la protection de nombreux subjectiles.

Le film résiduel reste souple, possède une excellente résistance à l'oxydation, à l'eau et ne flue pas.

✓ *Domaine d'utilisations :*

- Imperméabilisation des parois intérieures des caves et des murs extérieurs
- Protection des murs contre l'humidité
- Couche de protection pour certain métaux (entre le plomb et le béton)
- Enduit d'application à froid
- Application 0,500Kg /m²
- Imperméabilisation des barrages , canalisation d'eau et barrages collinaires
- Surfaçage des branches après coupe lors de la taille des arbres
- Protection des ponts et viaduc contre la corrosion [14]



Figure 19: flintkote

Le flintkote est généralement utilisé dans toute infrastructure (sous le sol qui contient des sulfates), car c'est le meilleur isolateur et remède des agents agressifs(les sulfates et l'humidité) figure 18.

Quelques photos (figure 19) montrent l'utilisation de flintkote : (société **INERGA- CHEGGA-BISKRA**)



Figure 20 -A : La teinture du flintkote



Figure 20-B : Flintkote



Figure 20 -C : Un ouvrage souterrain (béton armé)



Figure 20 -D : Une semelle isolée (flintkote)

• **Mesures de préventions contre les ions sulfates :**

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

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.

- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment. **[18]**

• **Quand utiliser un ciment à haute résistance aux sulfates ?**

Les Critères requérant une analyse chimique détaillée à fournir par le maître d'ouvrage (sol et eau, le cas échéant incidences de l'exploitation).

Le sol et les eaux souterraines peuvent contenir des sulfates. Leur présence peut également être due à des activités industrielles ou à l'utilisation de certains engrais. Ces sulfates pénètrent dans les bétons principalement par diffusion ou par absorption capillaire et peuvent réagir avec les produits d'hydratation du ciment. Les produits de cette réaction étant expansifs, le béton commence alors à se dégrader (par la formation d'ettringite, également appelée sel de Candlot)

Une compacité élevée du béton (teneur correcte en ciment, faible rapport E/C, squelette optimal des granulats) améliore la résistance de ce dernier aux sulfates. Pourtant,

CHAPITRE 2

cette compacité ne suffit pas à elle seule. Dès que la teneur en sulfates de l'eau ou des terres en contact avec le béton est supérieure, respectivement, à 500 mg/l ou 3.000 mg/kg (ce qui correspond aux classes d'environnement EA1 à EA3), il est nécessaire d'utiliser un ciment à haute résistance aux sulfates (voir la norme NBN B 15-001). [5]

• *Épaisseur minimale d'enrobage :*

L'épaisseur de l'enrobage est un élément essentiel de la protection des aciers vis-à-vis de la corrosion

L'épaisseur minimale d'enrobage des armatures pour le béton armé, prescrite par la réglementation, est liée à la sévérité du milieu d'exposition caractérisé par son niveau d'agressivité (Ni, N2, N3, N4 ou N5) et varie d'un pays à l'autre de façon souvent disparate. Le passage d'un niveau d'agressivité à un niveau supérieur ne s'accompagne pas toujours d'une modification de l'épaisseur d'enrobage.

Les codes de calcul donnent des règles pour limiter l'ouverture des fissures du béton armé. Les règles du BAEL 91 dépendent de l'agressivité du milieu et du caractère plus ou moins préjudiciable de la fissuration (peu nuisible, préjudiciable, très préjudiciable).

Des valeurs minimales d'enrobage sont prescrites selon trois classes de conditions d'exposition (voir tableau 10).

Conditions d'environnement	Épaisseur minimale d'enrobage des armatures (en cm)
Environnement sec pour intérieur de locaux	1
Environnement humide et agressif pour ouvrage exposé aux intempéries, condensations et en contact avec les liquides	3 ou 2, si la résistance caractéristique du béton supérieure à 40 MPa
Environnement très agressif pour exposition à la mer, brouillard salins, fondants et en atmosphère chimiquement agressif	5 ou 3, si les armatures sont protégées par un procédé efficace

Tableau 10 : épaisseurs minimales d'enrobage des armatures à respecter en fonction des conditions d'exposition selon le BAEL 99.

Outre des valeurs minimales d'enrobage, le BAEL prescrit également, de manière indirecte, une limitation de l'ouverture des fissures de fonctionnement dans les zones tendues du béton armé qui peuvent augmenter la pénétration des agents agressifs. [16]

12- Bilan des structures :

D'une manière générale, la manifestation de désordres est visible sur un ouvrage entre cinq et dix ans après la construction. De plus, ces désordres n'affectent jamais la totalité de l'ouvrage mais essentiellement les parties massives exposées à l'humidité ou à des venues d'eau. Un échauffement important des bétons a été estimé (de l'ordre de 80 °C) résultant de la géométrie de la pièce, de la période de coulage (en été) et d'un fort dosage en ciment.

Une expertise plus détaillée a été réalisée à partir de huit ouvrages afin de rechercher les paramètres simultanément présents et a priori nécessaires au développement de la RSI. Ces paramètres ont été classés en quatre groupes :

- paramètres liés à la température - paramètres liés au ciment - paramètres liés au béton - paramètres liés à l'environnement. . Ces données sont rassemblées dans le **tableau 11**.

	Pont « A »	Pont « B »	Pont « C »	Pont « D »	Pont « E »	Pont « F »	Pont « G »	Pont « H »
Année de construction	1955	1967	1980	1988	1990	1982	1988	1989
Partie d'ouvrage concernée	Chevêtre	Pile	Chevêtre	Pile	Pile	Chevêtre	Socle de pile	Chevêtre
Paramètres liés à la température :								
• T max (°C)	> 80	> 80	> 80	> 75	> 80	> 70	> 75	> 75
• Période de bétonnage	Août	Inconnue	Août/sept.	Juillet/août	Août/sept.	Juillet/août	Juillet/août	Juillet/août
Paramètres liés au ciment :								
• Type de ciment	CPA	CPAL (10 % de laitier)	CPA 55R	CPJ 55 (10 % filler calcaire)	CPA 55R	CPA	CPA	CPA 55R
• SO ₃ (% massique)	2,5	2,7	2,6	2,5	2,8	3,2	2,2	3,5
• C ₃ A (% massique)	11,2	9,6	9,8	7,0	8,2	11,0	7,1	10,1
Paramètres liés au béton :								
• Dosage en ciment (kg/m ³)	430	430	400	380	410	350	385	400
• Rapport E/C	0,50	0,50	0,47	0,54	0,46	0,49	0,48	0,50
• Nature des granulats	Siliceux	Siliceux	Silico-calcaire	Siliceux	Siliceux	Silico-calcaire	Siliceux	Silico-calcaire
• Teneur en alcalins (Na ₂ O équivalent en kg/m ³) (1)	2,0	4,3	4,0	4,1	2,3	3,0	3,9	4,6
Paramètre lié à l'environnement :								
• Humidité	Problème d'étanchéité	Absence de drainage	Condensation Alternance humidification-séchage	Zone de marnage	Zone de marnage	Soumis aux intempéries	Soumis aux intempéries	Absence de drainage

(1) $Na_2O \text{ équivalent} = Na_2O + 0,658 K_2O$

„ **Tableau 11** - étude comparative des différents facteurs déterminants de la RSI rencontrés dans des ponts expertisés [3]

13- Détermination du niveau de prévention nécessaire :

L'objet de ces recommandations est de définir des précautions pour la mise en œuvre et la formulation d'un béton vis-à-vis des risques de réaction sulfatique interne (RSI) susceptibles de se développer pendant la vie de l'ouvrage.

A)- Catégories de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage :

Les ouvrages (ou parties d'ouvrage) sont classés en trois catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne que l'on est prêt à accepter pour un ouvrage (ou une partie d'ouvrage) donné. Le choix de la catégorie d'ouvrage est de la responsabilité du maître d'ouvrage ; il est fonction de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur (Tableau 12).

Catégorie	Exemples d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrage
<p>Catégorie I conséquences faibles ou acceptables</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Ouvrages de classe de résistance inférieure à C 16/20 -Éléments non porteurs des bâtiments -Éléments aisément remplaçables Ouvrages provisoires -La plupart des produits préfabriqués non structurels
<p>Catégorie II conséquences peu tolérables</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Les éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) -La plupart des produits préfabriqués structurels (y compris les canalisations sous pression)
<p>Catégorie III Conséquences inacceptables ou quasi inacceptables</p>	<ul style="list-style-type: none"> Bâtiments réacteurs des centrales nucléaires et aéroréfrigérants -Barrages -Tunnels -Ponts ou viaducs exceptionnels -Monuments ou bâtiments de prestige -Traverses de chemin de fer

Tableau 12- exemples d'ouvrages ou éléments d'ouvrage classés par catégorie

- **La catégorie I :** concerne les ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont faibles ou acceptables. La plupart des produits préfabriqués en béton entrent dans cette catégorie à l'exception des éléments préfabriqués structurels et des produits destinés à être utilisés dans des ambiances agressives (écrans acoustiques, corniches d'ouvrages d'art, certaines canalisations d'assainissement, etc.).

- **La catégorie II :** rassemble les ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont peu tolérables. Les éléments porteurs de la majeure partie des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) entrent dans cette catégorie, ainsi que les éléments préfabriqués structurels.

- **La catégorie III :** correspond à des ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont inacceptables ou quasi inacceptables. Ce sont généralement des ouvrages à caractère exceptionnel dont l'absence totale de désordres peut être nécessitée par des raisons de sécurité, d'esthétique ou d'impossibilité de réparation ou de remplacement.

B)- Classes d'exposition vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (RSI) :

La norme NF EN-206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites dans le présent document pour traiter ce cas. Celles-ci tiennent compte du fait que l'eau ou une hygrométrie ambiante élevée sont des facteurs nécessaires au développement de la réaction sulfatique interne. L'apport d'alcalins et de sulfates par le milieu environnant est également source d'aggravation de désordres, mais l'on considère qu'ils font partie d'un processus de dégradation par la surface et qu'ils relèvent de dispositions préventives qui sont traitées par ailleurs (par exemple dans la norme 16 NF EN 206-1).

Ces trois classes d'exposition XH1, XH2 et XH3 sont définies selon les indications du tableau 13 qui présente également à titre informatif des exemples de parties d'ouvrage classées dans les milieux ambiants appropriés.

CHAPITRE 2

Pour un ouvrage (ou une partie d'ouvrage) donné(e), les spécifications définies dans le présent document devront être prises en compte en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1.

C)- Niveaux de prévention :

Il est fixé quatre niveaux de prévention désignés par les lettres As, Bs, Cs et Ds. La détermination du niveau de prévention se fait en fonction d'une part de la catégorie de l'ouvrage, et d'autre part de la classe d'exposition XH à laquelle est soumise la partie d'ouvrage considérée. La détermination du niveau de prévention peut se faire en considérant l'ouvrage dans son entier, mais il est recommandé d'examiner chaque partie d'ouvrage pour déterminer le niveau de prévention adapté. Le choix des niveaux de prévention est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui peut s'aider pour cela du tableau 14.

Classes exposition	Description De l'environnement	Exemple informatif illustrant le choix des classes d'exposition
XH1	Sec ou humidité modérée	-Partie d'ouvrage située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen -Partie d'ouvrage située à l'extérieur et abritée de la pluie
XH2	alternance humidité-séchage, humidité élevée	-Partie d'ouvrage située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé -Partie d'ouvrage non protégée par un revêtement et soumis aux intempéries, sans stagnation d'eau à la surface -Partie d'ouvrage non protégée par un revêtement et soumise à des condensations fréquentes
XH3	en contact durable avec l'eau : -Immersion permanente -stagnation d'eau à la surface -zone de marnage	-Partie d'ouvrage submergée en permanence dans l'eau -Eléments de structures marines -Un grand nombre de fondations -Partie d'ouvrage régulièrement exposée à des projections d'eau

„ Tableau 13 – classes d'exposition de la partie d'ouvrage vis-à-vis de la RSI [4]

Classe d'exposition Catégorie d'ouvrage	XH1	XH2	XH3
I Risque faible ou acceptable	As	As	As
II Risque peu tolérable	As	Bs	Cs
III Risque inacceptable	As	Cs	Ds

„ Tableau 14 - choix du niveau de prévention

D)- Précautions en fonction des niveaux de prévention :

À chacun des quatre niveaux de prévention As, Bs, Cs et Ds correspond un type de précaution à appliquer. Le principe de prévention repose essentiellement sur la limitation de l'échauffement du béton caractérisé par la température maximale Tmax susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage et, le cas échéant, par la durée de maintien d'une température élevée.

1- Niveau de prévention As :

Soit : $T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$

$85^{\circ}\text{C} < T_{max} < 90^{\circ}\text{C}$

et

durée ($T_{max} > 85^{\circ}\text{C}$) < 4 heures

- Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par la précaution suivante :

- La température Tmax susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage doit rester inférieure à 85 °C.

CHAPITRE 2

-Dans le cas d'un traitement thermique maîtrisé* : un dépassement de la température $T_{max} = 85\text{ °C}$ est autorisée jusqu'à 90 °C , à condition que la durée pendant laquelle la température dépasse 85 °C soit limitée à 4 heures.

2-Niveau de prévention Bs :

Soit : $T_{max} < 75\text{ °C}$

Soit : $75\text{ °C} < T_{max} < 85\text{ °C}$

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes :

„ La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 75 °C .

„ Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 75 °C , alors elle doit rester inférieure à 85 °C et au moins une des six conditions suivantes doit être respectée :

soit (1) durée < 4 heures et $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ actifs du béton $< 3\text{ kg/m}^3$

soit (2) utilisation d'un ciment conforme à la norme **NF P15-319 (ES)** avec pour les CEM I et CEM II/A :

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ actifs du béton $< 3\text{ kg/m}^3$

soit (3) utilisation de ciments non conformes à la norme NF P15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A ou CEM V

et SO_3 du ciment $< 3\%$ et C_3A du clinker $< 8\%$

soit (4) vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance

soit (5) utilisation en combinaison avec du CEM I, de cendres volantes, de laitiers de haut fourneau et de pouzzolanes

et proportion d'addition $> 20\%$

et ciment CEM I : $\text{C}_3\text{A} < 8\%$ et $\text{SO}_3 < 3\%$

soit (6) pour les éléments préfabriqués : 5 conditions de références d'emploi

3-Niveau de prévention Cs :

Soit : $T_{max} < 70^{\circ}\text{C}$

Soit : $70^{\circ}\text{C} < T_{max} < 80^{\circ}\text{C}$

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes :

La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 70°C .

Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 70°C , alors elle doit rester inférieure à 80°C et au moins une des six conditions suivantes doit être respectée :

Dans ce cas, une des 6 conditions suivantes doit être respectée :

les conditions sont les mêmes que pour le niveau Bs

4- Niveau de Prévention Ds :

Soit : $T_{max} < 65^{\circ}\text{C}$

Soit : $65^{\circ}\text{C} < T_{max} < 75^{\circ}\text{C}$

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes, la première précaution étant recommandée comme prioritaire :

„ La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 65°C .

„ Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 65°C , alors elle doit rester inférieure à 75°C et les deux conditions suivantes doivent être respectées :

- utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) avec, dans le cas des CEM I et CEM II/A, une limitation à 3 kg/m^3 de la teneur en alcalins équivalents actifs du béton ;

- validation de la formulation du béton par un laboratoire indépendant expert en RSI. **[4]**

Conclusion :

La pathologie de l'attaque sulfatique est résumée dans ce tableau suivant :

L'attaque sulfatique				
Cause (Source et origine)	Substances concernées	Mécanisme	Conséquences	Préventions et solutions
<p><u>Milieu intérieur :</u></p> <p>Régulateur de prise ;</p> <p>Granulats pollués ;</p> <p><u>Milieu extérieur :</u></p> <p>Les sols,</p> <p>Les eaux</p> <p>L'atmosphère ;</p> <p>Les ouvrages d'assainissement ;</p> <p>L'eau de mer.</p>	<p>Granulats ou fillers ;</p> <p>Les plus sensibles sont le C-S-H, la portlandite, et les aluminates anhydres (C₃A) ou hydraté.</p>	<p>Les sulfates réagissent avec les substances concernées et forment des produits secondaires (ettringite, gypse,..). Ces derniers occupent plus de place que les composants à partir desquels ils se forment causant ainsi le gonflement et la fissuration.</p>	<p>Précipitation de produits sulfatés dits «secondaires » ;</p> <p>-Expansion importante ;</p> <p>Détériorations chimico-mécaniques ;</p> <p>La ruine du matériau cimentaire.</p>	<p>-Utilisation d'un ciment Portland à haute résistance aux sulfates (CEM I HSR)</p> <p>-L'épaisseur de l'enrobage pour protection des aciers de la corrosion</p> <p>- l'utilisation de flintkote</p> <p>c-à-d : d'une faible teneur en C₃A ;</p> <p>-Augmentation de rapport E/C ;</p> <p>-L'utilisation de ciment à ajouts pouzzolaniques accrus.</p>

CHAPITRE 3

Introduction

Pour mieux connaître ce phénomène, ses conséquences et le danger qui présentent sur les structures et les ouvrages d'arts, les recherches continuent à nos jours, dans ce chapitre, nous aborderons quelques exemples études menées, sur l'attaque sulfatique externe et interne, et leurs effets sur la durabilité du béton.

Deux formes d'endommagement des bétons par des attaques sulfatiques externes sont répandues et qui peuvent endommager les bétons en Algérie :

- La présence de sols gypseux (*Figure 20-A*) en zones urbaines et qui peuvent contenir jusqu'à 85% de gypse à partir de 12 m de profondeur est à l'origine de multiples formes d'endommagement des bétons. En temps de fortes pluies, certaines parties des constructions se retrouvent immergées dans des solutions souterraines contenant des doses importantes de sulfates et causent souvent leur dégradation et leur corrosion.

- La pollution atmosphérique, comme celle qui peut être générée dans certaines zones industrielles, comme par exemple la centrale à cycle combine de production d'électricité et cimenteries (*Figure 20-B*) et les usines de fabrication des batteries pour voitures. En effet, les gaz rejetés par les cimenteries dans l'atmosphère lors de la cuisson du clinker et la propagation dans l'air du SO₂ due à la dissolution de l'acide sulfurique lors de la fabrication des batteries des voitures causent la corrosion des matériaux ferreux et la détérioration des bétons à long terme dans toutes les zones avoisinantes.



Figure 21-A : Quelques échantillons de roches gypseuses existantes dans les sols



Figure 21-B : Origine de la pollution de l'atmosphère, exemple d'une cimenterie

Ce chapitre aborde les études (Exemples : des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques ...) effectuées, relatives à l'attaque sulfatique externe et interne, sur la résistance du béton, en fonction du temps, et les effets des différents facteurs (l'environnement, la température, la présence des sulfates, l'humidité ...etc.) et le diagnostic et la réparation d'une structure en béton armé.

1- travaux de Gagné:

- Moins de ciment => teneur en C_3A plus faible dans le béton.
- Perméabilité plus faible
- Fumée de silice et cendres volantes: Moins de $Ca(OH)_2$ dans la pâte de ciment hydraté (réaction pouzzolanique)
- Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates .

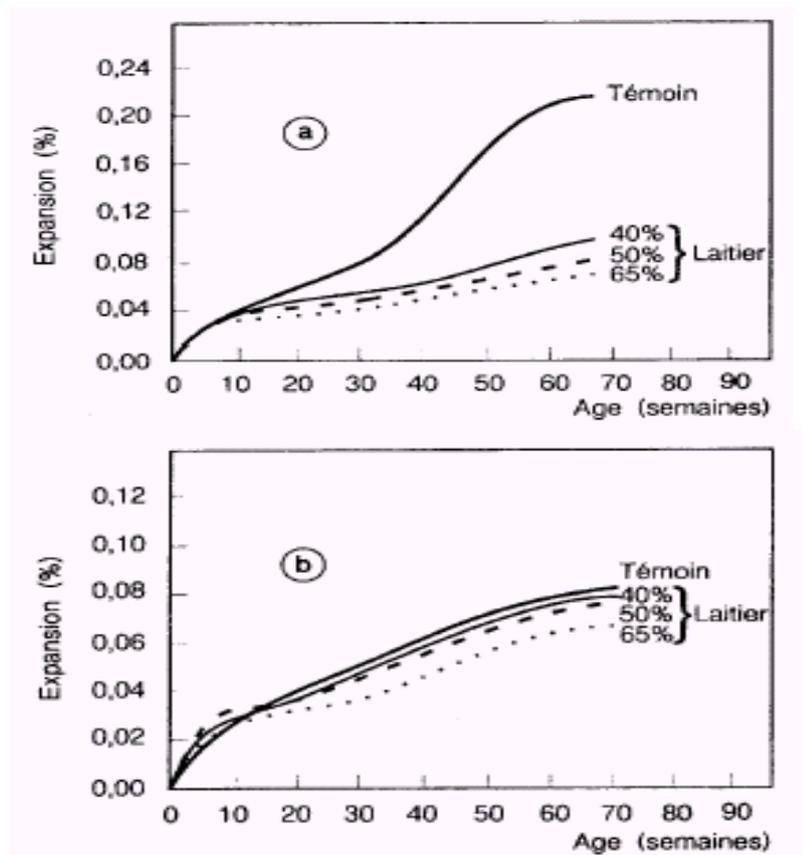


Figure 22 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.

a: Ciment type II 6,4% de C_3A b: Ciment type V 3,7% de C_3A .

◦ Les ciments avec plus de 20% à 30% de cendres volantes ont une meilleure résistance aux sulfates. L'effet des cendres est variable en fonction de leur composition chimique. Les cendres ayant un contenu en chaux > 20% ne devraient pas être utilisées.

◦ La fumée de silice (7%-10%) améliore très significativement la résistance aux sulfates **[18]**

2- Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques :

^ - Essais sur pâte de ciment :

Dans l'essai Anstett [ANS 23], effectué sur une pâte pure de ciment mélangée avec du gypse (rapport 50/50), le critère de tenue aux sulfates est un critère di-mensionnel (variation du diamètre des éprouvettes aux échéances de 28 et/ou 90 jours). Un accroissement de plus de 1,25 % classe le ciment comme non résis-tant aux sulfates. Cet essai, simple et rapide, mais extrêmement sévère a été sou-vent très critiqué.

Dans l'essai proposé par Mehta [MEH 75, MEH 80], les éprouvettes de pâte pure sont immergées dans une solution à 4 % de Na_2SO_4 . Le critère de tenue est le maintien de la résistance mécanique (un matériau est non résistant aux sulfates si une perte de résistance mécanique supérieure à 25 % par rapport à la résistance du témoin est constatée). Cet essai est rapide mais donne des résultats variables, le mode opératoire n'étant pas optimisé. [16]

- Essais sur mortier :

Plusieurs essais sont normalisés :

– norme ASTM C1012-95a, applicable à tous les ciments. Les prismes de mor-tier sont immergés dans une solution à 50g/L de Na_2SO_4 à 23 °C et un suivi de l'allongement des éprouvettes est effectué durant au moins 15 semaines ;

– norme ASTM C452-95, applicable exclusivement aux ciments sans additions. Du gypse est ajouté lors du gâchage (teneur en SO_3 au moins de 7 % en masse par rapport au mortier), les éprouvettes étant ensuite immergées dans de l'eau à 20 °C. Des mesures de l'allongement des prismes sont effectuées au cours de l'essai ;

– norme NF P 18-837 [16] « Produits de calage et/ou de scellement à base de liants hydrauliques – Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates ». Des mesures d'allongement sont réalisées tous les mois sur des pris-mes $2 \times 2 \times 16$ cm de mortier normal immergés dans une solution de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ à 50g/L, et comparées aux mesures effectuées sur une série de prismes conservés dans l'eau distillée.

CHAPITRE 3

D'autres procédures par immersion d'éprouvettes de mortiers dans différentes solutions de sulfate de concentrations variables (sulfates de sodium, de magnésium, de calcium) sont souvent utilisées dans les laboratoires. En tout état de cause, les résultats montrent que les essais sur mortier ne sont représentatifs que du comportement du ciment (dont ils permettent, dans les meilleurs cas, d'effectuer un classement) mais qu'ils ne sauraient en aucun cas représenter le comportement futur du béton.

- Essais sur bétons :

On trouve dans la littérature des résultats d'essais de résistance aux sulfates réa-lisés sur béton, généralement plus représentatifs du comportement d'un béton d'ouvrage que ne le sont les mortiers. Toutefois, ces essais se révèlent généralement très longs et incompatibles avec les exigences des chantiers.

Khatri [KHA 97], qui a comparé le comportement de prismes de mortiers et de bétons fabriqués avec les mêmes ciments (CEM I et ciments avec ajouts de laitier ou fumées de silice), montre que le comportement des mortiers ne suit pas le comportement des bétons en raison des différences de perméabilité des matériaux

a-Essais de résistance aux attaques sulfatiques externes :

• Norme ASTM C1012-04:

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

a• Essai Anstett ou Le Chatelier-Anstett-Blondiau:

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

• Essai Mehta :

Les essais sont réalisés à partir de petits cylindres de pâte pure de rapport E/C élevé, préparés en ajoutant une barbotine du ciment pré-hydraté destinée à éviter le ressuage. Les cylindres, de diamètre 11 mm et de longueur 22 mm (élancement 2) sont conservés 1 jour à 20 °C en atmosphère humide puis 13 jours à 40 °C et 100 % d'humidité relative. Ils sont ensuite immergés dans une solution à 4 % de Na₂SO₄ de pH stabilisé à 7 #177; 0,5 par addition de H₂SO₄ (0,1 N), à température ambiante. La résistance en compression des cylindres est mesurée après 28 jours et/ou 90 jours d'immersion. Le critère de non résistance aux sulfates est une perte mécanique de 25 % par rapport à la résistance des cylindres à l'issue du traitement à 40 °C. Cet essai est intéressant par sa rapidité, mais peut donner des résultats variables d'un laboratoire à un autre, en raison d'un mode opératoire non optimisé.

b-Essais de résistance aux attaques sulfatiques internes :

- *Le test de Duggan:*

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

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

- *L'essai de Fu :*

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

- le premier de 12 heures à 95,7 °C, suivi d'une immersion dans l'eau pendant 6 heures à 23 °C ;
- le deuxième de 24 heures à 85,7 °C.

La mesure initiale des dimensions des éprouvettes est réalisée avant le deuxième étuvage. Le délai d'une heure, accordé pour la maturation des mortiers à température ambiante a pour objectif d'augmenter la quantité d'ions sulfates adsorbés à la surface des C-S-H. Le deuxième traitement thermique doit permettre d'accélérer les processus d'expansion. À la suite de ces cycles, les échantillons sont conservés dans une solution saturée en chaux à 23 °C. L'expansion des mortiers est mesurée tous les 7 jours. Le seuil retenu est de 0,04 % d'expansion après 42 jours d'immersion. **[18]**

3- L'effet de l'attaque sulfatique externe (M^{ed} Rissel Khalifa) :

1-Objectif de l'étude :

Le but de ce travail est d'étudier le comportement de deux types des ciments (CPJ CEM II/A 42,5 ciment composé portland et ciment portland résistant aux sulfates CPA CEM I 42,5 avec deux rapport E/C différents (0,49 et 0,59), au milieu agressif (l'eau dosée à 5 % de Na₂SO₄, 10H₂O).

2- Les échantillons étudiés :

il est utilisé deux types de ciments (CPJ CEM II/A 42,5 ciment composé portland et le CPA CEM I 42,5 ciment portland résistant aux sulfates) et deux rapports E/C différents (0,49 et 0,59), donc il pu obtenir 4 types de bétons autoplaçants avec succès et dont les compositions et les résistances mécaniques à 7 et à 28 jours (Figure 23) sont données par le Tableau 14



Figure 23 : Presse des éprouvettes 11x22cm de l'Ecole Polytechnique d'Orléan

De même, les mortiers équivalents ont été confectionnés, leurs compositions et leurs performances mécaniques à la flexion et à la compression à 7 et à 28 jours sont données par le *Tableau 15*.

BAP	BAP ₀₁ :CEMII/59	BAP ₀₂ :CEMI/59	BAP ₀₃ :CEMII/49	BAP ₀₄ :CEMI/49
Type de C	CPJ CEMII/A 42,5	CPA CEM I 42,5	CPJ CEMII/A 42,5	CPA CEM I 42,5
Sp	1,4%,C	1,1%,C	2,0%,C	1,6%,C
Ac	0,05%,C	0,05%,C	0%,C	0%,C
E/C	0,59	0,59	0,49	0,49
E/f	0,40	0,40	0,33	0,33
R _{c7j} (MPa)	15,63	24	23,25	32,75
R _{c28j} (MPa)	18,75	27,9	29,6	38

Tableau 15 : Caractéristiques et performances mécaniques des différents BAP



Figure 24 : Confection des éprouvettes cylindriques en béton autoplaçant

3- Les protocoles expérimentaux :

Pour pouvoir observer et analyser le comportement de ces échantillons, quatre protocoles d'attaque sulfatique externe ont été appliqués. Cette étude, s'intègre dans une recherche dont l'objectif est de développer, il est utilisé exclusivement des matériaux concassés, des formulations de BAP aux caractéristiques à l'état frais satisfaisantes, et durables. Le premier point de recherche qui consiste à formuler de tels bétons à l'aide de granulats concassés, majoritairement disponibles en Algérie a été atteint. L'environnement algérien est potentiellement propice au développement de l'attaque sulfatique externe, par exemple dans le cas de construction sur terrains gypseux très humides durant l'hiver. Ainsi, la notion de durabilité de ces bétons, qui fait l'objet de cette étude, est testée vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe, selon quatre protocoles appliqués aux différents types de bétons et de mortiers.

4- L'immersion totale :

Les éprouvettes en béton et en mortier sont immergées dans de l'eau distillée dosée à 5 % de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (**Figure 24**) renouvelée tous les 30 jours.

Ce protocole est le plus fréquent dans la bibliographie, il simule le cas typique de l'attaque des bétons par les sulfates à travers la pollution des sols comme par exemple les sols gypseux.



Figure 25 : Immersion des échantillons de l'eau dosée à 5 % de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

5- Résultats et discussion :

1. Résistances initiales et porosités :

La Porosité [%] = $100 \cdot M_{\text{eau}} / \text{Volume} = 100 \cdot (M_{\text{saturée}} - M_{\text{sèche}}) / \text{Volume}$ et la résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm

Les quatre types de béton sont données par le **Tableau 16**

Différents types de BAP	CEMII/59	CEMI/59	CEMII/49	CEMI/49
Porosité [%] $\pm 0,5$ %	13,8	12,0	10,5	8,7
R_{C28j} [MPa] ± 1 MPa	18,8	29,6	27,9	38

Tableau 16 : Valeurs des porosités et des résistances à 28j des quatre types de béton

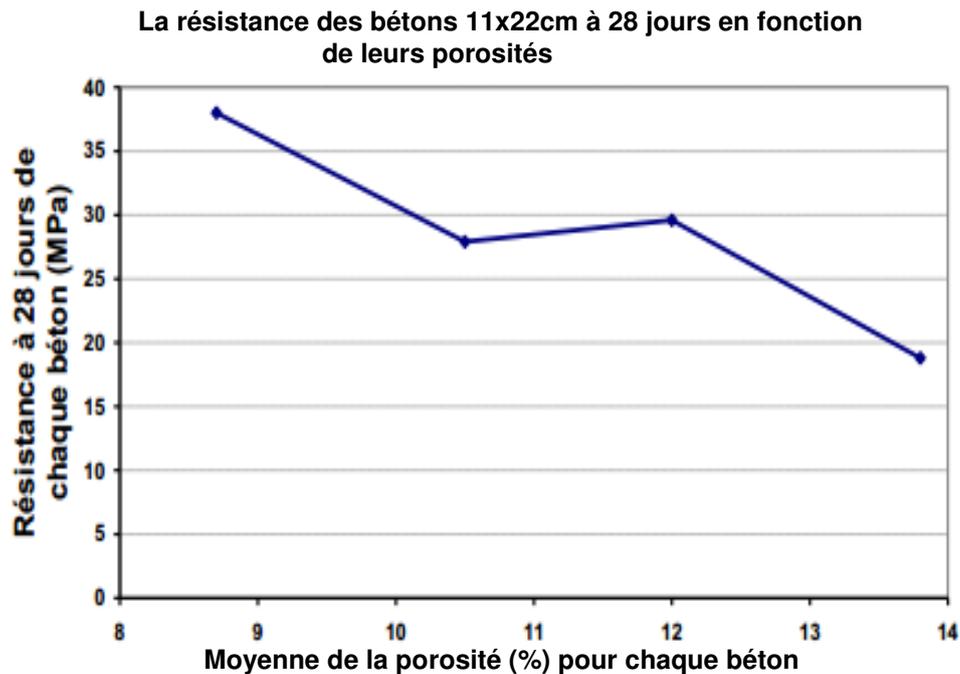


Figure 26 : La résistance BAP en fonction de leurs porosités [19]

il remarque que les bétons les plus poreux sont les moins résistants, comme le montre *Figure 25*. Alors que les deux ciments utilisés sont de la même classe (42,5), les résistances des bétons issus de ces deux ciments diffèrent pour un même rapport E/C. La différence de porosité permet d'expliquer en partie cette différence de résistance.

2 .Cas du protocole immersion complète

Les cylindres 11x22 cm soumis à l'immersion complète ne présentent aucun signe d'altération jusqu'au 5^{ème} mois. Dès le 6^{ème} mois les éprouvettes issues des bétons CEM II/59 et CEM II/49 ont subi d'importantes fissurations sur les arrêtes circulaires, Pour ce même ciment CEM II/A 42,5, la *Figure26-A* et la *Figure 26-B* montrent que les fissurations du béton CEM II/59 (E/C = 0,59) sont plus prononcées par rapport à celles du béton CEM II/49 (E/C = 0,49).

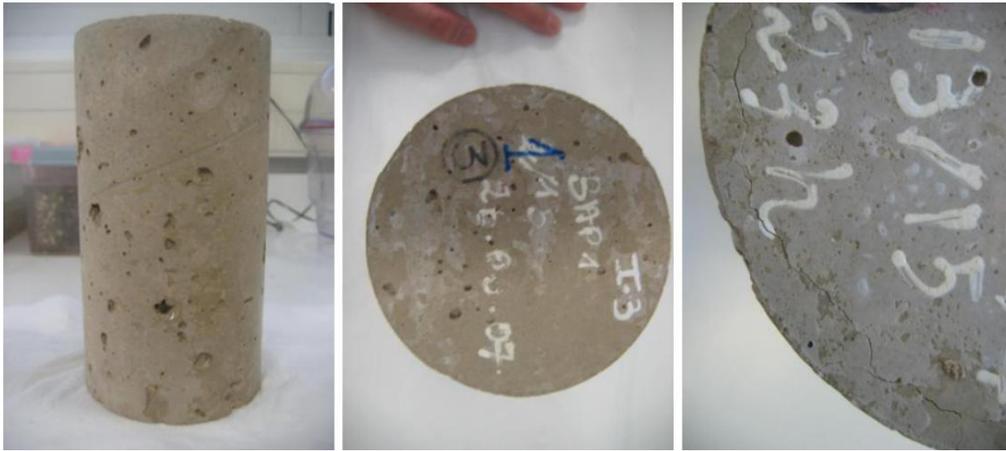


Figure 27-A : Fissuration des éprouvettes 11x22 cm en béton CEM II/59 après 5 mois d'immersion complète

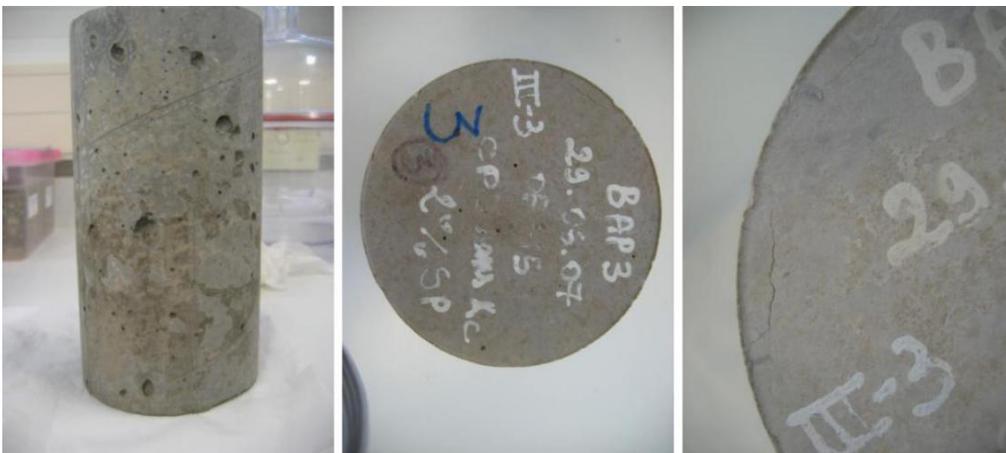


Figure 27-B : Fissuration des éprouvettes 11x22 cm en béton CEM II/49 après 5 mois d'immersion complète

Les éprouvettes 11x22 cm des deux autres bétons fabriqués à partir du ciment CEM I 42,5 PM-ES sont restées intactes peu importe le rapport E/C, aucune fissuration n'a été remarquée (*Figure 26-C*).



Figure 27-C : Etat intact des éprouvettes 11x22 cm en CEM I/59 et en CEM I/49 après 6 mois d'immersion complète

3. Cas des cylindres de béton 11x22 cm (Figure 24) :

Parmi les éprouvettes cylindriques 11x22 cm qui ont été exposées à l'immersion complète (Figure 24), seuls les bétons CEM II/59 et CEM II/49 ont subi des fissurations et une perte de résistance particulièrement prononcées dans le cas du CEM II/59. L'immersion complète a provoqué une attaque sulfatique externe pour les bétons utilisant le CEM II/A 42,5 (CEM II/59 et CEM II/49). Les bétons utilisant le CEM I 42,5 PM-ES (CEM I/59 et CEM I/49) n'ont pas été affectés.

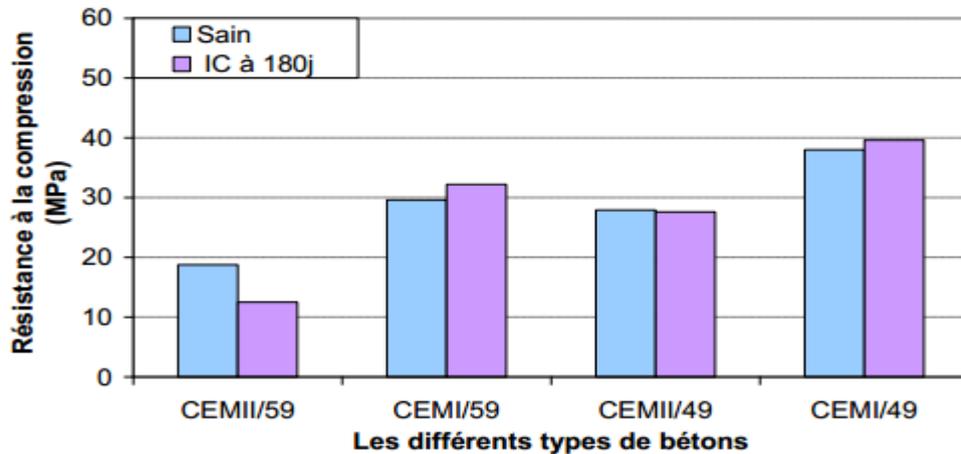


Figure 28 : Evolution des résistances à la compression des cylindres 11x22 cm

6- Conclusion du travail :

Il remarque que les bétons les moins résistants aux différentes expositions sulfatées sont ceux à base de ciment CEM II/A 42,5, c'est-à-dire le CEM II/59 et le CEM II/49. Les bétons CEM I/59 et CEM I/49, qui sont à base de ciment CEM I 42,5 PM-ES résistent aux sulfates et se comportent sans signe d'altération face aux différentes ambiances étudiées.

La plus faible résistance aux sulfates est celle du béton CEM II/59 comparée à celle du béton CEM II/49, Ils sont à base du même ciment mais c'est la différence du rapport E/C qui modifie leur comportement. Celui de rapport E/C = 0,59 se dégrade plus vite et de manière plus importante que celui de rapport E/C = 0,49, c'est probablement, l'effet de la porosité.

Les mortiers ayant subi des dégradations causées par l'attaque sulfatique externe sont ceux utilisant le CEM II/A 42,5 (i.e, CEM II/59 et CEM II/49) et exposés à l'immersion complète. [19]

4- Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton :

- Attaque sulfatique externe :

Résumé :

La détérioration des conduites d'assainissement en béton est un problème des plus importants dans l'évaluation de la durabilité des structures. L'objectif de notre travail, un protocole d'essai a été utilisé pour évaluer l'effet des milieux sulfatiques sur la propriété mécanique et analyser l'endommagement de la microstructure du béton. L'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes vieilles, démontre une diminution importante de la résistance. Ceci est dû aux divers et complexes phénomènes de détérioration du béton. Des observations microscopiques et des analyses par rayons X à l'aide du MEB-EDX, ont été réalisés sur des échantillons du béton vierge et celui vieillis pendant différents temps de vieillissement. Ces résultats ont confirmé par des spectres EDX, la formation d'ettringite qui est produit de la réaction chimique entre le sulfate (SO_4^{2-}) et l'aluminate tricalcique (C_3A), développant des microfissure sur la surface des pores de la pâte de ciment

1-Matériel et méthode :

- Eprouvettes :

il est préparé des éprouvettes selon le procédé de moulage de béton frais de type CR (Compactage Radial). Nous avons utilisé des moules cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (figure28).



Figure 29 : Eprouvette cubique de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$

2- Immersion dans une solution l'acide sulfurique (5000 ppm) et dans une solution de sulfate de sodium (5000 ppm)

Les éprouvettes préparées, sont plongées dans deux solutions : la première est une solution acide qui contient H₂SO₄ (5000ppm) (figure 29.A), et la deuxième solution est une solution sulfatique, qui contient le sulfate de sodium (Na₂SO₄) (5000ppm) (figure 29.B).

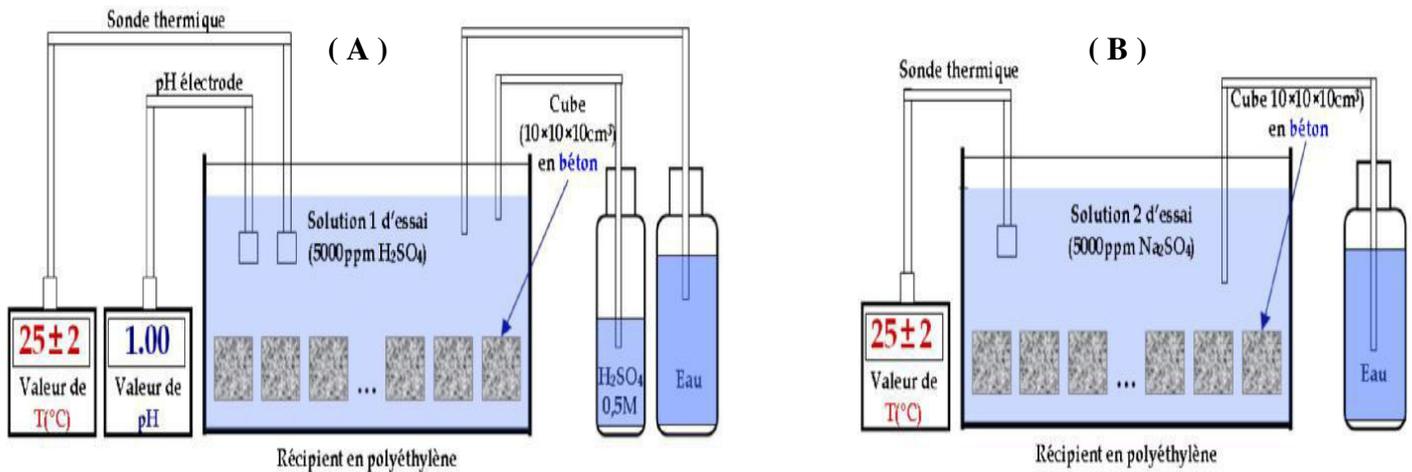


Figure 30: Protocole de test accéléré de la solution (a) d'H₂SO₄ 5000 ppm et (b) de Na₂SO₄ 5000 ppm [13]

3- Résultats et discussions

1. Résultats de résistance à la compression

La figure 30 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps des cubes (10× 10×10 cm³) en béton de type CR (Compactage Radial) à l'état vierge et dégradé pour deux blocs d'éprouvettes l'un dans la solution d'acide sulfurique (5000 ppm) et l'autre dans la solution de sulfate de sodium (5000 ppm) pendant 40 jours [4 – 8].

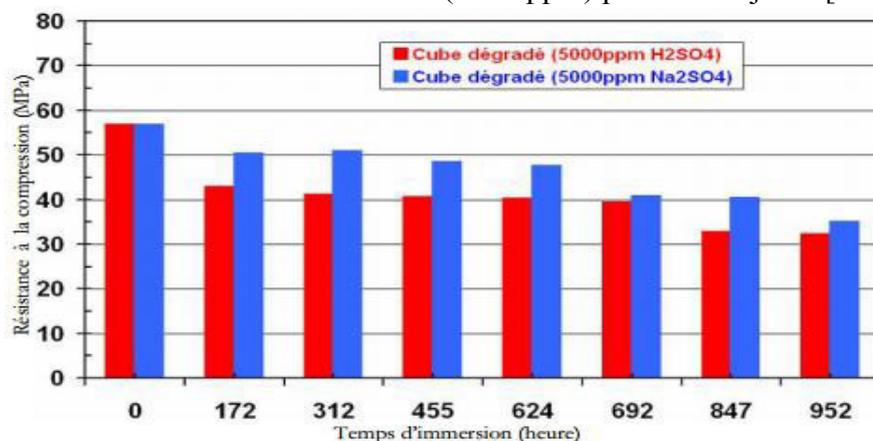


Figure 31 : Résistance à la compression en fonction du temps des cubes vieillis dans 5000ppm d'H₂SO₄ et dans 5000 ppm de Na₂SO₄

2. Résultats de MEB-EDX :

Les figures 31 A-B-C regroupent d'une part les micrographies électroniques et d'autre part les spectres de diffraction des rayons X sur des échantillons vieillis pendant 172h, 696h, 847h dans H_2SO_4 [A – C].

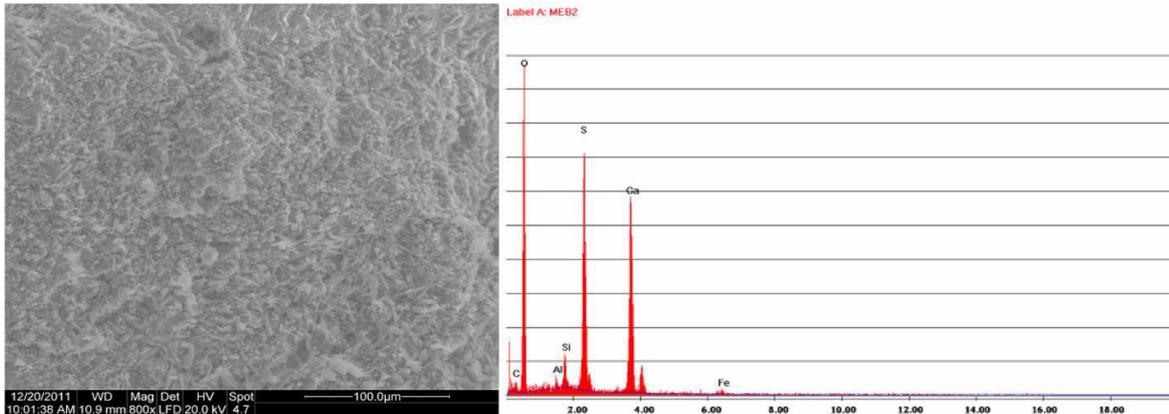


Figure 32 – (A) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 172heures dans 5000 ppm d' H_2SO_4

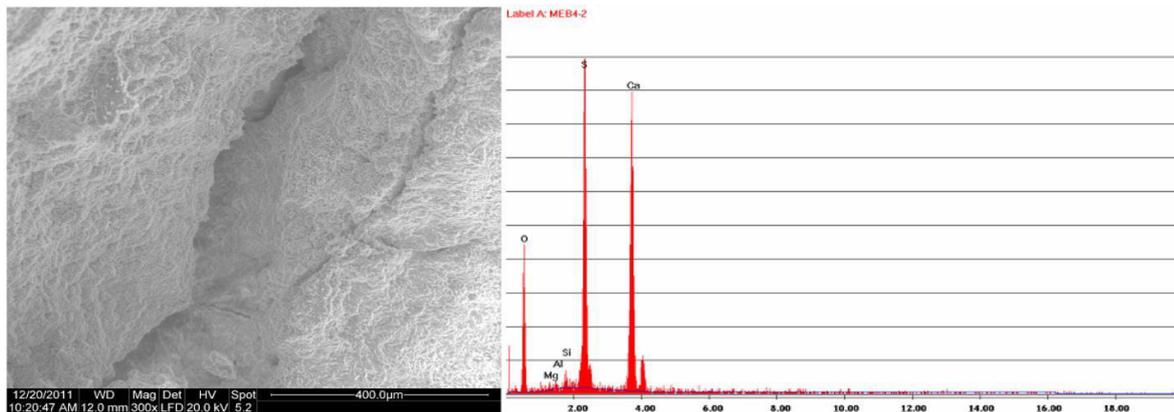


Figure 32 – (B) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 696heures dans 5000 ppm d' H_2SO_4

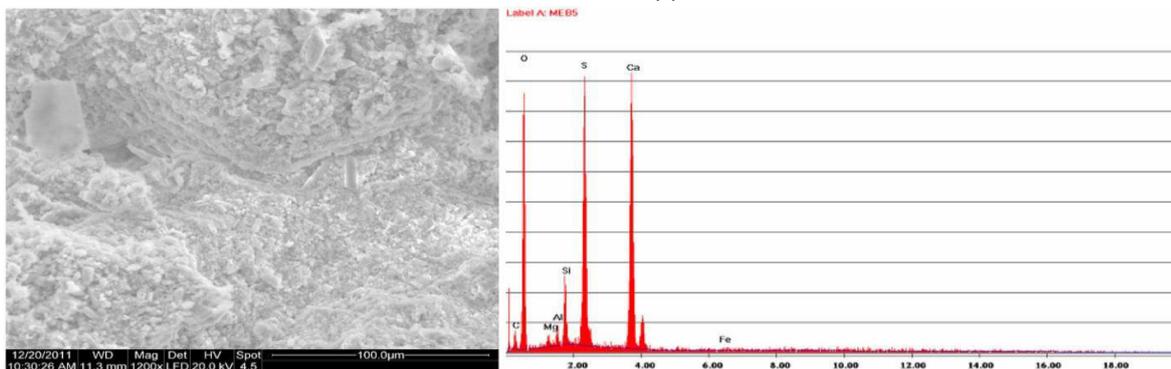


Figure 32 – (C) : Micrographie électronique et (b) analyses de diffraction par rayons X, d'une surface du béton CR, pour une éprouvette de béton dégradé pendant 847heures dans 5000 ppm d' H_2SO_4

3 .Résistance à la compression :

Il est effectué des essais de compression sur des cubes en béton dégradé après 172h, 624h, 696h et 847h d'immersion, un bloc des éprouvettes dans l' H_2SO_4 et l'autre bloc dans Na_2SO_4 .

D'après la figure 3, il remarque que la perte de résistance à la compression obtenue pour les éprouvettes immergées dans H_2SO_4 , est plus importante que celle de la résistance à la compression pour les éprouvettes immergées dans Na_2SO_4 . Tel que pour les éprouvettes dégradées dans Na_2SO_4 nous avons enregistré des réductions de 38% pendant 40 jours d'immersion, et pour les éprouvettes dégradées dans H_2SO_4 pendant la même durée, nous avons constaté une diminution progressive de la résistance à la compression avec une augmentation du temps de vieillissement. Cette diminution atteint 43% pendant 40 jours d'immersion. Donc, selon la figure 3 nous constatons que l'acide sulfurique attaque plus les éprouvettes en béton par rapport au sulfate de sodium.

La diminution de la résistance à la compression du béton, est due à la lixiviation du béton, ainsi que la dissolution des substances calcique de la pâte de ciment et les agrégats du béton, ce qui entraîne une augmentation de la porosité dans le béton, et une diminution de la cohésion entre les granulats

4- Conclusion du travail:

Dans ce travail, un vieillissement des éprouvettes de béton CR a été effectué dans deux solutions : une solution acide d' H_2SO_4 (5000ppm), et une solution sulfatique de Na_2SO_4 (5000ppm).

En premier lieu, nous avons effectué des essais de compression sur ces éprouvettes dégradés dans les deux solutions, après 172h, 696h et 847h d'immersion, dans le but de faire un suivi de l'évolution de la résistance à la compression au cours l'essai. Ces résultats nous ont permis de constater que :

-Le vieillissement par la solution d'acide sulfurique attaque plus les éprouvettes en béton par rapport à la solution de sulfate de sodium.

-En deuxième lieu, la microstructure du béton dégradé pendant 172h, 696h et 847h dans 5000ppm d' H_2SO_4 a été étudié. Les résultats microscopiques montrent que :

- Plus le temps de vieillissement par H_2SO_4 augmente plus le phénomène de lixiviation de béton est accéléré.

Selon ce travail, il est conclu, d'une part, que la perte de résistance à la compression des éprouvettes immergées dans l' H_2SO_4 est plus grande que celle pour les éprouvettes immergées dans le Na_2SO_4 . D'autre part, la détérioration causée par l'acide peut s'expliquer par deux mécanismes, à savoir la dissolution de la pâte de ciment et l'action expansive très négligeable, des produits de réaction. **[13]**

5- Effets de l'attaque de sulfate de magnésium sur des mortiers à base des ciments composés au calcaire :

Résumé :

Ce partie présente une étude de l'effet des fillers calcaires sur la résistance à l'attaque sulfatique des mortiers normalisés gâchés à maniabilité constante (E/C variable). Les ciments utilisés ont été fabriqués à l'échelle industrielle avec différents pourcentages d'ajout de calcaire. La qualité du broyage réalisée n'est pas constante, mais plutôt différente selon les ciments. Des éprouvettes 4x4x16 cm, munies de plots en acier inoxydable, ont été immergées durant huit mois dans une solution à 5% de sulfate de magnésium (à température ambiante). Jusqu'à 25% d'ajout calcaire, l'expansion mesurée après six mois d'exposition reste en deçà de la limite 0,05% définie par la norme ASTM C1012. Pour des taux plus élevés de calcaire, cette expansion dépasse largement la limite 0,1% de la même norme après seulement huit mois d'exposition.

1- Matériaux utilisés

1. Ciments

Il est utilisé dans cette étude sept ciments composés qui ont été fabriqués par cobroyage, à l'échelle de l'usine, d'un clinker, d'un calcaire et d'un gypse naturel. Le calcaire utilisé contient principalement 92% de $CaCO_3$ alors que le gypse renferme de l'ordre de 12% de calcaire. Pour la fabrication de chaque ciment, une masse de clinker a été substituée par le calcaire. Le dosage de ce calcaire dans le ciment est de 0% (ciment de référence), 5, 12, 20, 25, 30 et 35% de façon à avoir des ciments de catégorie CEMI, CEMII/A-L et CEMII/B-L. Pour la suite, les ciments seront désignés respectivement aux pourcentages d'ajout de fillers par C0, C5L, C12L, C20L, C25L, C30L et C35L.

2. Mortiers

Les mortiers ont été constitués, en masse, de 3 parties de sable normalisé et d'une partie de ciment. Le mortier témoin, contient le ciment de référence C0, est gâché, par l'eau distillée, à un rapport E/C=0,5. Ces rapports E/C varient peu avec le taux de calcaire dans le ciment, y compris pour les taux les plus élevés ($0,489 < E/C < 0,509$). Cette variabilité est plutôt liée à la finesse de broyage des ciments.

2- Programme expérimental :

Dans cette étude, les mesures ont été réalisées selon les recommandations de la norme NF P 18-837. Le coulage des mortiers, dans les moules 4x4x16 cm muni de plots en acier inoxydable, a été effectué en une seule couche avec 10 coups de compactage à l'appareil à choc. Six (06) éprouvettes ont été confectionnées pour chaque type de mortier. Après démoulage et conservation jusqu'à 28 jours d'âge dans l'eau de robinet, les éprouvettes de chaque mortier ont été sorties de l'eau et numérotées de 1 à 6. Leur longueur initiale $L_1(n)$, mesurée avec un rétractomètre ont été relevées. Les trois premières éprouvettes (n° 1 à 3) ont été, ensuite immergées dans un même volume d'une solution à 50 g/litre de sulfate de magnésium (pH = 7,8 à 23 °C) alors que les trois autres (n° 4 à 6) ont été conservées dans l'eau de robinet, comme série témoin. La solution de sulfate a été renouvelée tout les quinze (15) jours durant toute la période de conservation. A chaque échéance (t = 1 mois, 2 mois, 3 mois, 4 mois, 5 mois, 6 mois, 7 mois et 8 mois), les éprouvettes ont été sorties et essuyées par un chiffon humide et les mesures des longueurs $L_t(n)$ ont été effectuées. La moyenne arithmétique des déformations relatives (en %) propre aux deux modes de conservation, a été alors retenue. [17]

3-Résultats et discussions :

- Variation dimensionnelle :

Le suivi des variations dimensionnelles permet de tracer les courbes caractérisant l'expansion des éprouvettes témoins placées dans l'eau du robinet (figure 32-a) et des éprouvettes placées en présence de sulfate de magnésium (figure 32-b). Les expansions dans l'eau du robinet présentent tout d'abord des fluctuations, puis se stabilisent ensuite entre 0,01 et 0,02% pour l'ensemble des mortiers (figure 32-a). Dans la solution de sulfate, on distingue, pour tous les mortiers, une première phase latente où l'expansion augmente progressivement jusqu'au cinquième mois (figure 32-b). L'expansion est alors globalement équivalente et

CHAPITRE 3

n'excède pas 0,03%, quel que soit le taux de fillers calcaires et/ou la finesse de broyage de ciment. Cette phase correspond au temps nécessaire pour que les ions sulfates aient pu pénétrer par diffusion sur une profondeur critique du mortier. Ensuite, une deuxième phase est observée, marquée par une augmentation rapide de la déformation des éprouvettes, notamment celles à base des ciments C30L et C35L. Pour ces deux mortiers, l'expansion est devenue particulièrement importante et elle atteint après huit mois seulement environ 0,12%. La norme ASTM C1012 définit deux limites d'expansion de mortiers à base de ciments type V (ASTM C150), après immersion de six (06) et douze (12) mois dans une solution à 5% de sulfate (voir figure 32-b). Après six mois, l'expansion des mortiers à base de ciment contenant jusqu'à 25% de fillers calcaire reste en deçà de 0,05% (figure 32-b). Par contre, pour les taux plus élevés de calcaire (C30L et C35L),

la limite de 0,1% est largement dépassée après huit mois d'exposition seulement (figure 32-b).

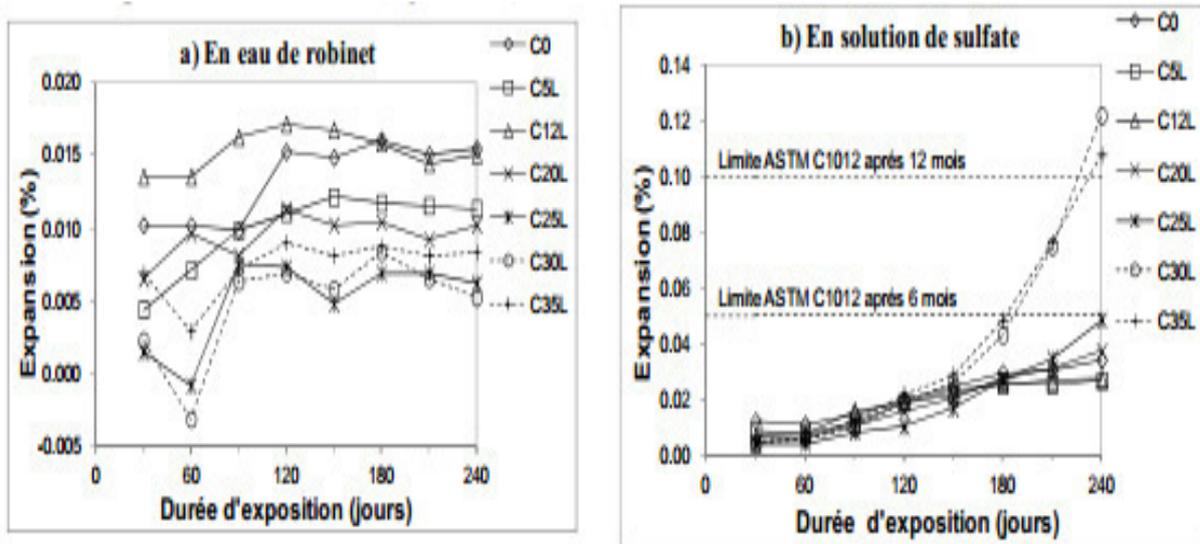


Figure 33 : Evolution de l'expansion en fonction du temps d'exposition [17]

Ces mesures montrent donc qu'un ciment contenant jusqu'à 25% de fillers calcaires peuvent être exposés à un environnement sulfatique, selon les spécifications de la norme ACI 318-11. Pour des taux allant jusqu'à 12%, les expansions sont d'ailleurs comparables, voire plus faibles, que pour un ciment sans ajout. Par contre, des teneurs plus élevées engendrent des expansions hors limites, en raison probablement de l'augmentation de la porosité induite par l'effet des fillers calcaires, qui favorise la diffusion des ions sulfate en profondeur et la formation d'une plus grande quantité d'hydrates expansifs.

4- Conclusion du travail :

Les résultats de cette étude montrent que l'expansion des mortiers avec jusqu'à 12% d'ajout calcaires sont comparable ou même améliorées relativement au ciment témoin (sans ajout calcaire). Les mortiers contenant jusqu'à 25% de fillers peuvent alors être exposés à un environnement sulfatique de la classe modérée indépendamment de la finesse de broyage. Pour les taux élevés de calcaire (C30L et C35L) la limite de 0,1% d'expansion a été largement dépassée après, seulement, huit mois d'exposition. Par conséquent l'emploi de ces types de ciments ne peut pas être autorisé dans les environnements exposés aux sulfates

Conclusion

Le béton fabriqué et mis en place selon les règles de l'art est un matériau normalement durable si ses qualités sont adaptées au milieu auquel il est exposé. Cependant, dans les milieux chimiquement agressifs, et compte tenu des diversités et des sévérités des attaques de la matrice cimentaire, il convient de retenir suffisamment en amont de l'exécution du chantier une approche méthodologique particulière si l'on veut garantir cette durabilité, approche que l'on peut résumer de la manière suivante :

- à partir des recommandations générales et spécifiques, réflexions sur la conception, la formulation, la fabrication, la mise en œuvre et l'entretien (maintenance) des bétons dans la structure ;
- recherche d'une formulation de béton basée sur une approche performantielle et qualifiée par les indicateurs de durabilité pertinents de l'attaque sulfatique
- validation de l'approche retenue par des essais, accélérés ou non, représentatifs de l'attaque sulfatique

- Diagnostic et réparation d'une structure en béton de ciment: une étude de cas d'un bâtiment résidentiel :

Résumé: ce travail fait partie d'une série d'articles décrivant le diagnostic et la réparation effectués sur la dégradation des différentes structures en béton armé. Cet article traite un bâtiment résidentiel qui a été réalisé depuis 25 ans.

Les principales causes de l'accélération de sa dégradation sont mises en évidence. Les étapes de la réparation et du renforcement sont également décrétés et discutées. L'attaque au sulfate était la principale cause de la détérioration. Bien que Les conséquences de cette attaque étaient très faibles, force de la liaison entre la pâte de ciment et les agrégats, des fissurations sévères de la couverture et du béton de l'armature en acier.

Introduction :

La région de Biskra qui se situ au sud-est algérien, a connu ces dernières années des problèmes de dégradation qui ont touché des constructions de différentes natures : équipement, habitation, ouvrages d'art.

Une fois la construction achevée, la maintenance est primordiale si l'on veut prolonger la durée de l'investissement a réalisé, la durabilité de la structure de concert renforcée, dépend principalement de sa résistance aux conditions corrosives de son environnement .Les questions posées lors du diagnostic d'un travail donné peuvent se résumer comme suit:

- Quelles sont les origines et l'étendue des troubles?
- Quelles sont leurs évolutions probables et leurs conséquences sur la sécurité du travail?
- Le travail est-il réparable et selon quelle méthode? Y a-t-il une protection appropriée?

Dans toute enquête, il apparaît donc nécessaire de procéder, d'abord à la collecte du maximum d'informations: âge, plans architecturaux, nature des matériaux utilisés (type de ciment, dosage ...) et la nature de l'environnement, une inspection visuelle détaillée permet de: reconnaître la nature des troubles, décrire leur localisation et le cas échéant, suivre leur évolution dans le temps, cet article propose à cet égard, un diagnostic d'une structure en béton armé, mis en service depuis 25 ans mettant en évidence. Les principales causes de dégradation et de la réparation.

1- Description des structures :

La structure décrite dans l'ouvrage situé Biskra (Algérie), est composée des 15 bâtiments avec un vide sanitaire et deux étages, les bâtiments sont construits comme suit:

- Portiques en béton armé avec fond de caisse creux d'épaisseur totale (20-5) cm.
- Fixation du sol :(9,80 x 19,90) m²
- Hauteur: 10,30 m
- Soles: type isolé
- Poteaux 25 x 25cm

Dans cette communication nous nous intéressons principalement à la dégradation du béton armé et des poteaux de fondation, ceci a été proportionné avec 359kg / m³ de ciment portland CPA 325est un type de ciment à haute teneur en silice (HSC), pour les semelles avec l'eau / taux de ciment (E / C), de l'ordre de 0,65, 750 kg / m³ de sable rond 0/5 et 1100 kg / m³, de gravier 5/25 provenant des carrières locales.

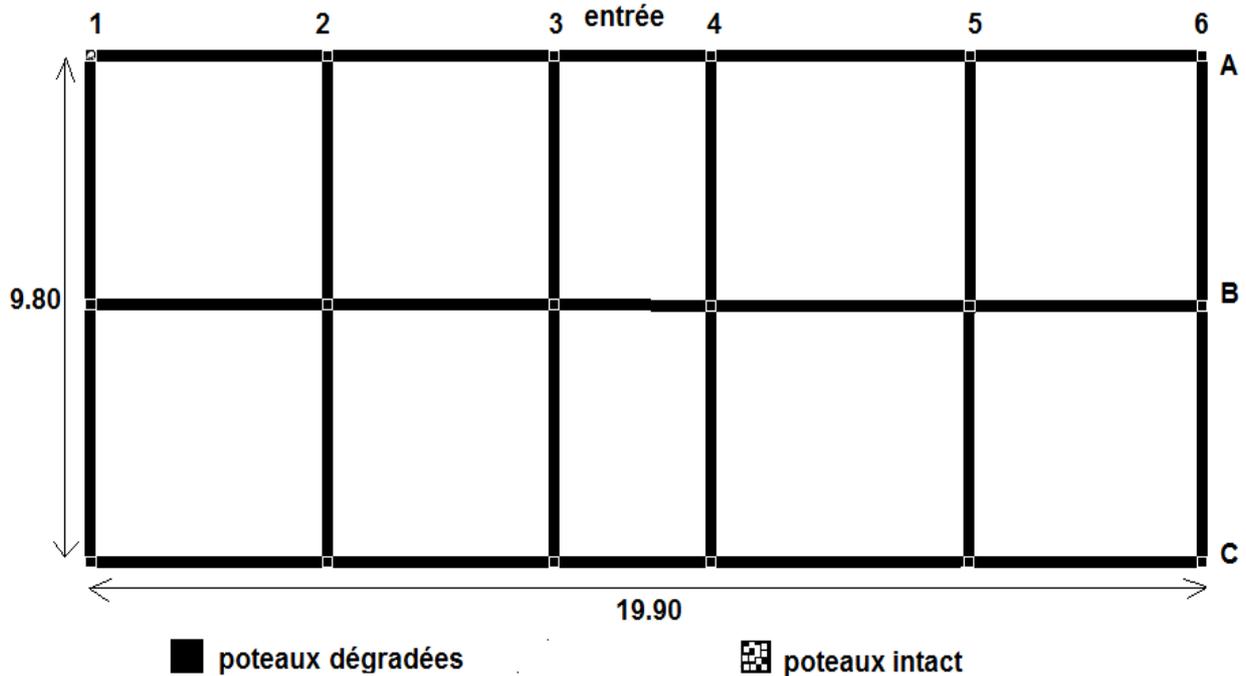


Figure34 : plan de vue du bâtiment [1]

2- Description des troubles observés sur le bâtiment:

Il faut savoir que les dégradations est encore en phase de développement. Les résultats de cette étude sont d'une plus grande importance dans le contexte de l'analyse de l'environnement, les troubles comprennent:

- Une dépression du bâtiment dans le sol de l'ordre de 15 cm à l'écrasement d'infrastructures, provoquant ainsi une remontée des trottoirs. (La cause n'est pas un mouvement du sol, mais est une agression chimique qui a attaqué le béton de la partie infrastructure)



Figure 35 : Abaissement dans le sol provoquant une élévation des trottoirs

CHAPITRE 3

- Une corrosion lourde a été développée sur l'armature d'ancrage suite à l'impact de l'eau dans les vides sanitaires.

- tous les poteaux de départ des bâtiments, à l'exception du A1 qui est dans un état acceptable, ont été caractérisés, comme le montre la figure 35 par:

-dégradation avancée des armatures.

-La détérioration et l'éclatement du béton.



Figure 36 : Béton détérioré par une attaque par les sulfates (90 logements Biskra) [10]

-les semelles de construction étaient presque intactes; Ceux-ci ont été réalisés avec un ciment HSC.

A- Les causes de dégradation :

-L'utilisation d'un béton poreux avec une ration E / C (0,6).

-La qualité du mélange de l'eau avec des sels.

-L'utilisation d'un ciment inadapté (CPA 325) dans de telles conditions environnementales (sols agressifs constamment saturés d'eau riche en sulfates).

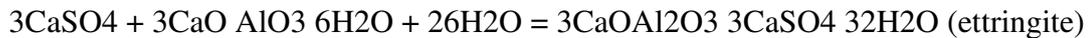
-le vide sanitaire était submergé d'eau (eau potable et eau usée). [1]

B- Gonflement dû aux sulfates:

Les sulfates dissous dans l'eau ont une grande capacité d'amortissement et pénètrent rapidement dans le béton, ils réagissent avec les aluminates de calcium hydratés et l'eau pour

CHAPITRE 3

former le sulfate d'aluminates tricalciques très volumineux, aussi appelé trisulfate ou ettringite.



Le sulfate soluble dans l'eau, peut également endommager la structure du béton sous la forme de cristaux de gypse, qui provoque un gonflement et une augmentation du volume d'environ 8 fois. La formation d'ettringite expansion générale excessive dans le béton. Cependant, les mécanismes de formation à l'ettringite sont controversés. La pression exercée par la formation de cristaux d'ettringite et la prise d'eau due à l'adsorption de l'eau en milieu alcalin par l'ettringite faiblement cristalline sont deux des nombreuses hypothèses soutenues par la plupart des chercheurs.

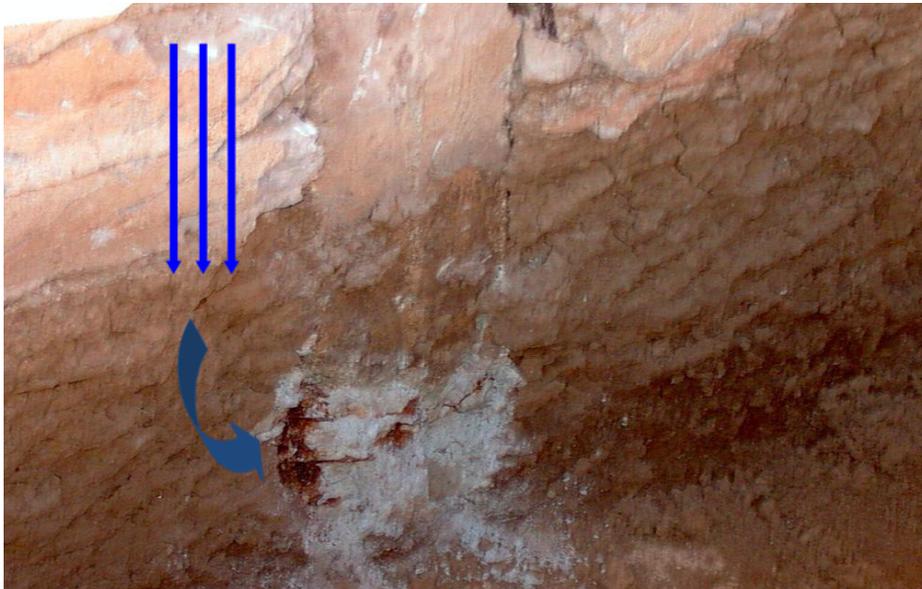


Figure 37 : L'expansion du volume ou le gonflement

C- Les Facteurs qui affectent l'attaque des sulfates:

Tous les ciments y compris les ASTM C 150 de type V résistants aux sulfates, sont vulnérables aux attaques de sulfate. Cependant, l'intensité et la vitesse d'attaque dépendent des facteurs suivants :

- type de ciment** : Parmi les produits d'hydratation, l'hydroxyde de calcium et les phases contenant de l'alumine sont plus vulnérables aux attaques par les ions sulfates;
- **type de sulfates et concentration**: le cation associé à SO_4^{2-} a un impact significatif sur la nature et l'ampleur de la détérioration du béton.

-**la qualité du béton** : est un facteur important, qui influence la durabilité du béton en général, et la résistance aux sulfates en particulier.

- **La condition d'exposition**: elle est connue que l'attaque de sulfate a lieu seulement en solution par conséquent, la partie d'une fondation la plus susceptible, d'être attaquée au sulfate et la partie qui se trouve à l'intérieur ou juste au-dessus de la nappe phréatique.

[1]

3- La Réparation:

Un diagnostic préalable du travail, constitue le préalable indispensable au choix d'une stratégie de réparation adéquate, qui permet une évaluation plus précise des coûts. Une enquête standard est composée d'une série de tests différents, suivis d'une phase d'analyse permettant le choix de la stratégie optimale de réparation. Deux alternatives ont été utilisées:

Un pelage du poteau d'amorce dans le cas d'une insuffisance de la résistance du béton, cela suppose que le béton grossier et les semelles ne montrent aucune détérioration (cas A1 poteaux).

Remplacement des poteaux d'amorçage par des massifs en béton armé, en cas de détérioration significative (tous les poteaux sauf A1).figure 38



ferrailage des massif



Massif en béton armé badigeonné en flintkot

FIGURE 38: remplacement des poteaux de départ par des massifs en béton armé.

-La Préparation de la surface :

- Retirer tout le béton lâche et modifié jusqu'à atteindre l'acier.
- Exposer le renfort à au moins 2 cm au-delà du couvercle.
- Retirer tous les produits de corrosion ? Des barres d'armature par sablage. Cette opération doit être parfaitement faite.
- Décapage de toutes les surfaces en béton.
- Les barres non exposées à sabler doivent être nettoyées avec des brosses métalliques.
- Couper les aciers fortement corrodés.
- Revêtir le renfort corrodé par un produit anticorrosion généralement sous forme de kit pré-dosé composé de résine et de durcisseur.
- Renforcer le renforcement affecté en ajoutant de nouvelles barres et en s'assurant du recouvrement total à la base de la base, si les barres existantes sont corrodées.

- Encadrement et remplissage des gaines:

L'ossature de préférence métallique, doit être munie d'entretoises destinées à assurer l'enrobage des armatures, avec une augmentation du diamètre et des poteaux de 60cm par rapport au diamètre initial (25cm).

Cette augmentation de la section, facilitera la coulée du béton et renforcera également la résistance des poteaux.

Le remplissage des gaines a été réalisé par un béton proportionné à 370kg / m³ de ciments de type C.R.S (sulfates réactifs au ciment) ayant un faible rapport E / C d'environ 0,45.

Il est bien connu, qu'un béton à faible rapport eau / ciment (E / C) est recommandé pour toute construction d'une perspective de durabilité, car tous les phénomènes de détérioration sont directement liés à la perméabilité du béton, qui est proportionnelle à l'eau au ciment rapport. **[1]**

Conclusion et recommandations :

Ce travail présente les résultats de diagnostic et de réparation réalisés, sur une structure en béton armé. L'un des objectifs de cette étude était de déterminer les causes de la dégradation des poteaux d'un bâtiment.

Les résultats des investigations convergent vers une attaque sulfatique du béton, et probablement une attaque chimique par les ions chlorure (Cl⁻), provoquant la corrosion des armatures et provoquant ainsi l'éclatement du béton.

Pour les renforts des poteaux d'entrée, la technique de revêtement a été utilisée avec une augmentation de la section de béton, il est nécessaire d'assurer un entretien de routine pour améliorer ou maintenir la sécurité des structures de chargement, Dans cette intervention, les causes des dommages sont éliminées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement

Cependant, la durabilité du béton peut être affectée non seulement par son environnement, mais aussi par les caractéristiques du matériau telles que la perméabilité, la teneur en ciment, la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.

De manière générale, les différents paramètres de la durabilité chimique sont :

- **les paramètres liés au matériau** : chimie et minéralogie du ciment (type de constituants, Ca(OH)_2 potentiel, C_3A , SO_3 ...), formulation et propriétés de transfert du béton (compacité) ;
- **les paramètres liés à l'environnement** : nature physique (solide, liquide, gaz) et chimique (acide, base, sel) de l'agent agressif, conditions climatiques générales et locales (immersion, semi-immersion, marnage, aérien, H.R., t° , cycles, mobilité) ;
- **les paramètres liés à la structure** : contraintes de fonctionnement (charges, fatigue), fissuration.

Les propriétés du béton ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage facteurs liés à la conception de l'ouvrage.

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents extérieurs.

Le béton est un système chimique fortement basique, évolutif, plus ou moins réactif au contact du milieu extérieur (atmosphère, eaux, solutions salines, acides). Le béton est un solide poreux, L'eau de l'extérieur pénètre à travers le système des pores et des capillaires, même dans un béton non fissuré, Cette eau de l'extérieur peut également apporter des agents agressifs tels que les ions sulfates.

Conclusion générale

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et les diverses conditions d'usage, d'exploitation et maintenance.

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories.

- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates ;
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif ;
- La formation des nouveaux produits (généralement expansifs).

Compte tenu des multiplicités des types d'agressions chimiques d'une part, et des similitudes des dégradations constatées d'autre part, il est souvent très difficile d'établir un diagnostic simple et univoque. Mais malgré ces similitudes, on peut distinguer les attaques chimiques d'après les manifestations et les caractéristiques de chaque attaque : la corrosion par exemple est induite soit par la carbonatation, soit par la pénétration des ions chlorure, l'attaque par les sulfates (par exemple l'eau de mer) engendrent une fissuration et un gonflement mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations qui la caractérisent. Donc la connaissance du milieu ou de l'environnement où se trouve l'ouvrage participe à connaître l'attaque.

Pour choisir le matériau qui convient, il faut connaître les conditions environnementales auxquelles il sera exposé de manière à pouvoir prévoir son comportement et à en tenir compte au stade de la conception.

A l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes à la durabilité font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. La perméabilité du béton doit presque toujours être prise en considération.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale des sulfates dans le béton (dans les constituants).

Conclusion générale

Généralement une réduction du E/C est presque toujours bénéfique car elle entraîne une diminution de porosité de la pâte de ciment hydraté et de perméabilité de la pâte et du béton, et donc empêcher les agents agressifs de se diffuser à l'intérieur du béton.

La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de mise en oeuvre, de fabrication et d'entretien. Pour les essais, on a parlé des essais accélérés parce que l'apparition des attaques chimiques prend plusieurs années.

Toutefois, pour les durées de vie prévues par les normes, le matériau est durable s'il est fabriqué et mis en place conformément aux règles de l'art.

Il est utile d'ajouter que le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression. De plus, on constate maintenant, ce qui n'était pas toujours le cas auparavant, que, dans des cas, un entretien régulier du béton est nécessaire.

Pour le béton, l'environnement externe (l'eau de pluie ou de ruissellement, le CO₂ de l'air) apparaît comme un milieu extrêmement corrosif. C'est un peu comme si nous devions vivre dans un environnement constitué d'acide sulfurique !

Dans le design de bâtiments, les concepteurs prévoient une grande marge de sécurité (c'est-à-dire qu'ils construisent en surabondance), mais une fois que la dégradation atteint une certaine limite critique, il faut procéder immédiatement à des travaux de réparation ou de réhabilitation pour rétablir le niveau de service prévu au départ.

Finalement, Il n'existe aucune ouvrage exemplaire au monde, qui s'adapte avec tous les environnements et les conditions climatiques, mais pour chaque site ses propres circonstances, pour construire on doit prendre en considération les spécificités du site et ses conditions climatiques, et c'est à l'ingénieur d'ajouter les matières qui vont avec cette nature, si comme, elles l'appartiennent, afin que ne sera pas un inconvénient qui la transforme négativement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographie

Références bibliographie :

- 1-Guettala A / Abibsi A: Diagnostic et réparation d'une structure en béton de ciment: une étude de cas d'un bâtiment résidentiel (- univ Biskra Algérie)
- 2-Patrick Guiraud -Les classes d'expositions– novembre 2011
- 3-Christophe Carde -pathologies l'ettringite- laboratoire de la matière- Mars/Avril 2007-
www.betons-lemagazine.fr
- 4-Techniques de l'ingénieur- Réaction sulfatique interne dans les structures en béton -
Mécanisme, pathologie et prévention date de la publication 10 mai 2009 Réf :C2254 V1
- 5-Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées- recommandations pour
la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne -laboratoire central des
ponts et chaussées LCPC aout 2007
- 6- Techniques de l'ingénieur- les ciments 01/10/2014- Réf. :**TBA1010**
- 7- <https://www.ensh.dz/files/Cours/.pdf> -cours matériaux de construction- eau de gâchage
et adjuvants
- 8- <https://www.cstc.be> - cstc.be -Ciments 'SR' ou 'HSR' : lesquels sont à haute résistance
aux sulfates ?
- 9-MARTA CHONISKA -effets de la température du chargement mécanique et de leurs
interactions sur la perméabilité du béton de structure Thèse de DOCTORAT L'École
Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 23 Novembre 2006
- 10- MOUALLIF LASFAR. LATRACH. CHERGUI BARBE. Influence du vieillissement
sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton (congrès français de
mécanique – bordeaux 30 aout 2013)
- 11-école française du béton - Les évolutions du contexte normatif et réglementaire des
béton .béton : des performances pour de nouvelles solutions constructives - LES
NORMES DES CONSTITUANTS DU BETON

Références bibliographie

12-Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques -Sous la direction de Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT - LA DURABILITÉ DES BÉTONS chapitre 12- chapitre 9 Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement

13- Marzouki A, Beddey A, Ben Ouezdou M- -Effets de l'attaque de sulfate de magnésium sur des mortiers à base des ciments composés au calcaire Mai 2015

14-Soumaya Amina BENSAFIR - Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs. -Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie civil 2009/2010 Université de Mascara

15-Mohamed Rissel Khalifa - effet de l'attaque externe sur la durabilité des béton autoplacants -thèse de cotutelle international pour obtenir docteur de l'université d'Orléans et de l'université de Constantine -20 juin 2009

16- Sayed Horkoss : Influence du SO_3 dans le clinker sur la durabilité du béton : Attaque Sulfatique -Présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE SAINT JOSEPH DE BEYROUTH Soutenu le 21 Juin 2011

ملخص:

الهدف من البحث المقدم هو دراسة هجوم الكبريتات الخارجية و الداخلية, و مختلف العوامل المتحكمة بها, وتأثيرها على ديمومة الخرسانة, ولهذا الغرض قمنا بدراسة نسبة الكبريتات و قيمها القصوى المحددة في الاسمنت , و في جميع مكونات الخرسانة(ماء الخلط الرمل و الحصى), ثم قمنا بتحديد خصائص كل خرسانة حسب الظروف البيئية المعرضة لها, علما ان هذه الخصائص تلعب دورا كبيرا في تحديد سرعة الهجوم من طرف الكبريتات, و من بين اهمها, نذكر تركيز ونوعية الاسمنت في الخرسانة, و نسبة الماء على الاسمنت.(E/C), حيث انه كلما زادت نسبة هذه الأخيرة زادت نفاذية الخرسانة, و بالتالي يكون اختراق و انتشار ايونات الكبريتات أسرع في الخرسانة.

وبهذا اقترحنا بعض الحلول التي من شأنها أن تزيد في الديمومة, و نذكر منها, التقليل في النسبة الماء على الاسمنت.(E/C), و زيادة مسافة التغليف للتسليح, و طلاء الخرسانة بمادة عازلة (فلينتكوت), و التي تمنع اختراق العوامل العدوانية بها, وبهذا نساهم في زيادة متانة الخرسانة, ومقاومتها لهجوم الكبريتات على مدى السنوات

الكلمات المفتاحية: هجوم الكبريتات , تدهور الخرسانة , ديمومة الخرسانة , ايترنجيت, نسبة الماء على الاسمنت.(E/C)

Résumé :

L'objectif de la recherche présentée est l'étude d'une attaque externe et internes par des sulfates sur le béton, et les facteurs limitant l'attaque, et leur l'effet sur la durabilité du béton. A cet effet, nous avons étudié la proportion des sulfates et des valeurs maximales spécifiées dans le ciment, et dans tous les composants en béton (eau de gâchage, sable et gravier ...etc.). Les caractéristiques de chaque béton sont déterminées en fonction des conditions environnementales auxquelles il est soumis, ces caractéristiques déterminent la vitesse de l'attaque par le soufre, notamment la concentration et la qualité du ciment dans le béton, le rapport l'eau sur le ciment (E/C), ce dernier augmente la perméabilité du béton, et donc la pénétration est la propagation des ions soufre plus rapidement dans le béton.

De cette manière, nous avons proposé quelques solutions, qui augmenteront la durabilité, telles que la réduction de l'eau sur le ciment (E/C), l'augmentation de l'enrobage, pour le renforcement et le revêtement du béton avec flintkote, qui empêche la pénétration des agents agressifs, ça augmente la résistance accrue du béton et la résistance aux attaques de sulfate au cours des années.

Mots-clés : Sulfate Attaque, Dégradation du béton, Durabilité du Béton, Ettringite, Rapport de l'eau sur le ciment (E/C).

Abstract:

The objective of the research presented is the study of an attack of foreign and internal sulphates, and various control of the factors, and their impact on the durability of the concrete. For this purpose we have studied the proportion of sulphates and maximum values specified in cement, and in all concrete components (mixture of sand, gravel and water). The characteristics of each concrete are determined according to the environmental conditions to which it is subjected, these characteristics determine the speed of the attack by the sulfur, in particular the concentration and the quality of the cement in the concrete, the percentage of water on the cement, the latter increases the permeability of the concrete, and therefore the penetration is the propagation of sulfur ions more rapidly in the concrete.

In this way, we have proposed some solutions, which will increase the durability, such as the reduction of water on the cement (W/C), the increase of the coating, for the reinforcement and the coating of the concrete with flintkote, which prevents the penetration of aggressive factors, it increases the increased resistance of the concrete and the resistance to sulphate attack over the years.

Keywords: Sulfate Attack, Concrete Durability, Degradation, Ettringite, Water to cement ratio (W / C).