



**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**



**Département de GENIE CIVIL**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**FILIERE : Génie Civil**

**SPECIALITE : Matériaux**

**THEME**

**État de connaissances sur la durabilité des  
matrices cimentaires conserver dans des  
milieux agressives**

**Dirigé par :**

**Présenté par :**

**Dr:Boualleg saida**

**Louafi mohamed**

**Dr:Ouzandja djamel**

**Aib abdeslem**

**Promotion: 2019/2020**

DEDICACE

A MES PARENTS

A MES AMIS

A TOUTE LA

FAMILLE

LOWAFI ET AIB

## **Remerciement**

Je tiens profondément à remercier tout d'abord

**"ALLAH"**

l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

Je remercie infiniment mon encadreur pour son  
attention, ces

conseils et cette précieuse aide.

«**Saida Boualleg**»

Pour avoir bien voulu encadré ce travail et pour  
tous ses conseils précieux.

Je remercie également tous les enseignants du  
département de

Génie civil ainsi que ceux du membre du jury et  
tous les

professeurs qui ont participé à mon cursus  
(scolaires et universitaire).

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à  
tous mes amis notamment mon binôme **Aib  
abdelssalam** pour leurs soutiens moral et matériel

## SOMMAIRE

Introduction générale	1
organisation du mémmoire	2
<b>Chapitre 01 : le ciment et les ajouts minéraux</b>	
Introduction	3
I.1.Définition du ciment	3
I.1.1.Procèdes et techniques de fabrication du ciment	3
I.1.2.Différents procédés	3
I.1.3.Etapes de fabrication du ciment	4
I.1.3.1.Extraction et préparation des matières premières	4
I.1.3.2. Séchage et broyage	4
I.1.3.3 .Cuisson	5
I.1.3.4.Broyage	5
I.1.4.Les constituants du ciment	6
I.1.4.1.Le clinker	6
I.1.4.2.Le sulfate de calcium (le gypse - $CaSO_4$ )	7
I.1.4.3.Les additifs	7
I.1.5.L'hydratation du ciment	8
I.1.5.1.Hydratation des silicates de calcium, $C_3S$ ET $C_2S$	8
I.1.5.2.Hydratation des aluminates de calcium, $C_3A$ ET $C_4AF$	9
I.1.5.3.Conclusion	10
I.1.6.Classification des ciments	10
I.1.6.1.Classification en fonction de leur composition : Norme NFP15-301	10
I.1.6.2.Classification en fonction de leur résistance	11
I.1.7. les ajouts minéraux	12
I.1.7.1.Classification des ajouts minéraux	13
I.1.7.2.Principaux ajouts minéraux inertes	13
I.1.7.3 .Les ajouts minéraux actifs	15
I.2.8 :L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	18
I.1.8.1:Intérêt du point de vue technique	18
I.1.8.2:Intérêt du point de vue économique	18
I.1.8.3:Intérêt du point de vue environnemental	18
I.1.9.L'utilisation des ajouts en Algérie	18
Rappel de laitier	20
I.2.Introduction	20
I.2.1.Les différents types de laitier	20
I.2.1.1.Laitier cristallisé	20
I.2.1.2 .Laitier vitrifié	20
I.2.2.Caractéristiques	21
I.2.2.1.Composition chimique	21
I.2.2.2.Critères chimiques	22
I.2.2.3.Influence du Ph	23
I.2.2.5.Autres facteurs influençant la réactivité du laitier granulé	24

I.2.3.Hydratation et activation du laitier granulé	24
I.2.3.1.Activation chimique	25
I.2.3.2.Activation alcaline (sodique ou calcique)	26
I.2.3.3.Activation sulfatique	26
I.2.3.4.Activation mécanique	27
I.2.3.4.Activation mécanique	27
I.2.3.5.Activation thermique	27
I.2.4.Principales caractéristiques des ciments au laitier	27
I.2.4.1.Masse volumique	27
I.2.4.2:Chaleur d'hydratation	28
I.2.4.3.Prise et durcissement des ciments au laitier	28
I.2.4.4.Hydratation des ciments au laitier	29
I.2.5.Emplois des ciments au laitier	29
I.2.6.CONCLUSION	31
<b>Chapitre II : Etat de connaissance sur la durabilité</b>	
II.1.Introduction	32
II.1.1.Notion sur la durabilité	32
II.2.Severite et interaction des agents agressifs	33
II.3.Criteres generaux de durabilite dans les milieux agressifs	34
II.3.1.La résistance	34
II.3.2. :L'eau de gâchage	35
II.3.3.La nature de ciment et le dosage	35
II.3.4:Le rapport E /C	35
II.4: Aspects affectant la durabilité	36
II.4.1.les mecanismes d'alteration des betons	36
II.4.1.1.La dissolution et l'érosion	36
II.4.1.2.Le gonflement et les Eclatements	37
II.5.différents type de les attaque chimique du béton	38
II.5.1.Action des acides	38
II.5.1.1.Action des sels	39
II.5.1.2.Action de l'acide carbonique	40
II.5.2.Attaque Sulfatique	40
II.5.2.1.Processus d'attaque par les sulfates externes	41
II.5.3.Attaque et action par l'eau de mer	43
II.5.4.Attaque par les ions chlorures	45
II.5.5.La carbonatation	45
II.5.5.1.Corrosion des armatures liées à la carbonatation	47
II.5.6.Les cycles de gel- dégel	48
II.5.7.La réaction alcali silice	49
II.6.La tenue des betons dans les milieux agressifs	49
II.6.1.La tenue des bétons dans les milieux sulfatique	49
II.7.Conclusion	51

## **Chapitre III: La durabilité dans le contexte normatif**

III.1.Introduction	53
III.2.La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1 et classes d'exposition	53
III .3.Les indicateurs de durabilité	54
III .3.1.Les indicateurs généraux de durabilité	54
III .4.Les essais de performances et caractérisation	55
III .5.Etapes de la démarche performantielle	55
III .6 .Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte algérien	56
III .7 .Facteurs influant la durabilité des bétons en Algérie	56
III .7.1.La qualité des matériaux	56
III .7.2 .Climat et environnement	56
Conclusions général	59
Références bibliographique	

## Liste des figures

### Chapitre I : le ciment et les ajouts minéraux

<b>Figure I.1:</b> Broyeur sécheur à boulets	5
<b>Figure I.2:</b> Schéma descriptif des différentes phases de cuisson	5
<b>Figure I.3:</b> Grains polycristallins d'un ciment anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchi sur section polie légèrement attaquée par HNO): 1=C <sub>3</sub> S; 3=C <sub>2</sub> S; 4=C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	6
<b>Figure I.4:</b> Microphotographie d' un clinker Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker	6
<b>Figure I.5 :</b> Le C-S-H (#) et cristaux de portlandite (x)	9
<b>Figure I.6 :</b> Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton	9
<b>Figure I.7 :</b> Grains de pouzzolane	16
<b>Figure I.8 :</b> Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau	22
<b>Figure I.9 :</b> Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF (1) avec 60 % de laitier et d'un CPA(2)	29
<b>Chapitre II : Etat de connaissance sur la durabilité</b>	
<b>Figure II-1:</b> Influence du rapport E/C sur la résistance finale à la compression	36
<b>Figure II-2:</b> Evolution de PH et de la quantité de calcium en solution lors de la lixiviation d'un ciment hydraté	37
<b>Figure II-3:</b> présente les différent attaque acide	39
<b>Figure II-4:</b> Des cas pathologiques rencontrés : l'influence des eaux agressifs en contact	41
<b>Figure II.5:</b> Epreuve de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates	41
<b>Figure II.6:</b> Analyse par le micrograh SEM :montre le type de cristaux aiguille du gypse formés sur la surface d'une éprouvette immergée dans une solution de sulfate d'ammonium ((NH <sub>4</sub> )SO <sub>4</sub> )	43
<b>Figure II.7:</b> Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée)	43
<b>Figure II.8:</b> agression du béton par activité des chlorures	44
<b>Figure II.9:</b> Détermination de la profondeur de carbonatation	45
<b>Figure II.10:</b> Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) <sub>2</sub>	46
<b>Figure II.11:</b> Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers	46
<b>Figure II.12:</b> Carbonatation du béton et conséquences sur la structure	47
<b>Figure II.13:</b> phénomène d'alcali réaction rencontré	48
<b>Figure II.14:</b> Influence du rapport E/C sur l'expansion du mortier immergé dans une solution sulfatique contenant 4.3% de sulfate de magnésium et 2.5% de sulfate de sodium	48
<b>Figure II.15:</b> La variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment immergée dans les solutions sulfatiques en fonction de la durée de cure	50

<b>Figure II.16:</b> La teneur en sulfate des pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatiques en fonction de la durée d'immersion	50
<b>Figure II.17 :</b> Influence de laitier sur l'expansion en fonction du temp	50

## Liste des Tableaux

### Chapitre 01 : le ciment et les ajouts minéraux

<b>Tableau I-1:</b> les quatre phases cristallines principales	7
<b>Tableau I-2:</b> Composition chimique du gypse	7
<b>Tableau I-3:</b> les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (moins de 5 %)	11
<b>Tableau I-4:</b> Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours	12
<b>Tableau I-5:</b> Composition chimique type de certaines cendres Volantes	15
<b>Tableau I-6:</b> Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	19
<b>Tableau I-7:</b> Composition chimique du laitier en %	21
<b>Tableau I-8 :</b> Inventaire des indices chimiques utilisés pour l'estimation des laitiers granulés de haut fourneau	23
<b>Tableau I-9 :</b> Classification des indices d'efficacité hydraulique en fonction des résultats des essais mécaniques	24
<b>Chapitre II : Etat de connaissance sur la durabilité</b>	
<b>Tableau II-1:</b> Les valeurs limites de l'agressivité de l'eau	35
<b>Tableau II-2:</b> Les résultats de Tumidajski [78] : profondeur de la frontière de sulfate en fonction de type de ciment et des pouzzolanes	49

## RESUME

Ce présent travail avait pour objectif de rassembler des données relevées dans la bibliographie concernant l'influence des ajouts sur la durabilité des caractéristiques du mortier et béton étudiées à l'état durci, présentation dans un contexte normatif, Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé

Une contribution à l'étude de la durabilité des matrices cimentaires dans les milieux agressifs.

Le travail recouvre, à la fois les aspects théoriques de la durabilité des ciments dont les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques .

L'introduction des ajouts minéraux améliore le comportement des matériaux à matrice cimentaire dans les environnements chimiquement agressif, ces derniers contribuent à la densification de la pâte de ciment durcie

**Mots clés :** mortier à l'état durci , ciment, ajouts minéraux, les milieux agressifs,durabilité

## ABSTRACT

The objective of this work was to gather data found in the bibliography concerning the influence of additions on the durability of the characteristics of mortar and concrete studied in the hardened state, presented in a normative context, in order to give the study a relevant and fairly generalized character.

A contribution to the study of the durability of cementitious matrices in aggressive environments.

The work covers both the theoretical aspects of the durability of cements including physical, chemical and mechanical characteristics .

The introduction of mineral additives improves the behavior of cementitious matrix materials in chemically aggressive environments, they contribute to the densification of the hardened cement paste.

**Key words:** mortar, Cement,mineral additions, aggressive environments, durability

## الملخص

كان الهدف من هذا العمل هو جمع البيانات المتعلقة بتأثير الإضافات على متانة خصائص الملاط والخرسانة المدروسة في الحالة الصلبة ، والعرض في سياق معياري ، لإعطاء الدراسة طابعاً ذات صلة ومعممة إلى حد ما مساهمة في دراسة متانة وديمومة المصفوفات الأسمنتية في البيئات العدوانية .  
يغطي العمل الجوانب النظرية لمتانة الأسمنت بما في ذلك الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية .  
يؤدي إدخال الإضافات المعدنية إلى تحسين سلوك مواد مصفوفة الأسمنت في البيئات العدوانية كيميائياً ، وهذا الأخير يساهم في تكثيف عجينة الأسمنت المتصلة

**الكلمات المفتاحية :** متانة خصائص الملاط، الاسمنت، الاضافات المعدنية، البيئات العدوانية ،ديمومة

# **Introduction**

## INTRODUCTION GENERALE

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours du temps.

Les altérations du béton sont variées. Elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures, parfois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : chaque étape depuis la formulation, jusqu'à sa mise en oeuvre, mais aussi l'agressivité de l'environnement peuvent être source de dégradation. La corrosion des armatures est la première cause de désordres affectant le domaine de bâtiment. La corrosion des armatures peut avoir comme origine la carbonatation du béton d'enrobage.

Ce processus de carbonatation se manifeste par une succession de mécanismes physicochimiques. La pénétration du  $\text{CO}_2$  dans le matériau et sa diffusion dans les pores, sa réaction avec les produits d'hydratation du ciment, principalement la portlandite qui joue un rôle de tampon sur le pH. Les différentes formes de carbonates formées (calcite, vaterite, aragonite) peuvent être considérés comme bénéfiques dans le sens où ils obturent partiellement les pores du béton et augmentent sa résistance à la diffusion d'agents agressifs. [1],

On parle communément de 5 principales causes physico-chimiques de dégradation :

La carbonatation, L'attaque par les chlorures, L'attaque par les sulfates, Les cycles gel-dégel, et L'alcali-réaction.

Les additions minérales sont largement utilisé comme substituant du ciment portland dans la confection du béton, afin d'améliorer les propriétés mécaniques, de durabilité et l'apport économique et écologique. Pour cela, leur utilisation s'avère plus bénéfique par rapport au ciment ordinaire, néanmoins le développement faible de ses résistances au jeune âge demeure une préoccupation importante des chercheurs. Pour surmonter ce problème, plusieurs travaux ont été entamés pour améliorer la résistance au jeune âge du ciment sans toutefois nuire à ses meilleures performances. L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux

cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

### **ORGANISATION DU MEMOIRE :**

Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

#### **- Le Premier Chapitre :le ciment et les ajouts minéraux**

Est consacré au ciment et aux ajouts minéraux. L'hydratation du ciment ainsi que la classification, les intérêts d'utilisation des ajouts dans le domaine de génie civil sont présentés dans ce chapitre.

Une synthèse bibliographique sur la valorisation des ajouts, présentée dans ce chapitre, nous présentons également un rappel sur le laitier de haut fourneau et son rôle en la durabilité et sur son résistance dans les milieux agressifs(résistance chimique)

#### **-Deuxième Chapitre : état de connaissances sur la durabilité**

Dans ce chapitre quelques aspects affectant la durabilité des matériaux tels que : la perméabilité, l'absorption, action des sulfates, action des acides ainsi que l'influence des ajouts minéraux sur les performances mécaniques, sur l'absorption, sur les attaques sulfates et acides des matériaux. Les additions minérales et notamment le laitier de haut fourneau sont largement utilisés comme substituant du ciment Portland dans la confection du béton, afin d'améliorer les propriétés mécaniques, de durabilité et l'apport économique et écologique. Pour cela, leur utilisation s'avère plus bénéfique par rapport au ciment ordinaire, néanmoins le développement faible de ses résistances au jeune âge demeure.

nous avons abordé l'étude de l'influence des ajouts minéraux sur la durabilité des matrices cimentaires.

#### **ChapitreIII :La Durabilite dans le contexte normatif**

Un contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes pour le béton, d'une part, et les normes pour les produits en béton, d'autre part, ainsi que les recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène, logique et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité.

#### **Conclusion Général.**

# **Chapitre 01 : le ciment et les ajouts minéraux**

### **Chapitre I : le ciment et les ajouts minéraux**

#### **Introduction :**

Le ciment est un liant hydraulique . Par liant , il est sous-entendu une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif hydraulique précise, d'une part, que ce liant durcit à froid par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air, mais également dans l'eau. Mélangé à certains sols ou granulats, et en présence d'eau, le ciment crée progressivement une cohésion croissante au sein du mélange qui se traduit par l'obtention de matériaux rigides et durs à performances mécaniques élevées. En fonction de la nature des constituants utilisés et de leurs proportions dans les mélanges réalisés, cette poudre «magique » qu'est le ciment permet la mise au point d'une grande variété de produits répondant ainsi aux besoins des concepteurs, des utilisateurs et des exploitants des ouvrages, ceci dans des domaines aussi divers que le bâtiment, les ouvrages d'art, le génie civil et les routes. À cet égard, on peut citer le béton, matériau de construction le plus utilisé dans le monde, mais aussi tous les matériaux traités aux liants hydrauliques employés dans la construction des infrastructures de transport [2]

#### **I.1.Définition du ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui mélangée avec l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. [2]

##### **I.1.1.Procèdes et techniques de fabrication du ciment**

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité

##### **I.1.2.Différents procédés [3]**

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide Dans **le procédé par voie sèche**, la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m.

C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en oeuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multicyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

Dans le procédé par voie semi-sèche, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.

Dans le procédé par voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presses est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication d cru.

Dans le procédé par voie humide, La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1er choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche.

### **I.1.3.Étapes de fabrication du ciment**

Ce procédé comporte les étapes de fabrication suivantes[4] :

#### **I.1.3.1.Extraction et préparation des matières premières**

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

#### **I.1.3.2. Séchage et broyage :**

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets comme le montre la Figure I.1ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace.

Il est possible de fabriquer un ciment portland selon trois voies: la voie humide, la voie sèche et semi-sèche. La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en granules par humidification (voie semi sèche).



Figure I.1: Broyeur sécheur à boulets

### I.1.3.3. Cuisson :

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). À la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

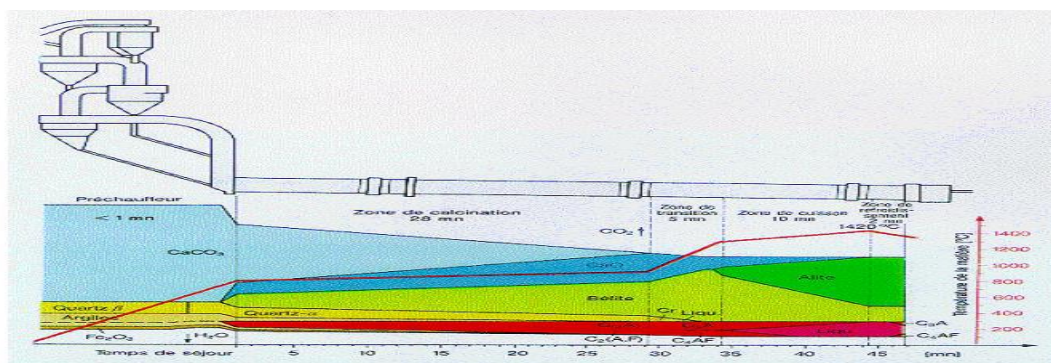


Figure I.2: Schéma descriptif des différentes phases de cuisson.

### I.1.3.4. Broyage :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare

les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est é l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.

Le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns comme l'indique la **Figure I.3**.



**Figure I.3: grains polycristallins d'un ciment anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO):1=C<sub>3</sub>S; 3=C<sub>2</sub>S; 4=C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF.**

Les ciments aux ajouts sont obtenus par des éléments minéraux comme 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 [4].

### **I.1.4.Les constituants du ciment**

#### **I.1.4.1.Le clinker:**

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux [4]. Dans la zone de clinkérisation du four, les éléments simples (CaO ,SiO<sub>2</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants (**Figure I.4**)

- silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) : 3CaO.SiO<sub>2</sub> (Alite)- silicate dicalcique (C<sub>2</sub>S) : 2CaO.SiO<sub>2</sub> (Belite)- aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) : 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- ferroaluminate calcique (C<sub>4</sub>AF): 4CaO .Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite)



**Figure I.4: microphotographie d'un clinker les compositions chimiques et minéralogiques du clinker [5].**

**Tableau I.1.les quatre phases cristallines principales [6]**

Nom	Formule chimique	Notation symbolique	Teneur %
-Silicate tricalcique 'Alite'	<b>3CAO.SIO<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>45.0&lt;60&lt;79.7</b>
-Silicate bicalcique 'Belite'	<b>2CAO.SIO<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>5.7&lt;25&lt;29.8</b>
auminatetricalcique 'Aluminate'	<b>3CAO.AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>1.1&lt;5&lt;14.9</b>
Alumino-ferrite Tétracalcique 'Ferrite ou aluminoferrite ou brownmillerite';	<b>4CAO.AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	<b>2.0&lt;10 &lt; 16.5</b>

**I.1.4.2.Le sulfate de calcium (le gypse - caso<sub>4</sub>)**

Le gypse dénommé aussi gypsite est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la formule CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O. Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre[7].

**Tableau I.2.Composition chimique du gypse.**

composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
%	<b>10.05</b>	<b>2.99</b>	<b>1.55</b>	<b>26.90</b>	<b>3.86</b>	<b>0.41</b>	<b>0.05</b>	<b>30.33</b>	<b>0.007</b>

Le sulfate de calcium (gypse CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) est un régulateur de prise ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication de 3 à 5% de la masse du ciment

**I.1.4.3.Les additifs .**

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels

certaines adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1% [7].

### **I.1.5.L'hydratation du ciment**

Le mélange du ciment avec de l'eau provoque la dissolution des anhydres du ciment jusqu'à la sursaturation des hydrates qui, moins solubles que les anhydres, précipitent. La pâte obtenue est appelée pâte de ciment durcie. Ce processus est bien le résultat d'un ensemble de réactions chimiques[4]

#### **I.1.5.1.HYDRATATION DES SILICATES DE CALCIUM, C<sub>3</sub>S ET C<sub>2</sub>S**

En solution, le C<sub>3</sub>S se dissout libérant des ions calcium et hydroxyde ainsi que du silicium. Une fois la limite de solubilité des C-S-H atteinte, ces derniers précipitent avec en moyenne un rapport calcium sur silicium (C/S) de 1,7 pour un ciment de Portland. Cette réaction, limitée par le silicium, ne consomme pas tous les ions calcium en solution. Une fois la limite de solubilité de l'hydroxyde de calcium atteinte, ce dernier précipite sous la forme de portlandite.

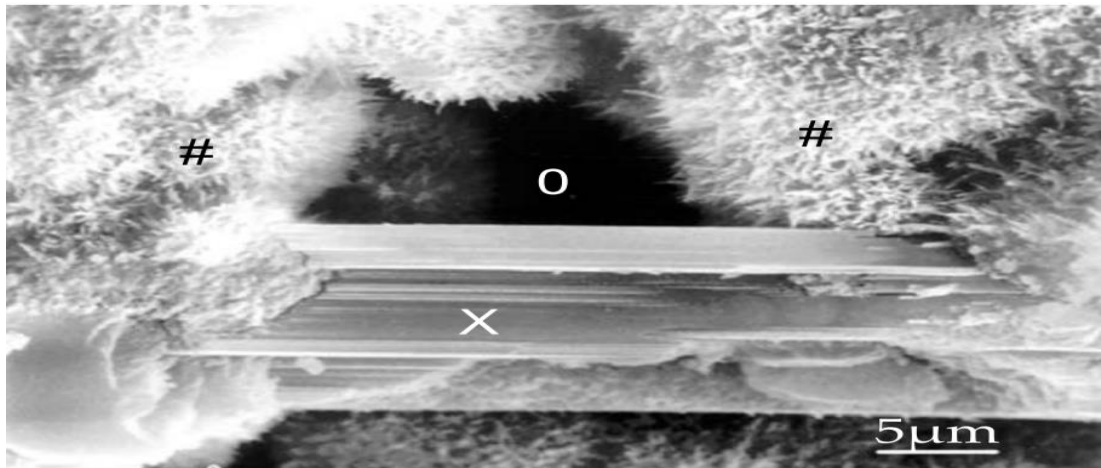
L'ensemble de ces réactions peut être résumé par l'équation bilan suivante (Eq 1-1) [8] :



Suivant le même processus, la dissolution du C<sub>2</sub>S conduit également à la précipitation de C-S-H et de portlandite . Apportant moins de calcium en solution, la précipitation de portlandite est plus faible en comparaison avec la même quantité de départ de C<sub>3</sub>S. L'équation bilan Eq 1-2 résume ce processus[8].



Les C-S-H (Figure I.5)représentent en moyenne 50 à 70 % d'une pâte de ciment durcie et la portlandite 25 à 27 % . [9].

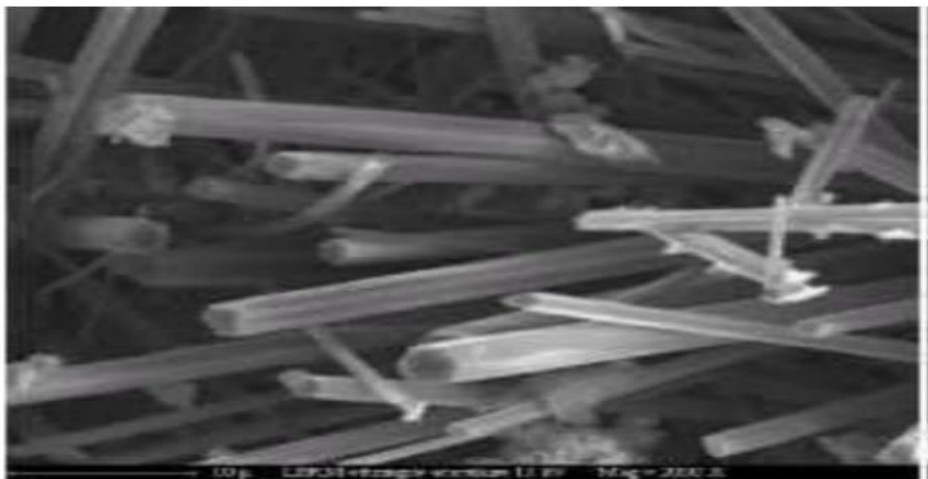


**Figure I.5. LeC-S-H (#) et cristaux de portlandite (x) [8]**

**I.1.5.2. Hydratation des aluminates de calcium, C<sub>3</sub>A ET C<sub>4</sub>AF**

Le C<sub>3</sub>A est l'anhydre du clinker le plus réactif. L'ajout de sulfate de calcium, généralement du gypse (sulfate de calcium dihydraté), au clinker favorise la précipitation de sulfoaluminates hydratés dont la limite de solubilité est plus basse que celles des phases aluminates de calcium hydratés. La phase la moins soluble est ainsi le trisulfoaluminate de calcium aussi appelé ettringite.

L'équation bilan Eq 1-3 résume ce processus.



**Figure I.6 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.**

Les ions aluminates non consommés par cette réaction interviennent dans la précipitation des aluminates de calcium hydratés et, en présence de carbonates, du monocarboaluminate de calcium. Si les aluminates de calcium anhydres sont en excès par rapport au gypse, les ions sulfate font défaut.

L'ettringite formée se dissout au profit du mono sulfoaluminate de calcium selon l'équation bilan Eq 1-4. :



Le gypse agit comme un régulateur de prise. Il semble que les aiguilles d'ettringite se forment autour des grains d'anhydre et ralentissent son hydratation. Une faible proportion de C<sub>3</sub>A améliore la résistance du matériau cimentaire à l'attaque sulfatique, en limitant le stock d'aluminium, élément nécessaire à la précipitation d'ettringite. Les vitesses de réaction des réactions décrites ci-dessus sont différentes, de la plus rapide à la plus lente : dissolution du C<sub>3</sub>A, du C<sub>3</sub>S, du C<sub>2</sub>S puis du C<sub>4</sub>AF

### **I.1.5.3. Conclusion**

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase [10]

### **I.1.6. Classification des ciments:**

#### **I.1.6.1. Classification en fonction de leur composition : norme NFP15-301:**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment pozzoulanique (CPZ),
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

## *Le ciment et les ajouts minéraux*

**Tableau I.3.les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (moins de 5 %). [11]**

	Ciment Portland D	Ciment Portland Composé		Ciment de haut Fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B
<b><i>Clinker (k)</i></b>	≥95%	≥80% ≤94%	≥65% ≤79%	≥35% ≤64%	≥20% ≤34%	≥5% ≤19%	≥65% ≤90%	≥45% ≤64%	≥40% ≤64%	≥20% ≤39%
<b><i>Laitier (s)</i></b>	*	6%≤	21%≤	≥36% ≤65%	≥66% ≤80%	≥81% ≤95%	*	*	≥18% ≤30%	≥31% ≤50%
<b><i>Pouzzolanes (Z)</i></b>	*	total	total	*	*	*	10%≤ total	36%≤ total	≥18% total	31%≤ total
<b><i>Cendres siliceuses (V)</i></b>	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35%	≤55%	≤30%	Cendres ≤50%
<b><i>Fumée de silice (D)</i></b>	*	(fumée De silice	(fumée De silice	*	*	*	(fumée de silice ≤10%)	(fumée de silice ≤10%)	*	*
<b><i>Cendres calciques (W)</i></b>	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
	*			*	*	*	*	*	*	*
<b><i>Calcaires(L)</i></b>	*			*	*	*	*	*	*	*
<b><i>Fillers (F)</i></b>	*		*	*	*	*	*	*	*	*

**I.1.6.2. Classification en fonction de leur résistance:**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous-classes sont associées aux 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Les classes doivent respecter les spécifications indiquées dans (Tableau I.4) ci dessous. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées[10]

**Tableau I.4. Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours [11]**

classe	Résistance à la compression (MPa)EN196-1				Retrait à 28 jours	Début Deprise	stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN196-3	EN196-3
	<u>2 jours</u>	<u>7 jours</u>	<u>mini.</u>	<u>maxi.</u>	<u>(um/m)</u>	<u>(min)</u>	<u>(min)</u>
<u>32.5</u>		(17.5)	≥32.5 (30)	< 52.5	<800	≥90	≤10
<u>32.5R</u>	/ (13.5) (12)		≥32.5 (30)	≤ 52.5	≤1000	≥90	≤10
<u>42.5</u>	/12.5 (10)		≥42.5 (30)	≤ 62.5	≤1000	≥60	≤10
<u>42.5R</u>	/20 (18)		≥42.5 (40)	≤ 62.5	≤1000	≥60	≤10
<u>52.5</u>	/20 (18)		≥52.5 (50)			≥60	≤10
<u>52.5R</u>	/30 (28)		≥52.5 (50)			≥60	≤10

**I.1.7. les ajouts minéraux :**

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

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante : Pouzzolane + chaux + eau  $\square\square$  Silicate de calcium hydraté Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général Moins bien définies que celle du ciment Portland

### **I.1.7.1. Classification des ajouts minéraux**

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux:

#### **I.1.7.2. Principaux ajouts minéraux inertes**

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305), En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de

ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement Sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière. [12]

- **Fillers calcaires**

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches ( calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes .....). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui' ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles: [12]

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_3A$  et à la formation de carboaluminates: germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

- **La poussière**

La poussière est une matière à particules fines , récupérée à la sortie du four , lors de son passage avec la fumée , sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $cm^2/g$ . le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. [12]

### I.1.7.3. Les ajouts minéraux actifs

- **Les cendres volantes**

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

Cependant, comme on peut le voir dans le Tableau I.5 la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires. Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico- alumineuses ( cendre de houille )
- Les cendres sulfocalciques( cendre de lignite )

**Tableau I.5. Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin [13]**

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

La plupart des particules ont un diamètre compris entre  $1\mu\text{m}$  et  $100\mu\text{m}$ , leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et  $600\text{ m}^2/\text{kg}$ . La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium. D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces.

- **La pouzzolane**

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

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



**Figure I.7. Grains de pouzzolane.**

**-A) pouzzolane naturelle**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être

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

### **-B) Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques .

Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler .

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

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée , opale , terre de diatomées , zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes :

- **Le laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau est un résidu de l'industrie sidérurgique, c'est un liant hydraulique fabriqué à partir du laitier de fonte qui présente des caractéristiques hydrauliques latentes. Il est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux. Le laitier broyé s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou Ca(OH)<sub>2</sub> [14].

Le laitier sera étudié d'une manière plus approfondie dans le Partie 02-

- **La fumée de silice**

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsilice », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice.

En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez

dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable [15]

### **I.2.8.L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil: [16]**

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

#### **I.1.8.1.Intérêt du point de vue technique:**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration.

#### **I.1.8.2.Intérêt du point de vue économique:**

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland .

#### **I.1.8.3.Intérêt du point de vue environnemental:**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO<sub>2</sub>. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO<sub>2</sub>

### **I.1.9:L'utilisation des ajouts en Algérie :**

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu

## *Le ciment et les ajouts minéraux*

coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf. Le **Tableau I-6**(donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes) [17] .

**Tableau I.6: Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [17]**

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djarEssaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	RaissHamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	<u>Saida</u>	

### **Rappel de laitier**

#### **I.2.INTRODUCTION**

Le laitier de haut fourneau, coproduit de l'élaboration de la fonte, est constitué par la partie non ferreuse du minerai (la gangue), la cendre du coke et le fondant.

Dès la construction des premiers hauts fourneaux se posa la question de l'évacuation et de l'utilisation du laitier. On l'employa tout naturellement, après refroidissement spontané et concassage pour la confection de remblais et des voies d'accès aux usines. Le matériau ainsi obtenu est un produit cristallisé présentant de bonnes propriétés mécaniques qui l'orientèrent vers la confection des voies de communication (route, ballast de chemin de fer) et qui reçut même quelques applications dans le bâtiment.

Pour accélérer le refroidissement, le laitier en fusion fût déversé dans des fosses contenant de grandes quantités d'eau. On obtenait ainsi un produit fragmenté (d'où le nom de laitier « granulé »), ce qui facilitait grandement la reprise et évitait l'onéreuse opération de concassage.

La propriété des mélanges de laitier granulé moulu et de chaux de faire prise en présence d'eau fut découverte par Langen en 1862 et est à l'origine de son emploi dans les ciments et bétons. Le premier brevet précisant les conditions de préparation des ciments de laitier fut déposé par Passow en 1902. Dès cette époque, on s'aperçut que les propriétés hydrauliques étaient en relation avec la structure vitreuse qui caractérise le laitier granulé et qui est due à l'effet de trempe [18] .

#### **I.2.1.Les différents types de laitier**

##### **I.2.1.1.Laitier cristallisé :**

Le laitier liquide à 1300 C°/1500C° est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé .ses constituant sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium[19]

##### **I.2.1.2.Laitier vitrifié :**

Brusquement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, il existe deux types de laitier vitrifié[20] :

- **le laitier vitrifié granulé:**

Pour lequel le refroidissement se fait selon deux formes : le laitier liquide est versé dans de grands bassins d'eau où il se transforme en sable grossiers de granulométrie 0/5 qui est le laitier granulé, cette méthode de granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation pour faciliter la manutention du laitier. Il peut être trempé par des jets d'eau alors qu'il s'écoule à la sortie du haut fourneau, c'est le procédé utilisé pour la granulation du laitier d'EL HADJAR

- **le laitier vitrifié bouleté**

soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules



**Figure I.8. Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau**

### **I.2.2.Caractéristiques**

#### **I.2.2.1.Composition chimique**

Le laitier de haut fourneau est avant tout un sous produit du processus d'élaboration de la fonte. Sa composition chimique est ajustée de façon à lui permettre :

- d’avoir une bonne fluidité à la température d’élaboration de la fonte.
- d’éliminer une bonne partie des éléments nuisibles à la marche du haut fourneau et à la qualité de la fonte.

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50 (%), la silice (SiO<sub>2</sub>) de 28 à 38 (%), l’alumine(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) de 8 à 24 (%), le soufre (S) de 1 à 2.5 (%).Tableau I-7 récapitule les compositions chimiques du laitier dans quelques pays producteurs de fonte [21, 22 et 23].

**Tableau I.7: Composition chimique du laitier en % [21, 22 et 23].**

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO <sub>2</sub>	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO <sub>3</sub> , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO <sub>2</sub>	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K <sub>2</sub> O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
<b>Total</b>	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

### **I.2.2.2.Critères chimiques**

On parle souvent de critères de réactivité hydraulique alors que l'appréciation est essentiellement faite à partir de critères chimiques et plus exactement d'indices de basicité. L'analyse chimique tente de relier les caractéristiques des produits anhydres à leur réactivité et par conséquent aux résistances mécaniques des ciments au laitier.

Les indices chimiques sont calculés à partir de la composition chimique du laitier et sont supposés être reliés à son activité hydraulique. De nombreux indices (Tableau I.8 ) [21,24 et 25] ont été proposés par plusieurs auteurs, mais ils sont souvent

contradictoires les uns avec les autres et pas toujours pertinents, notamment par rapport à l'objectif visé qui est de prédire la réactivité du laitier à partir de sa seule composition chimique. DEMOULIAN et al [7] et [26] ont passé en revue et testé de nombreux indices en cherchant ceux qui donnaient les meilleures corrélations avec les résistances mécaniques. Ils ont constaté que les indices I8, I9, I6, I10 et I11, ont dans un ordre décroissant, les plus forts coefficients (r) de corrélation: r varie de 0.91 à 0.85 pour les résistances à 2 jours, de 0.82 à 0.78 pour celles à 7 jours et de 0.84 à 0.76 pour 28 jours. Ce sont ces indices qui ont été retenus pour caractériser le laitier d'EL HADJAR

**Tableau I.8 : Inventaire des indices chimiques utilisés pour l'estimation des laitiers granulés de haut fourneau [21,24 et 25]**

Formules	
$I_1 = \frac{CaO}{SiO_2}, I_2 = \frac{CaO}{Al_2O_3}, I_3 = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ $I_4 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}, I_5 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ $I_6 = \frac{CaO + 0.56Al_2O_3 + 1.4MgO}{SiO_2}$ $I_7 = \frac{CaO + 1.4Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$ $I_8 = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2}$	$I_9 = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0.5MgO - 2SiO_2$ $I_{10} = \frac{CaO + MgO + 0.66Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$ $I_{11} = \frac{CaO + Al_2O_3 + 0.5MgO + CaS}{SiO_2 + MnO}$ $I_{12} = \frac{CaO + 0.33Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + 0.66Al_2O_3}$ $I_{13} = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + 10}$

### **1.2.2.3. Influence du pH**

Le pH est l'un des facteurs agissant sur les solubilités des principaux éléments (Ca, Si Al et Mg) du laitier qui participent à la formation des hydrates. La nature de ces derniers en dépend, car elle est fonction du rapport Ca / Si . Un fort pH augmente les concentrations des ions aluminium et silicium et diminue celles des ions calcium et magnésium dans la solution interstitielle et active l'hydratation du laitier par la solubilisation de la mince enveloppe imperméable qui couvre la surface des grains de laitier [27]. Cependant le pH doit être supérieur à 11.5 pour activer l'hydratation du

laitier. Pour un  $\text{pH} < 11.5$  le laitier ne se dissout pas [28 – 29] et dans le cas d'une activation au clinker l'hydratation du silicate tricalcique est fortement ralentie [30].

### **I.2.2.4. Indice d'efficacité hydraulique h :**

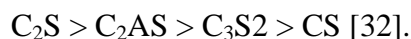
Le pouvoir hydraulique est estimé conventionnellement à l'aide de l'indice d'efficacité hydraulique h (norme française NF P 18 – 506 [31]). Cet indice est défini par le rapport, à un âge donné, de la résistance à la compression d'un mortier dont la partie liante est composée en masse de 50 % de laitier et de 50 % de ciment portland témoin à celle obtenue au même âge sur mortier témoin à partir du même ciment. Le ciment témoin doit être un CPA 55 de teneur en C3A ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) comprise entre 6 et 10 % et de teneur maximale en  $\text{SO}_3$  de 3 %. En fonction de la valeur numérique de h, on classe le laitier en trois catégories ( $h_1$  à  $h_3$ ) de réactivité croissante (Tableau I.9).

**Tableau I.9 : Classification des indices d'efficacité hydraulique en fonction des résultats des essais mécaniques [31]**

<b>Indice</b>	<b>7 jours</b>	<b>28 jours</b>
<b><math>h_1</math></b>	-	$> 0.60$
<b><math>h_2</math></b>	$> 0.60$	$> 0.75$
<b><math>h_3</math></b>	$> 0.70$	$> 0.85$

### **I.2.2.5. Autres facteurs influençant la réactivité du laitier granulé**

L'activité hydraulique du laitier croit dans le même sens que celui des liaisons ioniques, mais jusqu'à une certaine limite qui correspond à la cristallisation des silicates. La réactivité des anhydres décroît dans l'ordre suivant :



La composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés, qui fait une distinction entre les structures en chaîne et les structures en doubles ou simples tétraèdres permettrait une appréciation de leur activité [33]. En effet, le silicium forme des tétraèdres plus ou moins polymérisés, mais la longueur des éléments de la structure n'est pas uniforme comme dans le cas d'une structure cristalline. La structure vitreuse dépend ainsi de la ramification de certains cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$ ,  $\text{K}^{1+}$  et en

particulier  $Al^{3+}$  et  $Mg^{2+}$  qui agissent pour partie comme formateurs et pour partie comme modificateurs de la structure

### **I.2.3. Hydratation et activation du laitier granulé :**

Contrairement au ciment, le laitier granulé ne développe pas de propriétés liantes dans l'eau à température ambiante, car la dissolution du laitier, même si elle est possible du point de vue thermodynamique, a une cinétique tellement lente que le système peut être considéré comme figé [34]. De ce fait peu d'études ont été consacrées à l'hydratation du laitier seul dans l'eau. On peut citer les travaux de DRON et BRIVOT [35], KONDO [36] et REGOURD et al. [37].

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution d'où résulte une précipitation des hydrates formés [21]. Le laitier n'est soluble que dans une solution alcaline et a donc besoin pour faire prise d'un agent appelé ACTIVANT [34].

La nécessité d'un agent basique ou d'un activant pour déclencher la prise résulte selon DRON [38] du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes ou la chaux intervient:

- Le premier est le passage en solution dans l'eau interstitielle des éléments aluminium, silicium et calcium. Cette solubilisation intervient par les sites aluminium et l'attaque a lieu par les ions  $OH^-$  de la solution. Elle devient notable à partir de  $pH = 12$  ( $pH > 11.5$ ).
- Le second est la cristallisation à partir de la phase aqueuse, de composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que ne l'est le laitier. Un apport en calcium est donc nécessaire .

L'activant a un double rôle, il doit:

- Répondre à une condition de pH: apport de chaux, suffisant pour saturer la solution aqueuse et atteindre le pH correspondant, de 12 à 13 en général [39].
- Contribuer à la formation d'hydrates: l'activant ne se limite pas à un seul rôle catalytique d'alcalinisation de l'eau interstitielle mais participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

Les procédés d'activation sont pluriels : chimique, mécanique et thermique. Dans tous les cas le produit d'hydratation est le même : c'est le CSH

#### **I.2.3.1. Activation chimique**

L'activation chimique du laitier, c'est le maintien du laitier dans un milieu à pH suffisamment élevé par addition de substances permettant de répondre à cette condition en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la solution interstitielle en chaux pour atteindre un pH de 12 à 13. Les trois principaux modes d'activation sont selon [21] a - Activation alcaline (sodique ou calcique), b - Activation sulfatique c- Activation sulfato-calcique

### **I.2.3.2.Activation Alcaline (sodique ou calcique) :**

Lors d'une activation alcaline, il s'agit de créer une solution fortement basique (pH >12.6), afin de permettre le passage en solution des composants de laitier qui vont pouvoir par la suite former des produits d'hydratation [38]. D'après CHAPELLE [39], dans le cas d'une activation par la soude, l'activant n'est en fait qu'un catalyseur qui ne réagit pas avec les constituants du laitier. Il se forme dans ce cas trois hydrates : les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés (C4AH13) et la géhlénite hydratée (C2ASH8) [21 et 25]. Dans le cas d'une activation du laitier par la chaux, il existe d'après DRON et CHAPELLE [36 et 37] une phase initiale où le pH de la solution est alors celui d'une solution saturée en chaux (environ 12.6). C'est largement suffisant pour solubiliser la silice et l'alumine du laitier, favorisant ainsi la formation des CSH qui précipitent en premier. Au fur et à mesure que la silice est consommée, la concentration de l'alumine dans la solution augmente jusqu'à sa cristallisation. On retrouve finalement comme hydrates les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés (C4AH13) et la portlandite.

### **I.2.3.3.Activation sulfatique :**

L'activation sulfatique s'écarte davantage de l'action strictement catalytique. Il s'agit d'un véritable réactif puisque le sulfate de calcium se combine avec les éléments du laitier solubilisés. Dans ce cas, les produits d'hydratation sont essentiellement les silicates de calcium hydratés (CSH), l'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$ , et l'ettringite ( $3.CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32.H_2O$ ) [40] et [41]. Pour que cette activation puisse avoir lieu, il est nécessaire de se retrouver à un pH de 11 – 11.5. Il y a alors formation d'ettringite primaire, et il faut éviter de se retrouver à un pH trop élevé sinon la réaction de cristallisation ne peut plus se produire suivant un processus normal : la cristallisation est trop rapide et il y a risque de formation d'ettringite secondaire. REGOURD [42] précise que cette activation est lente et qu'elle peut être obtenue avec les sulfates suivants : anhydrite, hemihydrate, gypse et phosphogypse.

### **I.2.3.4. Activation mécanique**

La finesse de broyage du laitier intervient dans son couplage avec le clinker et joue un rôle très important dans l'évolution des résistances mécaniques, aussi bien à court terme qu'à long terme. Les ciments au laitier peuvent être activés mécano – chimiquement dans un broyeur à jet qui détruit le squelette du réseau silicaté et active les ions oxygènes [43].

### **I.2.3.5. Activation Thermique**

L'observation au MEB (microscope électronique à balayage) a mis en évidence des différences significatives des structures hydratées des ciments peu ou pas réactifs à 20 °C, lorsque ces mêmes ciments subissent un traitement thermique à 80 °C [44]. Il est ainsi possible de comprendre qu'un laitier peu réactif à la température ordinaire donne de bonnes résistances lorsqu'il est traité par la chaleur, car les hydrates formés ont un aspect normal alors que ce même traitement à la température appliqué à des laitiers très actifs à la température ordinaire engendre une structure d'hydrates peu favorable à la cohésion du mortier avec des amas de mono - sulfo – aluminates [44- 45]. L'étuvage exerce un effet favorable sur la compacité des ciments au laitier ce qui leur confère une grande résistance au gel et rend possible l'emploi des adjuvants plastifiants et entraîneurs d'air [46]. Les ciments à haute teneur en laitier se caractérisent par des CSH de structure dense et homogène avec absence d'ettringite. Les sulfates sont piégés dans les gels de CSH sous forme de solution solide, lorsque ces ciments subissent un étuvage [47].

## **I.2.4. Principales caractéristiques des ciments au laitier**

### **I.2.4.1. Masse volumique**

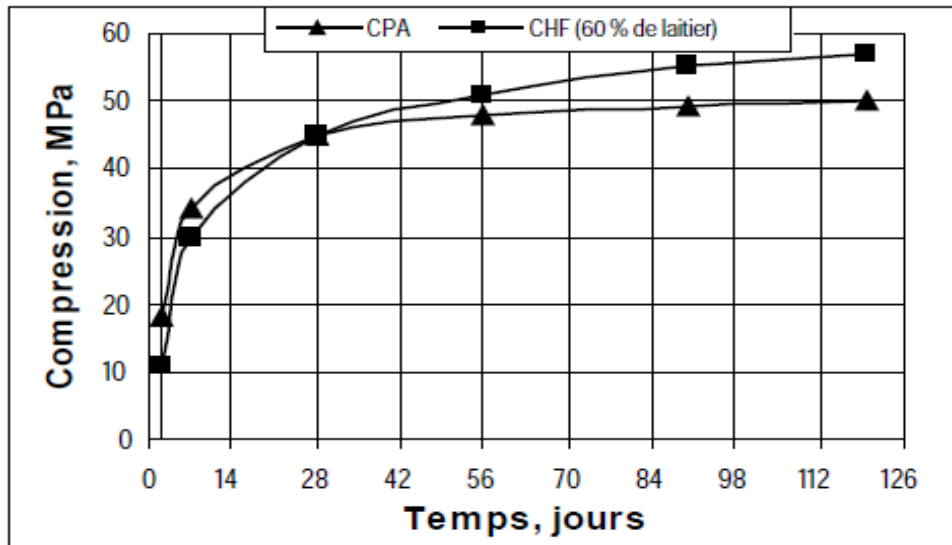
La masse volumique réelle d'un ciment dépend de sa composition : elle varie de 3050 à 3200 kg/m<sup>3</sup> pour les ciments portland sans addition, de 2950 à 3050 kg/m<sup>3</sup> pour les ciments au laitier, la masse volumique réelle du laitier broyé variant de 2800 à 2900 kg/m<sup>3</sup> [20]. La masse volumique apparente du ciment varie en général de 800 à 1200 kg/m<sup>3</sup>. On compte en moyenne 1100 kg/m<sup>3</sup> pour un ciment en vrac non tassé

### **I.2.4.2: Chaleur d'hydratation**

La prise du ciment est caractérisée par un échauffement de la pâte. La quantité de chaleur dégagée renseigne sur la vitesse et le degré d'hydratation. Les ciments de haut fourneau et les ciments de laitier au clinker présentent une chaleur d'hydratation faible. Avec un CPA 55, le flux de chaleur maximal (calorimétrie adiabatique) sur mortier normalisé dépasse 40 J/g.h, 7 à 8 heures après le gâchage. Avec un CPJ 45, ce même flux maximal ne dépasse pas 15 J/g.h vers 10 heures d'hydratation et avec un CLK 45 on descend à 10 J/g.h au bout d'un jour environ [48].

### **I.2.4.3:Prise et durcissement des ciments au laitier**

Les ciments à forte teneur en laitier type CHF et CLK ont des temps de prise plus longs que ceux des ciments portland sans addition, surtout par temps froid. La cinétique de prise et de durcissement des ciments au laitier est en effet bien différente de celle des ciments portland. Si les résistances mécaniques à 28 jours sont équivalentes, les résistances aux jeunes âges (2 jours) des ciments à forte teneur en laitier sont inférieures. Mais au-delà de 28 jours, la pente des courbes de résistance mécanique obtenue à long terme peut être sensiblement supérieure pour les ciments au laitier. Les courbes des résistances mécaniques respectives de ciment à forte teneur en laitier (CHF) et de ciment portland montrent que le premier a une évolution plus lente et plus progressive (**Figure I.9**). Les courbes se croisent à 28 jours à 20°C, voire plus tard si la température est plus basse [49].



**Figure I.9 : Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF (1) avec 60 % de laitier et d'un CPA (2), d'après HG SMOLZCYK [49]**

#### **I.2.4.4. Hydratation des ciments au laitier**

L'hydratation du ciment au laitier est aussi complexe que celle du ciment portland. En effet au cours de l'hydratation du ciment au laitier, il existe des périodes caractéristiques, où laitier et aluminates réagissent simultanément, mais à des vitesses différentes. Le mode d'hydratation du ciment au laitier est donc le même que celui du CPA

L'addition au ciment portland d'ajout tel que le laitier granulé de haut fourneau ne change pas la nature des produits d'hydratation responsables de la prise et du durcissement et du point de vue qualitatif, les produits d'hydratation sont identiques. Du point de vue quantitatif, les produits d'hydratation diffèrent par leurs proportions respectives, la cinétique d'hydratation étant très différente, selon qu'il s'agit de clinker ou de laitier.

#### **I.2.5. Emplois des ciments au laitier [50]**

La réalisation d'un ouvrage nécessite l'emploi de matériaux adaptés aux contraintes auxquelles il est soumis et à la nature de l'environnement dans lequel il est situé. Ces données conduisent à privilégier certains ciments et rejeter d'autres dont l'emploi pourrait entraîner des désordres à plus ou moins long terme.

## *Le ciment et les ajouts minéraux*

---

Le choix du ciment est très important dans la confection d'un béton. Les principales utilisations des ciments portland composés (CPJ, CEM II), en fonction de la classe de résistance dans un ordre croissant, sont les suivantes :

- Béton courant, armé ou non armé.
- Tous travaux de génie civil et de maçonnerie.
- Travaux routiers, travaux de bétonnage en grande masse.
- Préfabrication avec ou sans traitement thermique.

### **I.2.6.CONCLUSION**

Dans le ciment de laitier, le laitier joue un rôle bénéfique vis à vis des agressions de nature chimique, notamment les eaux sulfatées [51], lorsque la teneur en laitier est supérieure ou égale à 60 % et l'eau de mer lorsque le matériau cimentaire est en immersion totale. Le béton de ciment au laitier présente une résistance élevée à la diffusion des chlorures et des alcalis, la richesse en laitier du ciment ayant plus d'importance dans ce domaine que le rapport E / C du béton.

Les principales caractéristiques étudiées sont :

- chimiques : étude de la composition chimique et du pouvoir hydraulique par les différents indices et modules.
- physiques : détermination de la quantité de phase vitreuse, et des masses volumiques.
- Mécaniques : La réflexion s'oriente vers une ou plusieurs activités d'origine physique d'une poudre chimiquement inerte. Il a été montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) est plus rapide en présence de fines calcaires. Dans un tel cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de «nucléation hétérogène » : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite. [16]

## **Chapitre II : État de connaissance sur la durabilité**

## Chapitre II : État de connaissance sur la durabilité

### II.1.Introduction :

Le comportement chimique des bétons vis-à-vis des milieux extérieurs dépend de plusieurs facteurs, qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler (composition des différents constituants (ciment, granulats, technique de mise en œuvre, âge de béton, conditions climatique, nature des agents agressifs, qu'il soit minéral ou biologique

Cette approche est celle de la physiologie que celle de la pathologie, c'est à dire d'analyser et comprendre les mécanismes de dégradation, mais aussi les mécanismes de défense du ciment hydraté face à l'agression chimique [1].

#### II.1.1.Notion sur la durabilité :

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 [52].

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 conséquent à la durabilité [53]. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

-**La perméabilité** est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte. La perméabilité  $K$  (en  $m^2$ ) est définie à partir de la loi de Darcy :

$$Q = - (K / \mu) .A .dP / dz$$

Avec  $Q$  débit volumique d'un fluide de viscosité  $\mu$  qui traverse une épaisseur  $dz$  d'un matériau de section apparente  $A$  sous la différence de pression  $dP$  (pour l'eau, on parle de coefficient de perméabilité  $K_w$  (en  $m/s$ )).

-**La diffusivité** est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion. [1]

la diffusivité est définie à partir de la loi de Fick :  $J_x = - D_a \cdot dC / dx$

La perméabilité et la diffusivité, qui dépendent de la compacité du béton, sont deux indicateurs essentiels de la durabilité des bétons.

Les plastifiants et les additions minérales fournissent une grande variété de moyens pour faire des bétons ayant un niveau de résistance à la compression fixé. Les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés, le cas des cendres volantes, le laitier, la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité. Cela peut apporter en soi un gain important vis-à-vis la durabilité [1][52]

### **II.2. SEVERITE ET INTERACTION DES AGENTS AGRESSIFS :**

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

[1]

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. [54].

## **II.3.CRITERES GENERAUX DE DURABILITE DANS LES MILIEUX**

### **AGRESSIFS :**

Que ce soit pour la carbonatation, la résistance au gel ou à la diffusion des ions chlorure, les limitations portant sur ces trois critères servent à limiter la capacité de transfert du béton, exprimée par un coefficient de perméabilité ou de diffusion [55].

#### **II.3.1.La résistance**

En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevé que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité qui peut parfois déterminer la résistance à prendre.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit cependant être complété par d'autres conditions, en effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables.

Une forte décroissance de la résistance mécanique est observée avec l'augmentation de la porosité. En génie civil, ceci est traduit par « l'obtention d'un béton très compact passe la réalisation d'un béton mécaniquement très résistant ». Ces deux grandeurs sont intimement liées,

#### **II.3 .2.L'eau de gâchage**

Dans le béton l'eau remplit deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques, qui vont lui permettre un écoulement sans ségrégation dans les coffrages ; Une fonction chimique qui contribue au développement des réactions d'hydratation et la formation de la pâte liante dans le béton [56]. L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir d'agents agressifs (sels minéraux en quantités abondantes),

qui peuvent être facteur de dégradation des structures. L'agressivité d'une eau vis-à-vis d'un béton peut être appréciée d'après les valeurs limites du tableau (1.2).

**Tableau II.1. Les valeurs limites de l'agressivité de l'eau [57].**

Examen Chimique mg/l	Agressivité		
	Faible	fort	Très forte
Valeur du PH	<b>6.5 à 5.5</b>	<b>5.5 à 4.5</b>	<b>&lt; 4.5</b>
CO2 agressif	<b>15 à 30</b>	<b>30 à 60</b>	<b>&gt; 60</b>
Ammonium NH4 +	<b>15 à 30</b>	<b>30 à 60</b>	<b>&gt; 60</b>
Magnésium Mg <sup>2+</sup>	<b>100 à 300</b>	<b>300 à 1500</b>	<b>&gt; 1500</b>
Sulfates SO4 <sup>2-</sup>	<b>200 à 400</b>	<b>600 à 3000</b>	<b>&gt; 1500</b>

### **II.3.3. La nature de ciment et le dosage :**

L'influence du dosage en ciment est inversement proportionnelle à celle du dosage en eau. La résistance en béton augmente avec le dosage en ciment. C'est surtout la classe de ciment qui importe plutôt que sa nature minéralogique.

### **II.3.4. Le rapport E /C**

La résistance mécanique dépend directement du rapport E/C, et qui est même en relation directe avec la porosité [55].

Le rapport E/C (Eau/Ciment) est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité : résistance mécanique à la compression, durabilité.

Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation).

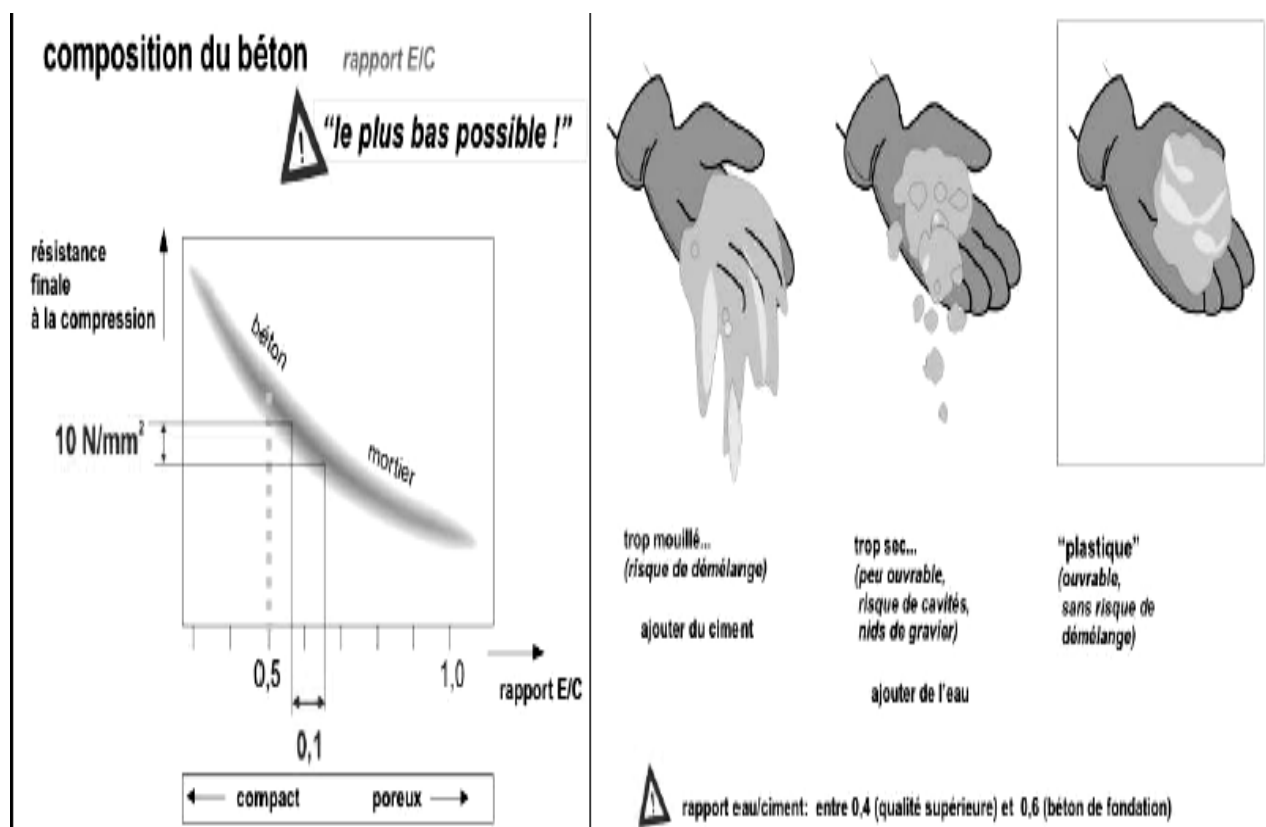


Figure II.1: Influence du rapport E/C sur la résistance finale à la compression.

[57]

## II.4.Aspects affectant la durabilité

### II.4.1.les mecanismes d’alteration des betons

Les altérations sont deux types :

- **Erosion** : qui entraîne une partie du liant.
- **Gonflement** : et éventuellement fissuration par formation du composé expansif [58].

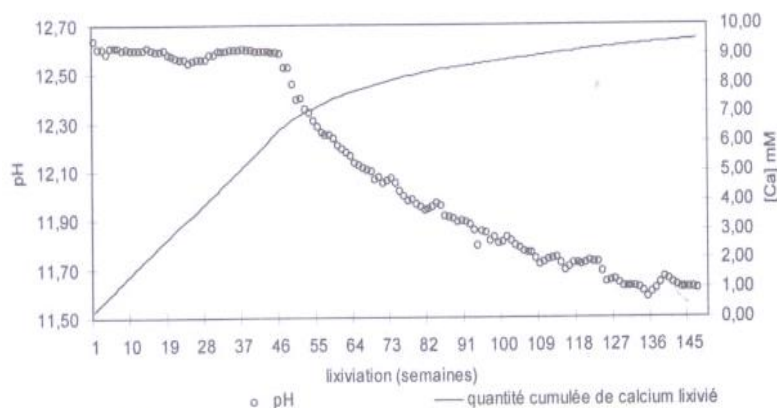
#### II.4.1.1.LA DISSOLUTION ET L’EROSION :

De tous les constituants hydratés du ciment, la chaux est le plus soluble, elle peut être dissoute par attaque superficielle ou par percolation à travers le béton. La chaux qui émerge la structure par des fissures, forme des efflorescences blanches de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou de  $\text{CaCO}_3$ , l’eau dissout  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , quelle acide, saline ou pure [54].

La dissolution de la chaux peut s’accompagner par la formation de composé nouveau, s’ils sont soluble, les sels formés diminuent la résistance du béton, s’ils sont

insolubles ils peuvent au contraire se substituer à la chaux et former une couche protectrice.

Le processus principal résultant de l'hydrolyse des ciments hydratés est la décalcification du matériau. D'après [59] relèvent un accroissement de la quantité de calcium lixivié avec le temps Figure II-2. La lixiviation du calcium ne possède pas d'un régime de lixiviation simple. « Deux régimes de lixiviation » distincts sont observés : une croissance forte et régulière de la concentration en calcium dans les lixiviats tant que le pH reste stable à 12,6, pH tomponné par la dissolution de la portlandite ; une croissance faible de la quantité de calcium lixiviée dans le temps correspondant à la dissolution des sulfo-aluminates et /ou à la décalcification des CHS, conjointement à la baisse du pH jusqu'à une valeur voisine de 11.5.



**Figure II.2: Evolution de PH et de la quantité de calcium en solution lors de la lixiviation d'un ciment hydraté [60].**

Une des conséquences de la dissolution des phases du ciment hydraté est la forte augmentation de la porosité du matériau. Cette augmentation de porosité modifie l'accessibilité du cœur du matériau aux solutions externes et donc susceptible de simplifier les phénomènes de dégradation.

### **II.4.1.2: LE GONFLEMENT ET LES ECLATEMENTS :**

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. La réaction de base est la formation d'ettringite ou sel de Condlot ( $C_3A$ ,  $CASO_4$ )<sub>32</sub> [54].

## II.5. différents type de les attaque chimique du béton:

### II.5.1. Action des acides :

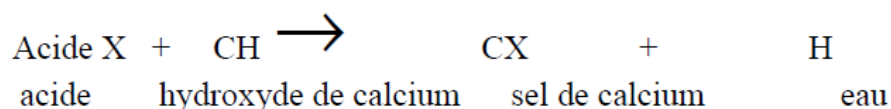
Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques: l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques. L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.

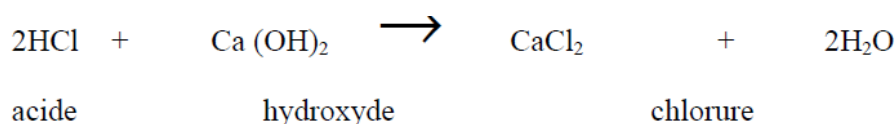
- les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agro-alimentaires- les réseaux d'égouts

L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction de ce dernier et la partie d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble.

Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous :



Par exemple



Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles

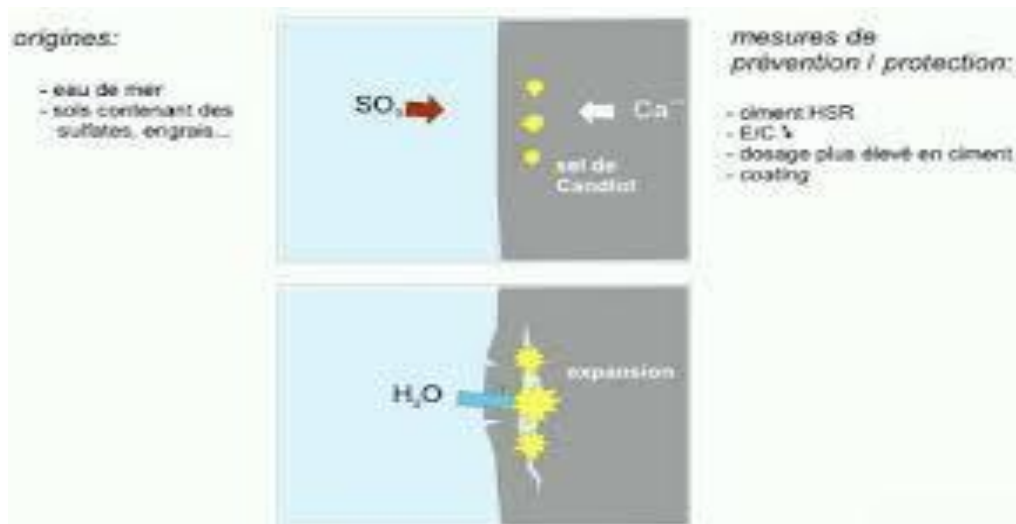
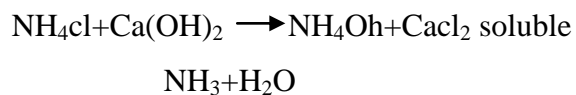


Figure II-3: présente les différents types d'attaques acides [61]

### II.5.1.1. Action des sels :

**Dissolution**      **formation**      **.soit produit cohérent dans  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**   
**De**                      **→ d'un**                      **ex : action de  $\text{Cl}^-$  substitution  $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$**   
**La chaux**              **composition**  
                                  **nouveau**                       **$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CaCl}_2$  soluble**  
                                  par réaction                      **Précipité**  
                                  D'échange    **Colmatant**  
                                  ionique

**. soit produit non cohérent dans  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**   
**ex : action de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  substitution  $2\text{NH}_4^+ \text{Ca}^{2+} \rightarrow$**



### **Gaz volatil EROSION**

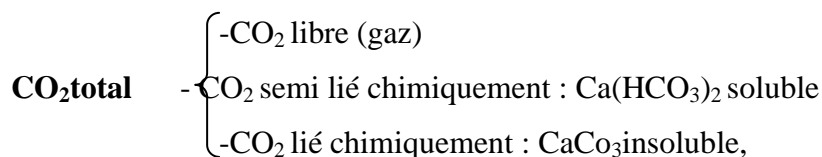
Ce schéma s'applique aux chlorures, sulfates et nitrates. Le sel formé par la

substitution ionique peut réagir avec certaines constitutions du ciment comme les aluminates (formation de chloroaluminate par action de  $\text{CaCl}_2$ , sufloaluminate par action de  $(\text{CaSO}_4)$ ). Le trisulfoluminate de calcium ou ettringite est expansif et entraîne le gonflement et l'éclatement du béton. [1].

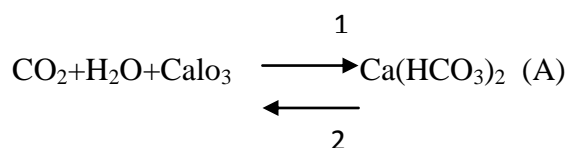
### II.5.1.2. Action de l'acide carbonique :

L'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$  peut être considéré comme la solution aqueuse de  $\text{CO}_2$  (BIC 20k, 1972).

$\text{CO}_2$  dans l'eau, existe sous différents états :



suivant la réaction d'équilibre :



### II.-5.2. Attaque sulfatique:

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle

Les causes et les effets de l'attaque sur la face interne s'expliquent par les phénomènes suivants :

- Dans les parties anaérobies du réseau d'égouts, les bactéries réduisant les sulfates dans l'eau usée pour former l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
- Dans la partie aérobie du réseau d'égouts, l'hydrogène sulfuré se dégage de l'eau usée.
- L'hydrogène sulfuré s'oxyde par l'intermédiaire d'une autre famille de bactéries aérobies et donne  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
- A la fin de ce processus, le pH est de l'ordre de 2 et une couche de gypse se forme à la surface du béton ; ce gypse est normalement le produit de la réaction chimique entre l'acide sulfurique et la portlandite dans le mortier [1].



Figure II.4: Des cas pathologiques rencontrés : l'influence des eaux agressifs en contact [1].

### II.5.2.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 [62]. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

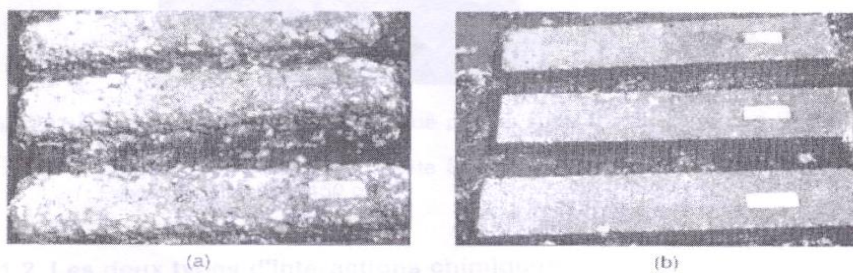


Figure II.5: Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates [63].

a) E/C=0.5

b) E/C=0.39

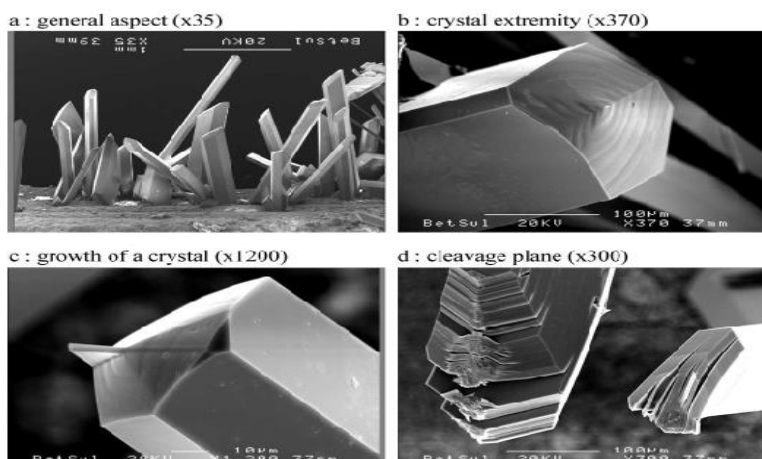
### II.5.2.2.Processus d'attaque par les sulfates externes :

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

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 [59].
- Pénétration des anions  $\text{SO}_4$ , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+2}$ ,  $\text{NH}_4\dots$ ),
- $\text{Ca}^{+2}$  et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en  $\text{SO}_4$  en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ou hydraté ( $\text{C}_4\text{AH}_x$  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.
- D'après [64] qui propose d'après son étude un mécanisme d'attaque sulfatique, en utilisant les résultats de sulfate
- de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ).

Aspect général  
d'un type de  
ettringite  
secondaire



Un cristal presque  
parfait

Figure II.6: Analyse par le micrograph SEM :montre le type de cristaux aiguille du gypse formés sur la surface d'une éprouvette immergée dans une solution de sulfate d'ammonium ((NH<sub>4</sub>)SO<sub>4</sub>) [65][1] .

### II.5.3. Attaque et action par l'eau de mer

La durabilité en milieu marin est fonction d'un nombre relativement important de paramètres.

- Paramètres chimiques (ions agressifs).
- Paramètres géométriques (marées et fluctuation du niveau de la mer).
- Paramètres physiques (cycle de gel dégel, activation par les hautes températures).
- Paramètres mécaniques (abrasion).

Un béton bien formulé et bien mûris possède généralement une très bonne durabilité face à l'eau de mer. Les différents types d'attaques ont de la localisation préférentielle qui progressent vers l'intérieur du béton illustré par la figure II-7

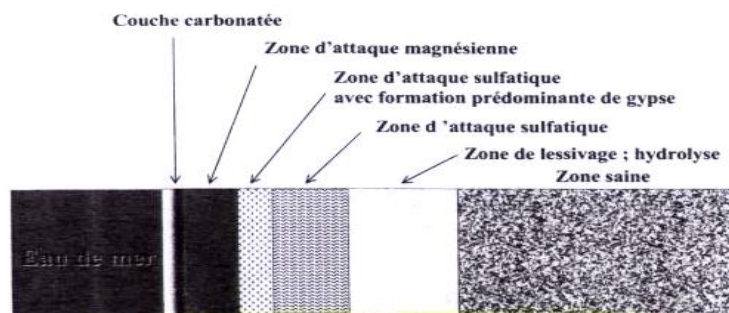


Figure II.7: Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée) [66][1]

### II.5.4. Attaque par les ions chlorures :

Dans les bétons la Figure II-8, les chlorures proviennent pour l'essentiel du milieu extérieur, mais il est important de limiter les sources internes chlorures. Pour l'acier, le processus de corrosion généralement admis et débute par la dissolution du métal et la formation des ions ferreux[67].



Figure II.8: agression du béton par activité des chlorures [68] [1] .

### II.5.5. La carbonatation :

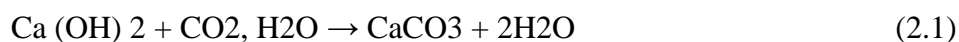
La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement, un des composants des béton durci, la portlandite et la calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité Figure II.9.

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

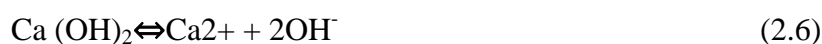


Figure II.9: Détermination de la profondeur de carbonatation [69].

La dégradation provient essentiellement de la réaction avec la portlandite selon l'équation bilan suivante : [70] [ 71]



Plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation. La réaction a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite le passage du CO<sub>2</sub> en phase aqueuse (Eq 2.2), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (Eq 2.3 et Eq2.4) et l'eau (Eq 2.5), la dissolution de la portlandite (Eq 2.6) et la précipitation du carbonate de calcium (Eq 2.7).



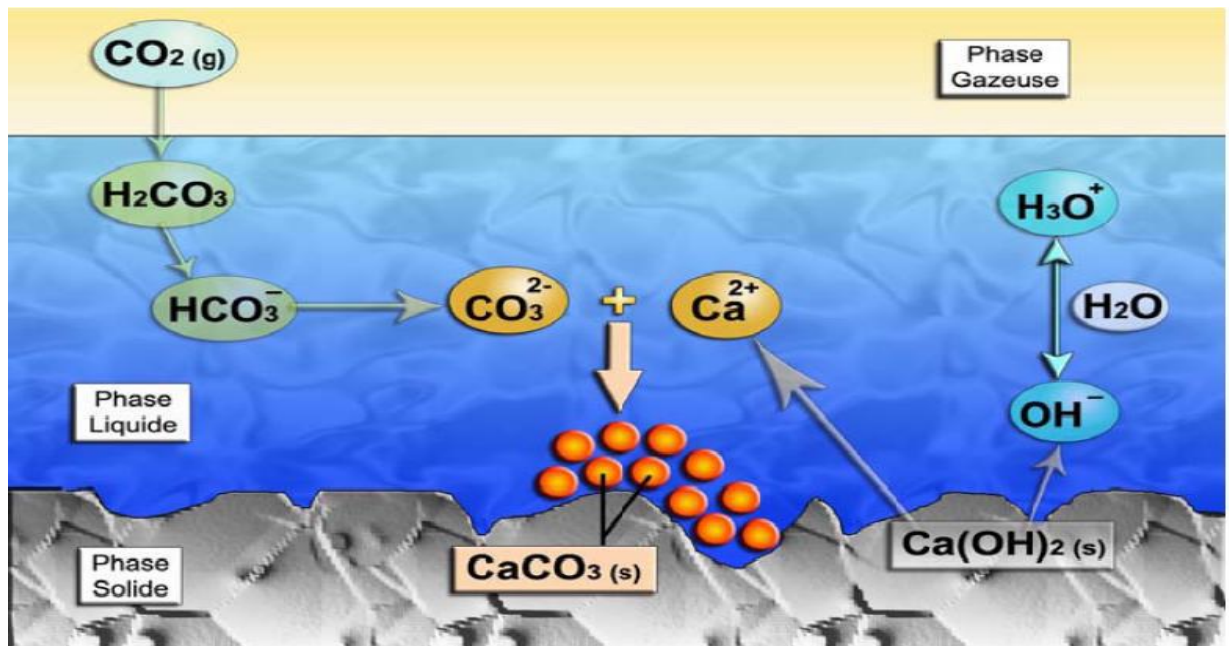


Figure II.10: Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca(OH)}_2$ [72]

### II.5.5.1: Corrosion des armatures liées à la carbonatation:

La carbonatation de la matrice cimentaire diminue le pH de la phase aqueuse des pores du béton qui n'offre alors plus de protection à l'acier.

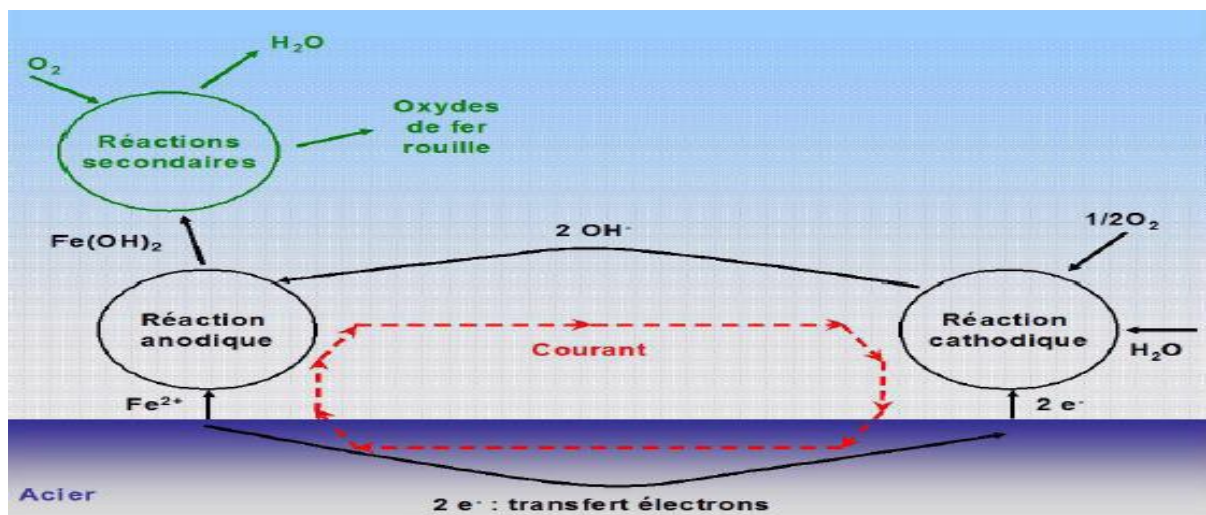


Figure II.11: Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers.

[73]

la carbonatation fait baisser le pH de la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. De ce fait, dans le béton armé, si l'épaisseur carbonatée atteint le premier lit d'armatures, ces dernières vont être dépassivées Figure II.12:



**Figure II.12 : Carbonatation du béton et conséquences sur la structure [74].**

### **II.5.6. Les cycles de gel- dégel**

Tous les bétons ne sont pas sensible aux cycle gel- dégel, seul les bétons dits « gélifs » s'altèrent. Les dégradations se manifestent sous forme de fissurations interne ou d'écaillage et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses...), susceptible d'être saturées en eau et donc plus sensibles à l'action du gel. Ce phénomène est encore mal connu. [75]

### **II.5.7. La réaction alcali silice [76]**

Une pathologie du béton, souvent appelé « cancer du béton », fait intervenir les alcalins du ciment et la silice de certains granulats, c'est pourquoi on appelle l'alcali réaction granulats la Figure I.13.

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que les granulats soient potentiellement réactifs, que l'humidité relative excède 80-85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique.

- Il trois type d'alcali réaction : les réactions alcali carbonate, alcali – silice et alcali silicate.
- La réaction la plus fréquente est la réaction alcali silice.
- Les désordres occasionnés par l'alcali réaction se présentent en général qu'après plusieurs dizaines d'années.[1]



Figure II.13.phénomène d'alcali réaction rencontré. [1]

## II.6.LA TENUE DES BETONS DANS LES MILIEUX AGRESSIFS :

### II.6.1.La tenue des bétons dans les milieux sulfatique :

Dans un environnement sulfatique, la dégradation du béton n'est possible que si les ions de sulfates peuvent accéder aux phases réactives. Ce processus de transfert au sein du même matériau a lieu par diffusion. Un béton résistant sera donc d'abord un béton ayant des propriétés de diffusion faible (compacte et plus perméable). Figure II-14 illustre cette influence, la perméabilité étant liée au rapport E/C de gâchage. [1]

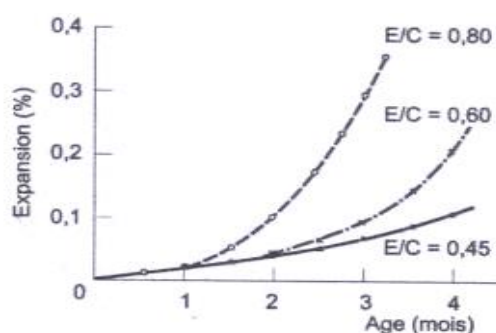


Figure II.14: Influence du rapport E/C sur l'expansion du mortier immergé dans une solution sulfatique contenant 4.3% de sulfate de magnésium et 2.5% de sulfate de sodium [77].

**Tableau II.2: Les résultats de Tumidajski [78] : profondeur de la frontière de sulfate en fonction de type de ciment et des pouzzolanes**

ciment	E/C	Laitier (%)	Cendre volante (%)	Fumée de silice (%)	Temps de cure (jours)	Profondeur (mm)
Type 10	0.42	-	-	-	14	5.0
Type 10	0.5	-	-	-	14	7.6
Type10	0.6	-	-	-	14	8.4
Type50	0.5	-	-	10	14	2.0
Type50	0.5	-	30	5	56	3.0
Type50	0.5	75		3	28	2.8

Solution de sulfate de sodium 88g/l, pendant 2 ans.

Type 10 ciment  $C_3A=6\%$ , équivalence CPA CEMII.

Type 50 ciments  $C_3A=2.6\%$  équivalence CPA PMC I.

Les premiers résultats mettent en évidence l'importance du rapport E/C. Les résultats des ciments type 50, montrent l'avantage des ciments avec un teneur faible du  $C_3A$ . Ils soulignent aussi la valeur de pouzzolane dans les milieux sulfatique, d'autre part (5), signalent que pour un même béton, l'usage des cendres volantes réduit la perméabilité.

Tableau II.2 Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates ce qui entraîne :

- Moins de ciment produisant des teneurs 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).

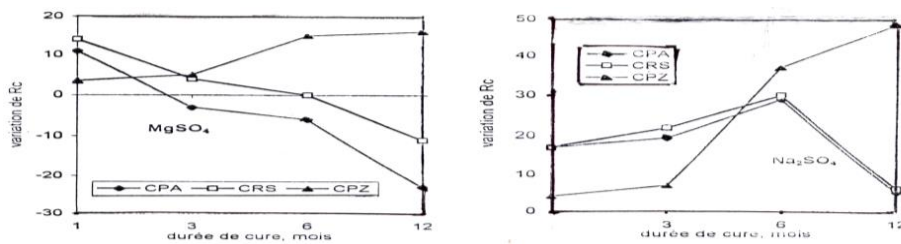


Figure II.15: La variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment immergée dans les solutions sulfatiques en fonction de la durée de cure [79].

Le comportement de la résistance des différentes pâtes de ciment dans les solutions de sulfates la Figure II.16 est principalement attribuée à la pénétration des sulfates et leur réaction avec les constituants de ciment. Les résultats de cette même étude, montrent que la quantité des sulfates imprégnés dans les pâtes de ciments augmente avec la durée d'immersion surtout au début de temps

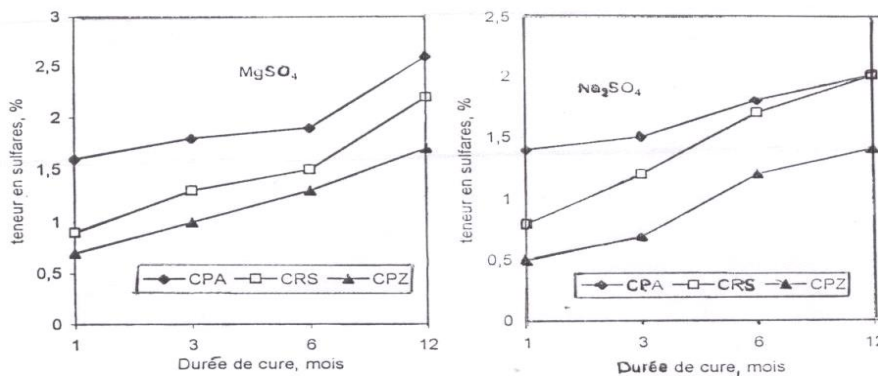


Figure II.16: La teneur en sulfate des pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatiques en fonction de la durée d'immersion [79].

Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates Figure II.17.

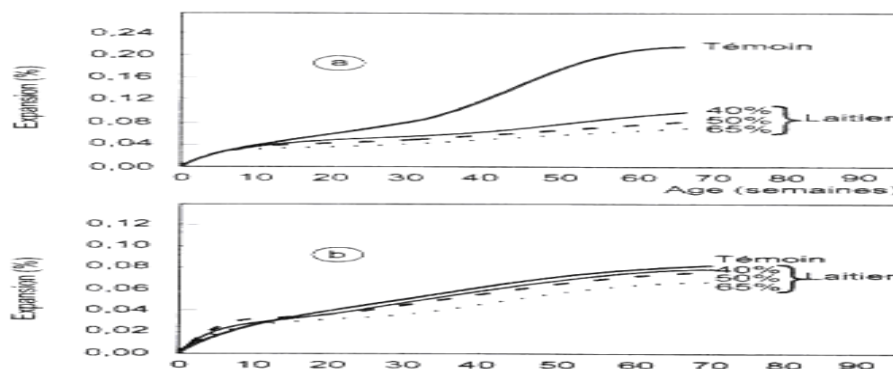


Figure II.17 : Influence de laitier sur l'expansion en fonction du temps [79].

## **II.7.CONCLUSION :**

✚ Nous avons essayé dans ce chapitre d'identifier les environnements qu'il faut considérer, la sévérité des conditions, leur interaction et le risque de leurs existences continues. Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation, c'est à dire sa durabilité, était appréciée par sa résistance à la compression.

✚ Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité, et par conséquent à la durabilité, le comportement des bétons dans les eaux agressives et liée à d'autres influents qui sont également importants et qui sont appelées par les critères généraux de durabilité des bétons dans les eaux agressives :

- La résistance.
- Le rapport E/C.
- La nature du ciment et le dosage.

✚ Divers travaux sur ces recherches ont été effectués pour la détermination des mécanismes de dégradation, pour divers milieux agressifs notamment le cas d'attaque sulfatique, les eaux acidifiées et les chlorures.

✚ Deux grands types de mécanismes sont connus pour leur agressivité :

- la dissolution, l'agression résolvente.
- le gonflement, dû à la cristallisation.

✚ Les différents types d'attaques chimiques affectant le béton sont les suivants :

- l'attaque sulfatique, l'attaque par les sels et par les acides sulfuriques sont classés comme un type d'attaque sulfatique, mais leur effet diffère l'un de l'autre.

- ✚ La bonne tenue dans les milieux agressifs est fonction des critères généraux.
- ✚ L'incorporation des additions minérales ouvre des nouvelles perspectives pour des travaux de recherches ce concerne qui le domaine de durabilité des bétons dans les milieux agressives.

## **Chapitre III: La durabilité dans le contexte normatif**

## **Chapitre III: La durabilité dans le contexte normatif**

### **III.1. Introduction**

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 et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Un contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes pour le béton, d'une part, et les normes pour les produits en béton, d'autre part, ainsi que les recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène, logique et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité.

Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages [80].

### **III.2. La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1 et classes d'exposition**

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (AFNOR NF EN 206-1) [80] [81].

La norme NF EN 206-1 définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage vont être soumis pendant leur durée de service [80] [81].

- Classe XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque.
- Classe XC : corrosion induite par carbonatation.
- Classe XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine.
- Classe XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer.
- Classe XF : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage.
- Classe XA : attaques chimiques.

Pour chaque ensemble, les classes sont définies par des indices, selon des niveaux de risque croissants. Selon ces définitions des classes, un environnement donné peut correspondre à plusieurs classes d'exposition, par exemple XC (carbonatation) et XD (chlorures issus de sels de déverglaçage). A l'inverse, une même classe d'exposition peut correspondre à plusieurs actions environnementales et mécanismes de dégradation, par exemple la classe XF2 : Attaque gel/dégel, saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage [80].

### **III.3. Les indicateurs de durabilité**

Ils sont choisis sur la base, d'une part de leur pertinence théorique dans la quantification et la prévision de la durabilité (par exemple propriétés de transport impliquées dans les équations fondamentales), et d'autre part, de leur aptitude à être déterminés de façon fiable et facile, au moyen de méthodes de laboratoire bien définies et reproductibles. Ces paramètres qui apparaissent comme fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation considéré [82].

Ces paramètres doivent être aisément quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur des éprouvettes ou sur des prélèvements, de façon reproductible et selon des modes opératoires bien définis.

Trois catégories d'indicateurs de durabilité sont distinguées dans le guide **AFGC (association française de génie civil)**[83].

- **les indicateurs de durabilité généraux** (valables pour la plupart des dégradations).
- **les indicateurs de durabilité spécifiques** à un processus de dégradation donné (par Exemple l'alcali-réaction).

#### **III.3.1. Les indicateurs généraux de durabilité**

Les indicateurs de durabilité généraux sont des paramètres déterminants pour la durabilité des bétons, utilisables aussi bien pour la prévention de la corrosion des armatures, de l'alcali réaction ou de toute autre dégradation. Le nombre de ces paramètres est très petits et ils sont complémentaires et ne sont pas systématiquement nécessaires pour chaque cas pratique.

Les indicateurs généraux définis dans le guide AFGC sont les suivants :

- la porosité accessible à l'eau (mode opératoire AFPC-AFREM, 1997) [84].
- le coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure (mode opératoire).

RGCU Grandubé, 2007) [85].

- la perméabilité aux gaz (mode opératoire AFPC-AFREM, 1997) [84].
- la perméabilité à l'eau liquide.
- la teneur en portlandite  $[Ca(OH)_2]$  (mode opératoire RGCU Grandubé, 2007)[85].

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter Le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques .

### **III.4 :Les essais de performances et caractérisation**

Les essais de performance ont pour vocation première de permettre un classement pertinent des bétons vis-à-vis de leur résistance à une agression particulière. Ces essais sont conçus pour accroître l'intensité de la sollicitation, qu'elle soit physique ou chimique. La difficulté dans la mise au point de ces essais est de ne pas provoquer de phénomènes parasites du fait de la méthode d'accélération [86] [87] [88] .

### **III.5:Etapes de la démarche performantielle**

La démarche performantielle se déroule en général de la manière suivante :

- Définition de la catégorie de l'ouvrage en déterminant son importance économique Et stratégique, en particulier en sélectionnant la **durée de vie exigée**,
- Définition des conditions environnementales incluant par exemple le type d'agressivité, les variations de l'humidité,... etc.
- Définition des risques de dégradation : corrosion des armatures, alcali réaction,...
- Choix des indicateurs de durabilité et des caractéristiques du matériau en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, de son environnement et des dispositions Constructives.
- Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité en fonction de L'importance de l'ouvrage, du type d'environnement, de la durée de vie exigée et des dispositions constructives ;
- Réalisation des essais de laboratoire sur béton suivant un mode opératoire bien déterminés, sur des éprouvettes conservées dans des conditions précises et pendant Une durée préconisée;
- Choix d'un modèle prédictif de durée de vie où les indicateurs de durabilité Paraissent comme des données d'entrée [89].

### **III .6.Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte algérien**

D'après l'étude de **Oualit[90]** sur la durabilité des matériaux cimentaires et des bétons en particulier une approche performantielle fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité adaptée au contexte de l'Algérie. La non-prise en charge de la problématique de la durabilité qui est pour objectif de comprendre les principes physico-chimiques associés aux différents types d'agressions des structures en béton, comprendre l'effet des principaux paramètres environnementaux qui influencent l'ampleur des dégradations. La compréhension de ces phénomènes permettra de formuler un béton durable dès la phase de conception, susceptibles de protéger les ouvrages en béton armé contre une dégradation donnée, pendant une durée de vie fixée et dans des conditions environnementales bien précises, se référant à une approche performantielle fondée sur la notion d'indicateurs et sur la spécifications de critères performantiels .

### **III .7.Facteurs influant la durabilité des bétons en Algérie**

Selon **Oualit[90]** les études et les expertises munies par différents chercheurs et organismes spécialisés en la matière, on peut conclure que les principaux facteurs qui influent sur la durabilité du béton et des ouvrages en béton et béton armé en **Algérie**, sont essentiellement liés à :

#### **III .7.1.La qualité des matériaux**

Pour mettre en évidence des lacunes et des manquements qui ont des conséquences sur les performances du béton, et par voie de conséquence sur sa durabilité, notamment à moyen et à long terme. Les règles de l'art permettant d'assurer les qualités de fabrication et de mise en oeuvre du béton ne sont pas systématiquement observées dans la pratique sur les chantiers du bâtiment.

#### **III.7.2.Climat et environnement**

La zone maritime, qui génère des embruns marins et une importante humidité relative sur l'ensemble de la bande côtière qui constitue le littoral, la zone chaude et semi-aride concerne principalement la région des hauts plateaux, puis celle qui couvre le Sahara correspondant à un climat très sec avec des températures élevées notamment en été. Pour ce climat, la prédominance de la chaleur caractérisée par un fort gradient thermique est à relever dans l'ensemble. Concernant l'environnement, il y a lieu de relever la présence des **chlorures** sur tout le littoral, la **carbonatation** dans les zones

urbaines et industrielles, ce qui va engendrer le phénomène de la **corrosion des armatures** ainsi que l'existence de **sulfates** dans les sols. Dans les régions du sud en particulier.

Le climat Algérien est intermédiaire entre le climat tempéré humide et le climat désertique. Il est caractérisé par une pluviométrie régissant le régime des eaux souterraines et superficielles caractérisé par deux saisons pluvieuses (une dominante en automne, une secondaire au printemps). Le climat est caractérisé également par des précipitations irrégulières à l'échelle journalière, annuelle et interannuelle, et une sécheresse estivale forte. Le Climat, méditerranéen au nord et désertique au sud. un climat méditerranéen couvre le nord, tandis qu'un climat désertique règne sur le sud. Durant l'été, les mois les plus chauds sont juillet et août, [90]

### **-Adaptation de l'approche performantielle au contexte Algérien**

Ce présent travail a permis de sérier les facteurs à prendre en compte pour l'appréhension de la problématique de la **durabilité des bétons en Algérie**. Ces facteurs sont essentiellement **le climat, l'environnement, les agressions chimiques** ainsi que **l'aléa sismique** dans les régions à forte sismicité,

Cette approche **novatrice** propose de fournir à l'ingénieur et au concepteur une « méthodologie » pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité, sur la base d'un petit nombre de propriétés du matériau béton. Ces propriétés ont une signification physique précise et sont facilement accessibles par des méthodes bien définies

-Par rapport à la corrosion des armatures et l'alcali-réaction relatives aux indicateurs de durabilité sélectionnés, en fonction de la durée de vie exigée pour la structure et de son type d'environnement. Ainsi, les « recommandations » proposées permettent de spécifier des durées de vie (par exemple 30, 50, 100, 120 ans ou plus) pour les ouvrages en béton, les deux pathologies sont très fréquentes dans notre pays compte tenu des conditions climatiques et environnementales [90].

-la deuxième pathologie prise en considération qui est l'alcali-réaction, même si ce type d'agression est rarement rencontré en Algérie, il a été jugé utile de la maintenir en raison de la gravité des dégâts causés par cette agression et de le prendre comme mesure de sécurité sur les granulats locaux employés

-Cependant, l'incorporation de la deuxième pathologie prise en considération qui est l'alcali-réaction, même si ce type d'agression est rarement rencontré en Algérie, il a été jugé utile de la maintenir en raison de la gravité des dégâts causés par cette

agression et de le prendre comme mesure de sécurité sur les granulas locaux employés.

-Cependant, l'incorporation de critères performantiels spécifiques est nécessaire afin de lutter contre d'autres pathologies existantes en Algérie et que cette approche n'a pas pris en compte tel que l'effet de la chaleur intense et l'influence des attaques sulfatiques ainsi que l'aléa sismique qui provoque des fissures et microfissures ce qui facilite la pénétration des agents agressifs et par conséquent, compromettre la durabilité de l'ouvrage et remis en cause toutes les théories mentionnées par l'approche

-Enfin, Il est important de souligner que ce type de démarche et les spécifications Correspondantes, aussi élaborés, rigoureux et précis soient-t-ils, ne pourront porter leurs Fruits que si les recommandations pour une mise en oeuvre correcte du béton et le contrôle d'exécution sont appliqués avec la même rigueur [90].

### Conclusions général :

Ce présent travail avait pour objectif de rassembler des données relevés dans la bibliographie concernant l'influence des ajouts sur la durabilité des caractéristiques du mortier et béton étudiées à l'état durci, présentation dans un contexte normatif, Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé, ont à procéder

Quelques enseignements peuvent malgré tout être tirés de cette étude :

-Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique.

- L'introduction des ajouts minéraux améliore le comportement des matériaux à matrice cimentaire dans les environnements chimiquement agressif, ces derniers contribuent à la densification de la pâte de ciment durcie, à l'amélioration de la zone de transition pâte – granulat et à la consommation de la portlandite et formation des gels C-S-H.

- l'incorporation des ajouts minéraux contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers binaires et ternaires confectionnés selon les différentes combinaisons avec ces ajouts. Ils permettent une amélioration de la résistance mécanique des mortiers qui égale ou sur passe celle du mortier contrôle à court et à long terme et augmentent la résistivité de ces mortiers envers les attaques des milieux acides sulfuriques et acidiques.

- Permis de sérier les facteurs à prendre en compte pour l'appréhension de la problématique de la durabilité des bétons en Algérie. Les facteurs sont essentiellement ainsi dans les régions à forte sismicité et de proposer par la suite une méthodologie générale, structurée en différentes étapes ou modules (processus).

### Références bibliographiques

[1] **Saida BOUALLEG** : Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires «Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiafde M'SILA -2004».

[2] **DREUX G, FESTA J, (2002)**, Nouveau guide du béton et de ses constituants , Huitième édition, Edition Eyrolles.

[3] **Cembureau, 1997**. *Procédés et techniques de fabrication du ciment*. Bruxelles, Belgique, Available from: URL: [www.ciments-calcia.fr](http://www.ciments-calcia.fr).

[4] **CHIHAOUI Ramdane**: Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran-2008).

[5] **M Venuat** – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition 2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

[6] **Signes-Frehel, M., Maes P., Haehnel, C., 1996**. Etude des phases d'un clinker par diffractométrie des rayons X - vers la quantification. Centre Technique, Groupe Italcementi Cements, Volume 6. Guerville, France. available at <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1996414>

[7]. **Erik B Nelson, Jean-François Baret and Michel Michaux (1990)**, « *Cement Additives and Mechanisms of Action* ».

[8] **Philippines LALAN** : *Influence d'une température de 70 °C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton / argile : expérimentations en laboratoire, in situ et modélisation* «THÈSE DE DOCTORAT de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University 1999P14»

[9] **Regourd, M. et Hornain, H. (1975)**. Application de la microscopie électronique à balayage. Revue des matériaux de construction. (Cité pages xxvii, 10).

[10] **Manuel de Lafarge**

[11] **(F DE LARRARD)** *concrét mixture –proportioning-A scientific Approach-londres 1999*.

[12] **Belouadah M.**, « Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux

## *Références bibliographiques*

---

hautes températures » Thèse de doctorat en génie civil Université Mohamed Boudiaf, M'SILA le :2018 , pp. 26 28.

[13] **P.C. AITCIN, C., F. Autefage, A. carles-Macgreues., A. Vaquier.**, « comparative study of the cementitious of différent fly ashe », pp 91-114 - 1994.

[14] **KOSMATKA S.H., KERKHOFF B., PANARESSE W.C., MACLEOD N.F.,MCGRATH R.J., (2004)** Dosage et contrôle des mélanges de béton. Bulletin d'ingénierie EB101, Association canadienne du ciment, 7ème édition canadienne

[15] **De Larrard F.**, « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances »,Rapport de recherche LCPC, Paris, 1988, p. 335.

[16] **DJOBO YANKWA Jean Noël** , effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique

[17] . **A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane**( Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran)( Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers

[18] **R. Dron-** Mécanisme de la prise du laitier granule sous activation alcaline - Rapport de recherche n°38 LCPC (1974)Types de laitier de haut fourneau

[19] **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p..

[20] Document technique de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe sidérurgique d'EL HADJAR, 1989

[21] **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.

[22] Document technique du laboratoire de la cimenterie de HADJR SOUD, Décembre 2002.

[23] **ROPER H.**, « Composition, morphologie, hydratation et propriétés adhésives de quelques laitiers granulés », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 13 – 17

[24] **DEMOULIAN E., GOURDIN P., HAWTHORN F. et VERNET C.**, « Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulité » , 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 89 - 94.

[25] **MANTEL D. G.**, « Activity of five granulated blast furnace slag with eight different portland cements », ACI, Materials Journal, vol 91, n°5, 1994, 471 – 475.

## *Références bibliographiques*

---

- [26] **WOLTER A., FRISCHAT G.H. and OLBRICH E**, « Investigation of granulated blast furnace slag reactivity by Secondary Neutral Mass Spectrometry » (SNMS)
- [27] **MEHTA P K.**, 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp 1 – 43.
- [28] **SUJIN S., HAMLIN M. Gennings**, « Pore solution chemistry of alkali – activated ground granulated blast furnace slag », *Cem Con Res*, 29, 1999, pp 159 – 170.
- [29] **VAN EUW M.**, « Structure des laitiers et hydratation des ciments au laitier », 7ème Congrès International de la chimie des ciments, Volume 4, Thème 3, pp 63 – 84.
- [30] **MCKURDY K. G, STEIN H N.**, *Cem.Con. Res.*, 3, 1973, pp 247 – 262.
- [31] **Normes Françaises NF P 18 – 506**, « Addition pour béton hydraulique , laitier vitrifié moulu de haut fourneau », mai 1992.
- [32] **RUN ZHANG Y. and QIONG YING G.**, « Influence of structural features of slags on their hydraulic activity , *silicates industriels*, 12, 1982, p 279 – 281
- [33] **DRON R.**, « structure et réactivité des laitiers vitreux », thèse de doctorat ès sciences, Paris VI, janvier, 1984.
- [34] **OULI A.**, « Contribution à l'activation alcaline des laitiers de hauts fourneaux », Thèse Génie Civil, INSA Lyon, 1994, 153 p.
- [35] **DRON R. et BRIVOT**, « Approche du problème de la réactivité du laitier granulé », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Volume 2, Thème 3, p 134 – 139, Paris, 1980
- [36] **KONDO R. and UEDEA S.**, 5th ISCC, vol 2, 1969, p 203.
- [37] **REGOURD M., THOMAS J. H., BAILLEF P. and TOURAY J. C.**, « Blast furnace slag hydration surface analysis », *Cement and Concrete Research* 13, 1983, 549 - 556.
- [38] **DRON R.**, « Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline », Rapport de recherche LPC, 1973, n° 38.
- [39] **CHAPELLE**, « Attaque sulfocalcique des laitiers et pouzzolanes, *CERILH*, 1958, 63 p.
- [40] **KORTBAOUI A.**, « Introduction au laitier de haut fourneau et activation des laitiers par les alcalis: Caractérisation chimiques et mécaniques », projet de fin d'étude de session, université de Sherbrooke 1992, non paginé.

## *Références bibliographiques*

---

- [41] **D'ANS J., EICK H.**, « The system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O at 20 °C », Zement-Kalk-Gips, 1953, Vol.6, n° 9, pp 302 -311
- [42] **REGOURD M.**, « Structure and behaviour of slag portland cement hydrates », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 10.
- [43] **REGOURD M.**, « Les laitiers de haut fourneau », rapport principal du 8ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Rio, volume 1, thème 3, 1986, p 200 – 229
- [44] **REGOURD M., MORTUREUX B., GAUTIER E., HORNAIN H. et VOLANT J.**, « Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 105.
- [45] **FRIGIONE G., SERSALE R. et COLLELA C.**, « Manufacts obtained by compaction and hydrothermal treatment of granulated blast furnace slag, Silicates Industriels, 42, p 4 – 5, 1996.
- [46] **SATARINE.V I., VCHESTOPEROV S., SYRKINEY M., CHOKOTOVA B. G., ZDOROV A. I. et FEDWER L. A.**, « Intensification des processus de durcissement du ciment portland de laitier et perfectionnement de la structure du ciment durci », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, vol 2, thème 3, 1980, p 69.
- [47] **BEHIM M., REDJEL B., JAUBERTHIE R.**, « Réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment, Journal de Physique IV, 12, France, p223 – 228, 2002.
- [48] **DETRICHE C. H.**, « La maîtrise de la fissuration précoce: condition de la durabilité des ouvrages » , Durabilité des bétons, chapitre 4, presse de l'école nationale des ponts et chaussés, 1992, Paris, pp 107 – 128.
- [49] **SMOLCZYK H. G.**, « Structure et caractérisation du laitier », rapport principal du 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, P 1 - 16.
- [50] **DREUX G.** Nouveau guide du béton, Edition Eyrolles, 1998.
- [51] **DUVAL R. et HORNAIN H.**, « La durabilité des bétons vis à vis des eaux agressives », in la durabilité des bétons. Presses de l'ENPC, 1992
- [52] **:J.BARON** « Introduction à la durabilité des bétons »-La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussés, ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 23-40

## *Références bibliographiques*

---

- [53] :F.Randell « Le comportement des bétons dans les systèmes d'assainissement »-Thèse Doctorale, L'institut national des sciences appliquées de rennes,Génie33-125. Civil, JANVIER 2004, N° d'ordre D00-01, LMDC,INSA deToulouse, France
- [54] : **M, regourd** « La résistance du béton aux altérations physique et chimique »-le béton Hydraulique Connaissance et pratique, presse de l'imprimerie : la source D'or, dépôt légal : 2ème trimestre 1995, N : 5603, pp : 513-530.
- [55] : **ANDRA** « Les propriétés physiques mécaniques hydrodynamique, thermiques Des matériaux cimentaires », Tome3, les matériaux cimentaires « Référentiel Matériaux », CRP.AMAT.01.060/A, pp : 26-36.
- [56] **BAROGHEL – BOUNY V., (1994)** Caractérisation des pâtes de ciments et des bétons méthodes, analyse, interprétations. Publié par LCPC de Paris
- [57]: **Groupement Belge du béton** ; Technologie du béton, Edition 1998.
- [58] : **M.Vénuat** « Conseils et recommandations pour confectionner un béton Résistant à l'action agressive de l'eau de mer »-chapitre 6, la Pratique des ciments et des bétons.
- [59] : **ANDRA** « Réactivité chimique et durabilité », Tome 4-Les matériaux Cimentaires «Référentiel matériaux », CRP.AMAT.01060/A. Pp : 18-94.
- [60] : **ANDRA** « Evolution du PH et de la quantité de calcium en solutions lors de Lixiviation d'un ciment hydraté »-Réactivité chimique et durabilité, Référentiel matériaux, C.RP AMAT 1060 /A, LMDC, INSA, Toulouse, France, pp : 27-2
- [61].**BenaissaRahelasmaa,BouhaniaImen**,<< durabilité d'un mortier léger (Granulat pouzzolanique)>>,mémoire de master ,Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib,année 2015.
- [62] : **C.Vernet** « Stabilité chimique des hydrates, mécanisme de défense de béton Face aux agressions »- La durabilité de béton, presse de l'école nationale Des pont chaussés, ISBN-2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 137-150.
- [63] :**K.Hermann** « Résistance chimique », article 2002, Internet, pp :1-6.

## *Références bibliographiques*

---

- [64] : **M.Southanama** « Mécanisme proposer par les sulfates »-article-India institut Of thécnology, Chanai, India, School of civil engineering, RercheUniversity, USA.
- [65] : **M.Raoul** « Etude physico chimique d'altération et modification exposer aux Selsd'ammonium, article, University of east London, received 20 octobre 2001, accepted 9 July 2002.
- [66] : **ANDRA** « Les attaques chimiques couples »-Les matériaux cimentaires, Tome 4,INSA, LMDC, Toulouse, France, C.RP.AMAT 01060 /A, pp : 60.
- [67] : **R.Duval** « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage »-La Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 190-198
- [68] : **R.Duval** « Evolution de concentration en chlorures »-La durabilité des bétons, Presse de l'école national des ponts chaussés, pp : 198.
- [69] : « Concret durability »-article d'Internet,pp :1-14.
- [70] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N., (1991)** Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. ACI Materials Journal, V. 88, No. 4.
- [71] **THIERY M., (2006)** Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques.Études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 52.
- [72]: **M.THEIRY** ; « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires - prise en compte des effets cinétique et des modifications microstructurales et hydrique » ; thèse de doctorat soutenue en 2005 ; LCPC.
- [73]: **Y.F.HOUST** ;« carbonatation du béton et corrosion des armatures chantiers/suisse» ; 1989 ; 15 (6) :569-574.
- [74] **VÉNUAT M., (1989)**La pratique des ciments mortier et béton. Moniteur technique, Éditions du moniteur.
- [75] : **Pierre Claude –Aitcin** « Béton haute performance »-La durabilité du BHP- Editions Eyrolles,N°289166.dépôt légal, Janvier 2001,Paris,pp :563.
- [76] : **A.Carles, M.Abérubé** « La durabilité des face à l'alcali réaction »-La

## *Références bibliographiques*

---

Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 300-307.

[77] : **J.P.Ollivier** « Viser la durabilité »-béton bases et données pour leur formulation Editions Eyrolles, N°2434875, Dépôt légal, Janvier 1997, pp : 353-354.

[78] : **Tumidajski P.J. , Chang G.W., Philipose K.E.**, « An effective diffusivity for Sulphate Transport into concrete Research, Vol 25 No 6, 1995, pp : 1159.

[79] : **A.M.Amine, A.H.ALI, H, ALI, EL-Didamony**, durabilité of some portlandCementpastes in variouschloride solutions, ZKG international, N° 3, pp : 172-177 ,1997.

[80] **Ollivier J-P et Vichot A.** « La durabilité dans le contexte normatif européen », chapitre 7.La durabilité des bétons: Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leurenvironnement». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008 ; 251-267.

[81] **BOALLAG SAIDA.**« INFLUENCE DE LA CURE HUMIDE SUR LES CARACTERISTIQUES DU MORTIER ET BETON SOUS L'EFFET D'UN MILIEU AGRESSIF(CARBONATATION)». Thèse de doctorat, université MSILA2017.

[82] **BAROGHEL-Bouny V.** « Durabilityindicators: relevant tools for performance-basedevaluation and multi-levelprediction of durability». International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, 2006, mars 19-21.

[83] **AFGC (Groupe de travail).** «Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages». Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali Réaction, éd. AFGC, Bagnaux, 2004, 30-41.

[84] **AFPC-AFREM.** «Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité ». Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, 1997, décembre 11 -12.

[85] **GrandDuBé.** Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G.Arliquoie et H. Hornain, Presses des Ponts et Chaussées, 2007.

## *Références bibliographiques*

---

[86] **ROZIERE E.** « Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle ». Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes, 2007.

[87] **LCPC.** « Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne ». Méthode d'essai LPC n° 66.

[88] **PAVOINE A.** « Évaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite ». Thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie Paris VI, 2003.

[89] **KASSOUMI L, AIT ELAAL M, OUALI A, ESSAMOUD R, et GHAFIRI A.** « Approche performantielle et prédictive du béton des ouvrages d'art sur la base d'indicateurs de durabilité » Département de Géologie, Faculté des sciences Ben M'sik, Université Hassan II – Mohammadia, Maroc.

[90] : **NORME FRANCAISE** « Classification des environnements agressifs »-fascicule De documentation publier par l'afumer en juin 1992.