



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ «Abbès LAGHROUR» DE KHENC HELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département de Sciences de la matière

**Spécialité : chimie analytique**

# **Durabilité du béton vis-à-vis les agents agressifs de ces constituants**

Réalisé par : - Ghodbane Youcef Amine

Dirigé par : Dr BAKHA HANI

- Boutarfa Khadija

Membres de jury :

Trouch Ahmed	MA A. Président
Badis Zakaria	MAA . Examineur

**Année universitaire 2018-2019**

# DEDICACES

Au nom D'Allah, Le Tout Miséricordieux,

Nous avons l'honneur d'être dirigé par l'enseignant BAKHA HANI dans ce mémoire. Nous avons bénéficié, grâce à lui, non seulement sur le plan scientifique, mais aussi sur le plan humain. On tient à lui témoigner toute notre gratitude pour l'aide et le temps précieux qu'il nous a apportés.

Nous adressons nos remerciements les plus respectueux à l'enseignant Mr. Aichi Mohamed qui nous a fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous remercions également les enseignants Mr. Trouche Ahmed d'avoir accepté faire partie du jury de notre soutenance. Leurs idées seront sans nul doute très utiles pour la suite.

Sans oublier tous les étudiants de ma promotion du Master 2018/2019, ainsi que l'administration de la science de matière

De ma part Ghodbane Youcef, à la mémoire de mon père, à ma chère mère, et mes amies

Je tiens à exprimer personnellement moi Boutarfa Khadija, tout au fond de mon cœur

Mes reconnaissances à mon père et ma mère qui m'ont offert toujours un appui sûr par leur soutien et leur encouragement. C'est grâce à leur amour éternel que je peux franchir les obstacles les plus difficiles,

Ainsi que toute ma famille. Mes plus vifs remerciements sont également adressés à tous mes amis sans exceptionnel

## Liste des figures :

Chapitre I : Présentation des matériaux cimentaires :

Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.....	2
Figure I -2 : Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre .....	4
Figure I -3 : Les constituants du ciment.....	4
Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker.....	5
Figure I -5: Flux thermique dégagé par une pate de ciment Portland en cours d'hydratation.....	10
Figure I -6 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) . .....	12
Chapitre II : Les attaques chimiques du béton :	
Figure II -1 : Localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain.....	18
Figure II -2 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. ....	19
Figure II -3 : L'origine des sulfates (interne ou externe). ....	20
Figure II -4 : L'attaque par les sulfates. ....	21
Figure II -5 : La formation de l'ettringite secondaire.....	22
Figure II -6 : Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates.....	23
Figure II -7 : Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> à 10%).....	25
Figure II -8 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.....	26
Figure II -9 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.....	27
Figure II -10 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage. (Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures).....	31
Figure II -11: L'attaque par les acides. ....	38
Figure II -12 : Eprouvettes cubiques 50x50x50mm immergées dans la solution acide.....	39
Figure II -13: perte relative de masse de pâtes de ciment (E/C = 0,27) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acides organiques (maintenue à pH 4) simulant un lisier de porc .....	41
Figure II -14: Quelques photos d'ouvrage en BA dégradés par l'eau de mer.....	44

Figure II -15 : représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer, d'après Mehta.....	45
Figure II -16: Conditions d'exposition en environnement marin.....	46
Figure II -17 : Les différentes actions de l'eau de mer sur le béton. ....	49
Figure II -18 : Agression du béton par activité des chlorures. ....	52
Figure II -19 : mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures.....	54
Figure II -20: Schéma de l'attaque des structures par les chlorures via les fissures ou la porosité. ....	56
Figure II -21: Essai de migration.....	57
Figure II -22: Cellule de migration en régime permanent.....	58
Figure II -23: Cellule de migration en régime transitoire (LMDC standard). ....	59
Figure II -24 : Coefficient de diffusion en fonction du Type de Ciment.....	60
Figure II -25: Coupe théorique d'un mur en béton. ....	62
Figure II -26: mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . ....	63
Figure II -27: Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée.....	64
Figure II -28: Corrosion des armatures suite à la carbonatation du béton d'un pilotis.....	65
Figure II -29: Essai de carbonatation accélérée.....	66
Figure II -30 : Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone carbonatée (incolore) par la phénolphthaléine.....	67
Figure II -31: Exemples de détériorations dues à la corrosion des poteaux en béton armé dans une bâtisse à Mascara (Photo A.Bensafir).....	70
Figure II -32 : Processus de corrosion dans le béton armé. ....	71
Figure II -33: Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton.....	71
Figure II -34: Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps.....	74
Figure II -35: Schéma de la cinétique de corrosion des armatures dans le béton.....	75
Figure II -36 : effets de la corrosion au niveau des angles des constructions.....	78
Figure II -37 : dispositions constructives permettant d'éviter la stagnation d'eau.....	79
Figure II -38 : Principe du drain.....	83
Figure II -39 : Dégagement de la coupure de capillarité.....	84
Figure II -40 : facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction.....	86
Figure II -41 : Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction.....	87

Figure II -42 : Schématisation des évolutions comparées de la dégradation et de la résistance à la pénétration de lithium.....	94
Figure II -43: représentation schématique de la dégradation d'une p <sup>â</sup> t e de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure déionisée stabilisée à pH 7.....	98
Figure II -44 : Photo des deux dispositifs expérimentaux de lixiviation à pH constant.....	99

**Liste des symboles :**

SiO<sub>2</sub> : Silice

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alumine

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Ferrite

MgO : Magnésie

CO<sub>2</sub>: Dioxide de carbone

CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O: Gypse

Mg (OH) 2: Brucite

K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Arcanite

K<sub>3</sub>Na (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Aphtitalite

Ca<sub>2</sub>K<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>: Langbeinite

(C<sub>4</sub>AH<sub>x</sub> et C<sub>3</sub>ACASO<sub>4</sub>H<sub>12</sub>):Aluminates hydraté

C-S-H : Silicates de calcuim hydratés.

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Acidesulfurique

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Sulfate de sodium

C<sub>3</sub>S: Silicate tricalcique

C<sub>2</sub>S: Silicate bicalcique

C<sub>3</sub>A: Aluminate tricalcique

C<sub>4</sub>AF: Ferroaluminatetricalcique

Ca (OH)<sub>2</sub>, (CH) : Hydroxyde de calcuim (Portlandite)

CaO : Chauxlibre.

CaCO<sub>3</sub> : Calcite

CaCl<sub>2</sub> : Chlorure de calcium

NaCl : Chlorure de sodium

CH<sub>3</sub>COOH : Acide acétique

C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub> : Acide lactique

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	12
---------------------------	----

## chapitre I

Introduction : .....	4
I -1) Définition du ciment : .....	4
I -2) Etapes de fabrication du ciment Portland : .....	4
I -3) Les constituants du ciment : .....	7
I -4) L'hydratation du ciment : .....	11
I -5) Les mécanismes élémentaires d'action de l'eau : .....	11
I -6) Mécanisme et réactions d'hydratation: .....	12
I -7) Produits d'hydratation : .....	16
I -8) Les différents types de ciment : .....	16
I -9) Les constituants du béton (l'eau et les granulats): .....	17
I -10) Conclusion : .....	19

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

II -1) Les attaques sulfatiques: .....	21
II -1-1) Introduction : .....	21
II -1-2) Définition de l'attaque sulfatique : .....	22
II -1-3) Sources des sulfates : .....	23
II -1-4) Mécanismes d'attaques: .....	25
II.1.4.1 Les deux types d'interactions chimiques. ....	26
II.1.4.2 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton .....	28
II -1-5) Processus d'attaque par les sulfates internes : .....	28
II -1-6) Processus d'attaque par les sulfates externes : .....	29
II -1-7) Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton : .....	31
II -1-8) Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques :.	33
II -1-8-1) Essais de résistance aux attaques sulfatiques externes : .....	33

II -1-8-2) Essais de résistance aux attaques sulfatiques internes : .....	34
II -1-9) Mesures de préventions contre les ions sulfates : .....	35
II -1-10) Conclusion : .....	35
II -2) Attaque par les acides : .....	35
II -2-1) Introduction : .....	35
II -2-2) Définition : .....	36
II -2-3) Les différents types des acides : .....	37
II -2-4) Mécanisme d'attaque des acides : .....	39
II -2-5) Revue des essais : .....	43
II -2-6) Moyens de protection contre les acides : .....	45
II -2-7) Conclusion : .....	47
II -3) Les dégradations dues à l'eau de mer : .....	47
II -3-1) Introduction : .....	48
II -3-2) Définition de l'attaque marine : .....	49
II -3-3) L'eau de mer, du point de vue chimique : .....	51
II -3-4) Les mécanismes d'attaques par les eaux de mer : .....	52
II -3-5) Les paramètres qui conditionnent la durabilité des bétons en milieu marin : .....	55
II -3-6) Essai de tenue à l'eau de mer : .....	55
II -3-7) Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin : .....	55
II -3-8) Conclusion : .....	56
II -4) Attaque par les ions chlorures : .....	56
II -4-1) Introduction : .....	56
II -4-2) Définition de l'attaque par les ions chlorures : .....	57
II -4-3) Source de l'attaque des ions chlorures : .....	58
II -4-4) Mécanisme d'attaque des ions chlorures : .....	58
II -4-5) L'attaque des structures par les chlorures via les fissures ou la porosité : .....	60
II -4-6) Les essais de pénétration des ions de chlorures : .....	61

II -4-7) Influence de la microstructure et des additions minérales sur l'attaque des chlorures .....	64
II -4-8) Précaution contre la pénétration des ions chlorures :.....	64
II -4-9) Conclusion : L'attaque par les ions chlorures est illustrée dans le tableau suivant : ...	65
II -5) La carbonatation : .....	65
II -5-1) Introduction : .....	65
II -5-2) Définition de la carbonatation : .....	66
II -5-3) Mécanisme de la carbonatation : .....	67
II -5-4) Les conséquences de la carbonatation :.....	69
II -5-6) Possibilité de ralentir la progression de la carbonatation : En :.....	70
II -5-7) Les essais sur la carbonatation : .....	70
II -5-8) Techniques d'investigation : .....	72
II -5-9) Méthodes d'assainissement et actions préventives : .....	72
II -5-10) Conclusion : .....	73
II -6) Corrosion des armatures : .....	74
II -6-1) Définition de la corrosion: .....	74
II -6-2) Processus de la corrosion :.....	77
II -6-3) Les deux étapes de la corrosion :.....	79
II -6-4) Facteurs influents de la corrosion :.....	81
II -6-5) Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :.....	82
II -6-6) Investigation de la corrosion in situ :.....	83
II-6-7) Prévention et réhabilitation :.....	83
II-6-7.1) Prévention. Mesures constructives : .....	83
II-6-7.2) Requalification des ouvrages en béton armé : .....	85
II-6-7.3) Méthodes de réhabilitation .....	86
II-6-8) Quelques solutions pratiques pour protéger les fondations contre la corrosion :.....	88
II-6-9) Conclusion : .....	89

II -7) L'alcali-réaction : .....	90
II -7-1) Introduction : .....	90
II -7-2) Définition : .....	90
II -7-3) Les différents types d'alcali-réaction : .....	90
II -7-4) Conditions d'apparition de l'alcali-granulat : .....	91
II -7-5) Source de cette attaque : .....	92
II -7-6) Pathologie et manifestations externes : .....	92
II -7-7) Mécanisme de l'alcali-réaction : .....	93
II -7-8) Les méthodes d'essais de qualification des granulats : .....	94
II -7-9) Traitements de protection et de réparation : .....	97
II -7-9.1) Assèchement du béton : .....	97
II -7-9.2) Imprégnation par des agents chimiques inhibiteurs : .....	98
II -7-9.3) Relâchement des contraintes : .....	99
II -7-9.4) Renforcement par des armatures : .....	99
II -7-10) Conclusion : .....	100
II -8) La lixiviation en eau douce : .....	100
II -8-1) Définition : .....	100
II -8-2) Mécanisme : .....	101
II -8-3) Conséquences générales : .....	102
II -8-4) Essai de lixiviation à pH constant : .....	103
II -8-5) Les critères de résistance à l'agression par les eaux naturelles : sont : .....	103
II -8-6) Conclusion : .....	104

### **Chapitre III: Résultats et discussions**

III.1./Résultat De La Caractérisation à l'état durcis: .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.A/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) .....	108

III.2.A/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :.....	109
III.1.B/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : .....	110
III.2.B/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) : .....	111
III.1.C/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : .....	112
III.1.D/ La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : .....	113
III.2.D/ La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) : .....	114
III.1.E/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : Teiouelt) : .....	115
III.2.E/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) : .....	116
III.1.F/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : .....	117
III.2.F/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) : .....	117
Conclusion générale .....	119

# Introduction

## **Introduction :**

Développé sans cesse depuis la fin du XIXe siècle, le béton armé est aujourd'hui le matériau de construction le plus répandu dans le monde. Si le béton a la capacité de résister aux attaques chimiques, encore faut-il connaître à quelles conditions ? et comment ? car il existe pourtant des situations où les ouvrages en béton armé se dégradent plus vite ou plus sévèrement que prévu suite à des différents facteurs qu'on a présenté dans ce mémoire. Ainsi, les méthodes de diagnostic des ouvrages permettent de quantifier, par croisement de différentes techniques, l'état de dégradation dû aux attaques chimiques. Selon l'état d'avancement des dommages, des mesures préventives, de réhabilitation, seront utilisées afin de garantir la sécurité de l'ouvrage.

La durabilité du béton, armé ou non, dans les conditions agressives, est devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré. C'est dans ce cadre que s'insère la présente étude.

Nous avons donc cherché à comprendre le comportement des matériaux cimentaires face aux attaques chimiques.

L'objectif de ce mémoire est de rappeler, bien définir, étudier et expliquer les bases scientifiques et techniques nécessaires à la compréhension des phénomènes qui interviennent dès lors que l'on mélange une poudre de ciment avec de l'eau pour conduire à ce qui constituera la phase liante du béton. Bien que cette transformation d'une suspension de particules en un solide dur et résistant soit assez extraordinaire, elle obéit à des règles simples qu'il convient de bien garder en tête parce qu'elles vont également fixer la durabilité du béton. Cette étude est basée sur les attaques chimiques des bétons, ainsi il est nécessaire de les définir, chercher leurs ressources, expliquer leurs mécanismes et donner les solutions qui existent.

# Chapitre I : Généralités

## sur le béton

## Chapitre I : Généralités sur le béton

### Introduction :

Les matériaux cimentaires sont les matériaux les plus utilisés au monde. Ce sont essentiellement eux qui façonnent notre environnement. Voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, édifices historiques, rien n'échappe à leur omniprésence.

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires comme le béton. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau béton. La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel va être exposé durant sa durée de vie. [1]

### I -1) Définition du ciment :

Bien que déjà utilisé par les Romains, le béton a eu le développement qu'on lui connaît grâce à la découverte du ciment Portland au XIXe siècle. Celui-ci a été breveté par « Aspdin » sur la base des travaux de Louis Vicat sur les chaux hydrauliques. [10]

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc. [8]

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes :

$\text{CaO} = \text{C}$  ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$  ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$  ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$  ;  $\text{SO}_3 = \text{s}$  ;  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$  [24]

### I -2) Etapes de fabrication du ciment Portland :

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

Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker.

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

Le processus de fabrication de ciment Portland est schématisé dans la figure I -1:

## Chapitre I : Généralités sur le béton

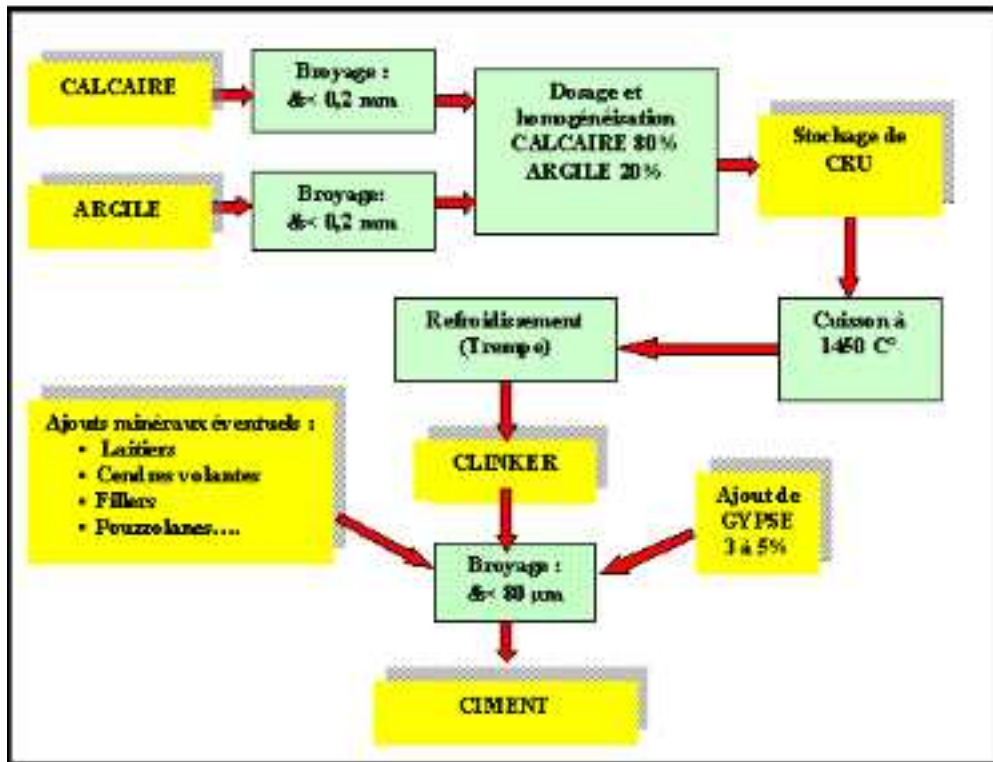


Figure I -1: Etapes de fabrication du ciment.

### A- Extraction et préparation des matières premières:

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

Pour l'extraction de calcaire dur on utilise des explosifs, et pour le calcaire tendre on utilise des engins comme le bulldozer, scrapeur....etc. Et pour l'argile on utilise l'excavateur ou pelle mécanique.

Le transport de ces matières à l'usine est assuré le plus souvent par des grands camions où à l'aide de convoyeurs à bandes. L'ensemble des matières premières après leurs concassages, sont stockées dans des réserves. Pour la préparation de cru, les matières premières repris de stock, dosées et éventuellement pré homogénéisées, sont envoyées dans des broyeurs qui les réduisent en poudre à grains. Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec), ou en présence d'eau (procédé humide) qui est pratiquement abandonné pour sa forte consommation d'énergie lors de la cuisson.

## Chapitre I : Généralités sur le béton

B- Cuisson: Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6 mètre de diamètre et de 50 à 150 mètre de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5° de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450 C° ; en s'approchant de cette zone, le cru subit des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le « clinker ». Les réactions chimiques de transformation de cru dans le four, sont comme suit :

- jusqu'à 100°C : évaporation de l'eau libre.
- T > 100°C : Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- T > 600°C : Décomposition des matières argileuses. (Silice SiO<sub>2</sub>, Alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ferrite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- T > 850°C : Décarbonatation du calcaire.  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- T > 900°C : Commencement des processus d'interaction et de combinaisons chimiques entre la chaux (CaO) et les oxydes d'argile (Silice SiO<sub>2</sub>, Alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ferrite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- T = 1450°C : Clinkérisation.

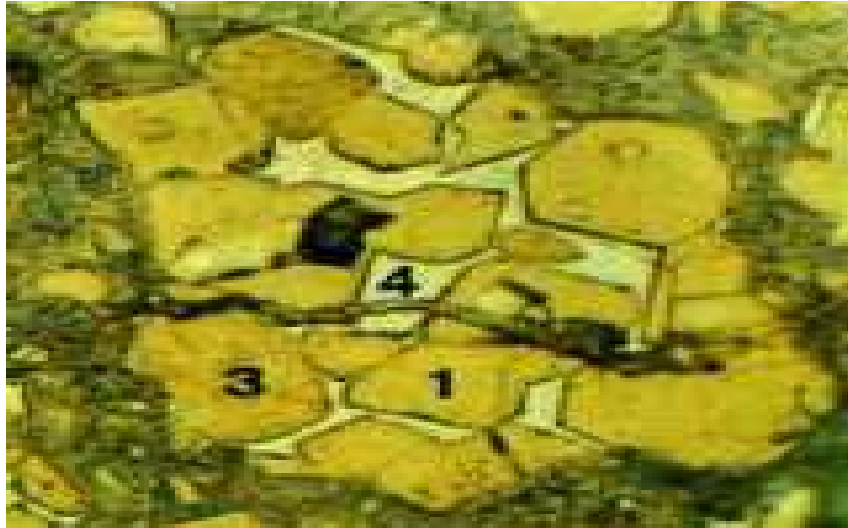
A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

### C- Broyage :

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

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

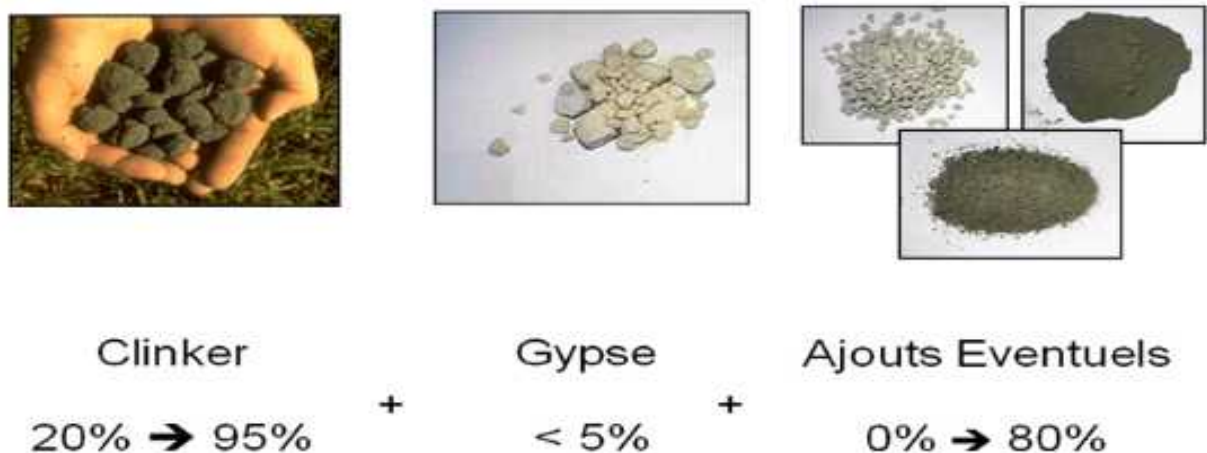
## Chapitre I : Généralités sur le béton



**Figure I -2 :** Grains polycristallins d'un ciment Portland anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par  $\text{HNO}_3$ ) :  
1 =  $\text{C}_3\text{S}$  ; 3 =  $\text{C}_2\text{S}$  ; 4 =  $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$

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

### I -3) Les constituants du ciment :



**Figure I -3 :** Les constituants du ciment.

## Chapitre I : Généralités sur le béton

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants : Le clinker, le gypse et les ajouts minéraux actifs :

I -3-1) Le clinker : C'est un mélange fritté de calcaire et d'argile .Ce mélange après cuisson forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm et s'appelle : Clinker.

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

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

Les oxydes indiqués plus haut ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ne se trouvent pas à l'état libre dans le clinker mais au cours de la cuisson du cru (calcaire + argile) quatre minéraux se forment (figure I-4) :

v  $\text{C}_3\text{S}$  ..... ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) Alite

v  $\text{C}_2\text{S}$  ..... ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) Belite

v  $\text{C}_3\text{A}$  .....( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) Aluminate tricalcique

v  $\text{C}_4\text{AF}$ ..... ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Céliste.

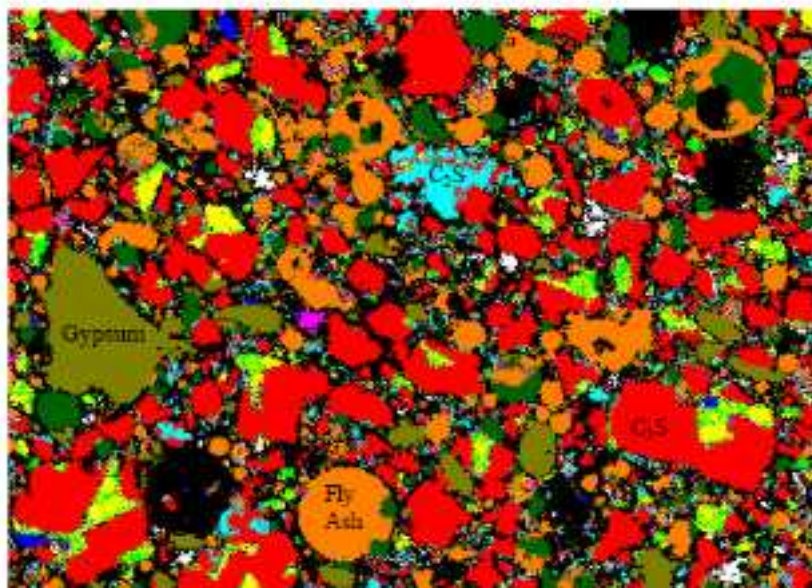


Figure I -4 : Microphotographie d'un clinker.

## Chapitre I : Généralités sur le béton

Les couleurs sont les suivantes : noir = porosité, rouge =  $C_3S$ , bleu clair =  $C_2S$ , vert =  $C_3A$ , orange =  $C_4AF$ , vert = sulfates de calcium, jaune =  $K_2SO_4$  et blanc =  $CaO$ .

I-3-2) Le gypse ( $CaSO_4$ ) :

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

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ ). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en  $C_3A$  dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

I-3-3) Ajout minéral actif :

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

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique. [5]

Parmi les ajouts les plus utilisés, on mentionne :

A- Les laitiers de haut-fourneau : On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de  $CaO$ ,  $MgO$  et  $SiO_2$ , le reste contenant  $Al_2O_3$  et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche. Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates ( $AC_2H_7$ ) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite) . [8]

## Chapitre I : Généralités sur le béton

B- Les cendres volantes : Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse (Cendres volantes siliceuses (V)) ou silico-calcaire (Cendres volantes calcaïques (W)). Les premières ont des propriétés pouzzolaniques; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme [36].

C- Les fumées de silice : La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium.

Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$  et composées de silice amorphe (>85%). Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

D-Les Pouzzolanes : Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolaniques (argiles ou schistes par exemple).

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés.

[8]

## Chapitre I : Généralités sur le béton

### I -4) L'hydratation du ciment :

Les quatre composés principaux du clinker sont : le silicate tricalcique noté  $C_3S$ , le silicate bicalcique ou  $C_2S$ , l'aluminate tricalcique  $C_3A$  et l'aluminoferritetétracalcique  $C_4AF$ . En présence d'eau, ces composés vont réagir et former les principaux hydrates de la pâte de ciment, à savoir : le silicate de calcium hydraté ou C-S-H, la portlandite  $Ca(OH)_2$ , le trisulfoaluminate de calcium appelé aussi ettringite (noté AFt) et le monosulfoaluminate (noté  $AF_m$ ). Les réactions chimiques d'hydratation du ciment se font essentiellement à partir des quatre phases minérales du clinker  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ . [8]

### I -5) Les mécanismes élémentaires d'action de l'eau :

Ils sont divers : ce sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation [39].

#### a. L'adsorption :

Phénomène physique ou chimique par fixation de l'eau sur les grains de ciment, il existe deux types d'adsorption :

- L'adsorption physique : elle résulte de l'association des forces de Van der Waals présentant des faibles énergies. Elle ne modifie pas de façon importante l'état électronique de la molécule absorbée. Elle est réversible et peut superposer une ou plusieurs couches de molécules d'eau à la surface du solide.
- L'adsorption chimique : elle implique un transfert ou une mise en commun d'électrons. Les énergies peuvent être importantes et les liaisons ont un caractère plus permanent que dans l'adsorption physique.

#### b. L'hydrolyse :

On entend par hydrolyse, la réaction de transformation du solide et de décomposition de l'eau.

#### c. La dissolution :

Ainsi nomme-t-on le processus de changement d'état du solide ionique (ciment) en présence d'un solvant (eau). Dans les réseaux cristallins des solides ioniques, la position des atomes dépend des résultantes des forces d'attraction ou de répulsion des ions avoisinants. Ces ions empilés constituent un édifice cristallin très stable. La dissolution entraîne une rupture des liaisons ioniques et la dispersion des ions dans le solvant.

#### d. la solvataion :

## Chapitre I : Généralités sur le béton

Elle correspond à un enveloppement par des molécules d'eau des cristaux anhydres dispersés après dissolution. Les solvates peuvent être constitués de particules colloïdales qui forment une suspension ou «sol ». Lorsque la masse des particules du sol est suffisante, il en résulte la formation spontanée d'un «gel».

e. La cristallisation :

L'apparition et la croissance de germes conduisent à la cristallisation de phases solides.

- La germination représente le processus aléatoire qui aboutit à la formation d'amas ordonnés. Les ions en solution forment des assemblages ou germes au hasard de leur rencontre. Ces assemblages deviennent stables et donnent naissance à un embryon à partir d'une taille critique.

Le germe devra grossir, sinon il perdra son individualité et retournera à l'état liquide.

Le germe ne se développera qu'avec un espace et une durée suffisante.

- La croissance du germe à partir d'un embryon s'opère par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide - cristal.

La vitesse de croissance du germe dépend de plusieurs facteurs : température, conductibilité thermique, saturation de la solution, gradient de concentration, etc.....

### I-6) Mécanisme et réactions d'hydratation:

Lorsque le ciment est au contact de l'eau, les réactions au cours du gâchage forment des CSH en libérant des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ , ces deux espèces se combinent et forment la portlandite.

Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes :

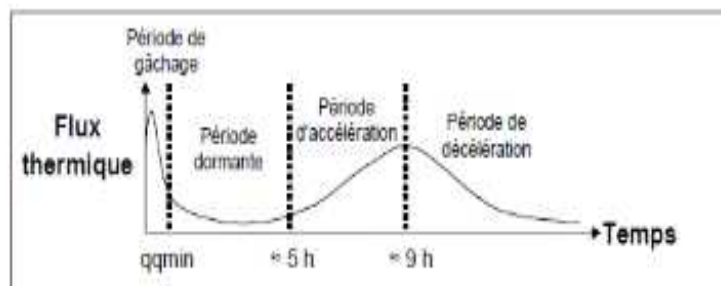


Figure I - 2 : Flux thermique dégagé par une pâte de ciment Portland en cours d'hydratation

**Figure I -5:** Flux thermique dégagé par une pate de ciment Portland en cours d'hydratation. [8]

## Chapitre I : Généralités sur le béton

Dans sa thèse, Barcelo [40] décrit ces 5 périodes de la manière suivante :

- Période 1 : réactions initiales (réaction quasi-instantanée et fortement exothermique, provoquant un premier pic de dégagement de chaleur. Cette première réaction consomme moins de 1 % de  $C_3S$ ). Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions  $(SiO_4)^{4-}$  qui sont en surface des grains passent en solution (sous la forme de complexes  $(H_2SiO_4)^{2-}$  ou  $(H_3SiO_4)^{-}$ ). La présence de ces ions fait alors augmenter la conductivité du milieu. Une couche protectrice de C-S-H se forme alors autour des grains ne permettant plus la réaction entre les silicates et l'eau.

-Période 2 : (période d'induction) Durant cette période (appelée aussi période dormante) il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur (Cette étape permet notamment le transport du béton ou du mortier avant qu'il ne fasse prise) Durant cette période, la concentration en calcium croît alors que celle en silice décroît. La conductivité augmente toujours, mais plus faiblement que dans la 1<sup>ère</sup> période. Ainsi, il apparaît que des C-S-H dits métastables (C-S-H (m)) continuent de se former autour des grains de  $C_3S$  alors que la portlandite ne précipite pas. Cette période peut varier considérablement d'un type de mélange à l'autre.

-Période 3 : (période d'accélération) Cette période est marquée par un fort dégagement de chaleur ce qui se traduit par une activité chimique intense. En général, c'est durant cette période que survient la prise. Deux types de réactions mènent à la formation des C-S-H dits stables (C-S-H(s)) et de la portlandite : soit par l'hydroxylation des C-S-H(m), soit par celle des  $C_3S$ . La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle, ce qui se traduit alors par une baisse de la conductivité.

-Période 4 : (période de décélération) La couche d'hydrates formée ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion. L'eau diffuse dans le matériau afin d'atteindre les composants anhydres du système, ralentissant alors considérablement la cinétique d'hydratation. Ceci correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. De même que pour la 3<sup>ème</sup> période, plus les hydrates se forment, moins il y a d'ions dans la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité.

Période 5 : (période de consolidation) Le ralentissement, dû au caractère diffusionnel de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années. Cette période va permettre au béton de mûrir et à ses caractéristiques d'atteindre leurs valeurs maximales en terme de

## Chapitre I : Généralités sur le béton

résistance ou de durabilité, la microstructure continue de se densifier. Les C-S-H ainsi que les cristaux de portlandite continuent de se former et de remplir la porosité.

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates :

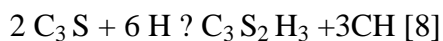
A-Hydratation du silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) (alite) :

Le C<sub>3</sub>S est le constituant majeur du clinker (50 à 70% de sa masse). Le C<sub>3</sub>S confère rapidement au ciment une résistance élevée, son hydratation n'évolue pratiquement plus après 28 jours. La réaction du C<sub>3</sub>S avec l'eau conduit à la formation de deux composés :

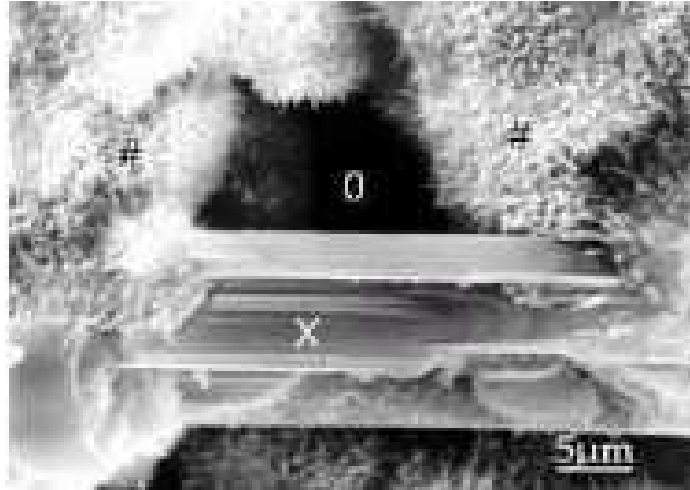
- Du silicate de calcium hydraté ou CSH (Calcium Silicate Hydraté), composé non stoechiométrique, dont le rapport CaO/SiO<sub>2</sub> varie autour de 3/2. Les forces de Vander Walls sont en partie responsables de la cohésion du gel CSH. Les CSH assurent les caractéristiques de cohésion des matériaux cimentaires et contribuent essentiellement à la résistance mécanique.

- La portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> ou CH qui est un composé défini bien cristallisé, sous forme de larges feuillets hexagonaux, joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique. En présence de matériaux à propriétés pouzzolaniques, la portlandite se combine avec SiO<sub>2</sub> pour former du C-S-H cela entraîne une augmentation de la résistance du mélange. La portlandite (hydroxyde de calcium, Ca(OH)<sub>2</sub>) occupe 20-25 % du volume de la pâte hydratée de ciment, c'est un produit soluble qui assure la stabilité du tampon basique des ciments (pH < 12,4). Cela crée un milieu favorable aux armatures métalliques.

La réaction d'hydratation des silicates tricalciques peut être représentée, sans prendre en considération la complexité de la réaction, par l'équation suivante :



## Chapitre I : Généralités sur le béton

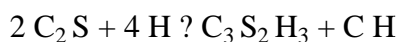


**Figure I -6 :** CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) . [3]

### **B-Hydratation du silicate bicalcique C<sub>2</sub>S (bélite) :**

Il représente 15 à 30% de la masse du clinker. Les mécanismes et les produits d'hydratation du silicate bicalcique sont similaires à ceux dérivés de C<sub>3</sub>S. En revanche, son hydratation est généralement plus lente et la production de portlandite plus faible il permet au contraire d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme .

Lorsque le ciment est au contact de l'eau, les réactions au cours du gâchage forment des CSH en libérant des ions Ca<sup>2+</sup> et OH<sup>-</sup>, ces deux espèces se combinent et forment la portlandite.



### **C-Hydratation du C<sub>3</sub>A:**

Le C<sub>3</sub>A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>) qui se transforment en un aluminat de calcium hydraté C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>.

L'aluminat tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. En l'absence de gypse, l'hydratation du C<sub>3</sub>A est extrêmement rapide, exothermique et perturbe l'hydratation des silicates. Il s'en suit un phénomène de prise très rapide, empêchant la mise en œuvre du matériau. Pour remédier à cela, les cimentiers incorporent systématiquement du gypse dans la composition de leur ciment. Ainsi, la réaction des aluminates avec le sulfate contenu dans le gypse, forme de l'ettringite (AF<sub>t</sub>) (tri sulfo-

## Chapitre I : Généralités sur le béton

aluminat de calcium hydraté) qui précipite en masse autour du grain de  $C_3A$  et inhibe sa dissolution. Celle-ci, une fois le gypse totalement consommé, se décompose pour former du monosulfoaluminat ( $AF_m$ ). La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de  $C_3A$  par rapport au gypse.

D-L'hydratation du  $C_4AF$  :

L'hydratation du  $C_4AF$  est semblable à celle du  $C_3A$ , mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du fer. Les produits de réactions sont les mêmes que ceux issus du  $C_3A$  en substituant aux aluminates des alumino-ferrites. Le  $C_4AF$  a pour rôle de réduire la température de formation du clinker, il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance mécanique.

### I -7) Produits d'hydratation :

Une pâte de ciment Portland hydraté contient approximativement 15 à 25 % (en masse) de portlandite, 60 à 70 % de C-S-H et 5 à 15 % de phases aluminates.

Lorsque le gypse est totalement consommé, la solution devient sous saturée par rapport à l'ettringite. Celle-ci se dissout et devient la nouvelle source de sulfate pour former avec l'aluminat excédentaire un nouveau composé : le monosulfoaluminat de calcium hydraté.

L'hydratation du  $C_3S$  et  $C_3A$  provoque un effet thermique important dès les premières échéances. Sur chantier, l'élévation de température dans les pièces massives peut atteindre 10°C (dalles routières) voire 30°C (barrages) ou plus dans certaines pièces massives. [8]

### I -8) Les différents types de ciment :

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants :

Les ciments portlands : CEM I Ces ciments contiennent au moins 95 % de clinker.

Les ciments portlands composés : CEM II On distingue deux catégories de CEM II :

- les CEM II/A qui contiennent plus de 80 % de clinker et moins de 20 % de constituants

Secondaires ;

- les CEM II/B dont les valeurs sont respectivement plus de 65 % de clinker et moins de 35 % de constituants secondaires.

Les ciments de hauts fourneaux : CEM III Ces ciments sont subdivisés en trois catégories selon leur teneur en laitier : les CEM III/A (de 36 à 65% de laitier), les CEM III/B (de 66 à 80 % de laitier) et les CEM III/C (de 81 à 95 % de laitier).

## **Chapitre I : Généralités sur le béton**

Le reste des constituants est du clinker avec éventuellement un filler dans la limite de 5% de l'ensemble des constituants.

Les ciments pouzzolaniques : CEM IV On distingue également deux catégories :

- les CEM IV/A qui contiennent plus de 65 à 90 % de clinker ;
- les CEM IV/B dont la valeur est de 45 à 64 % de clinker.

Le reste des constituants sont des ajouts pouzzolaniques avec éventuellement un filler dans la limite de 5 %. Les ajouts pouzzolaniques peuvent être des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des cendres volantes siliceuses.

Les ciments au laitier et aux cendres : CEM V Ils sont subdivisés en deux catégories selon leur teneur en laitier de haut fourneau et de pouzzolanes naturelles ou de cendres volantes siliceuses : les CEM V/A (de 18 à 30 %) et les CEM V/B (de 31 à 50 %). [24]

### **I -9) Les constituants du béton (l'eau et les granulats):**

#### **A- Les granulats :**

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

Fillers ; sablons ; sables ; graves ; gravillons ; ballast ; enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

Différents types de granulats :

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

- Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

## Chapitre I : Généralités sur le béton

- Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

- Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments. [23]

Un sable ou un gravier utilisé en génie civil se caractérise notamment par sa courbe granulométrique. Elle donne la distribution de la taille des granulats en pourcents de la masse totale du tamisât. Elle est utile pour la composition de mélanges et permet de définir certains paramètres caractéristiques de distribution : diamètre du plus petit grain ( $D_{\min}$ ), du plus gros ( $D_{\max}$ ), etc. Le sable par exemple ne doit pas excéder 6 mm.

### B- Le Sable :

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

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

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique. [23]

### C- L'eau :

Le rôle de l'eau est d'abord d'hydrater le ciment pour donner un matériau cohésif. Elle sert aussi de lubrifiant lors de gâchage des constituants. Ainsi ajuste-t-on sa quantité afin d'obtenir une pâte homogène et facilement « ouvrable » [37]. De par ce rôle de lubrifiant, l'eau se trouve généralement en excès vis-à-vis de la réaction d'hydratation : On utilise couramment des quantités d'eau de l'ordre de 0.5 en rapport massique (E/C), alors que l'hydratation complète ne nécessiterait qu'un E/C d'environ 0.35 [38]. Ce rapport prend en compte : les proportions stoechiométriques des réactions d'hydratations, qui indiquent que la proportion massique d'eau liées aux hydrates correspond environ à 20% de la masse initial de ciment, et la quantité d'eau nécessaire pour remplir l'espace interfeuillet des hydrates, soit environ 15% d'eau libre, sans laquelle la réaction d'hydratation est incomplète.

## **Chapitre I : Généralités sur le béton**

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

### **I -10) Conclusion :**

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

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

# Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. [5]

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en **trois catégories** :

- A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton. [4]

### II -1) Les attaques sulfatiques:

#### II -1-1) Introduction :

En Algérie, les sulfates sont très répandus dans les sous-sols et les eaux souterraines. La localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain est présentée sur la figure II.1.

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

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -1** : Localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain. [1]

Dès les années 1950, les premières réglementations, un peu par tout dans le monde, en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique, recommandaient l'utilisation de ciment à faible rapport E/C, à taux de  $C_3A$  limité et à ajouts pouzzolaniques accrus. Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates réactifs et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne. [1]

### II -1-2) Définition de l'attaque sulfatique :

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

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé. [1]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -2 :** Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [2]

### II -1-3) Sources des sulfates :

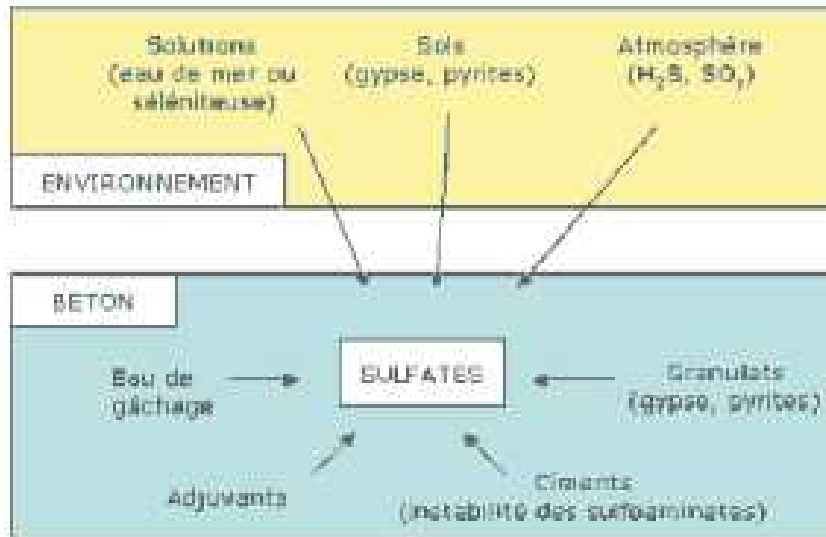
**On distingue deux types d'attaques :** les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. [1]

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.[3]

Comme le montre La figure II -3, l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -3** : L'origine des sulfates (interne ou externe). [25]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines:

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, héli-hydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite  $K_2SO_4$ , aphtitalite  $K_3Na(SO_4)_2$ , langbeinite  $Ca_2K_2(SO_4)_3$ ) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le  $SO_2$ ):

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

Des concentrations beaucoup plus importantes (> 5 %) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ou de l'anhydrite  $CaSO_4$ . La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium  $SO_4(NH_4)_2$ , provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

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

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

- Dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux  $\text{SO}_2$  provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.
  - Les fermentations anaérobies qui se produisent dans les ouvrages d'assainissement conduisent également à la formation d'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré dégagé.
- [10]
- L'eau de mer contient des sulfates en solution.

### II -1-4) Mécanismes d'attaques:

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

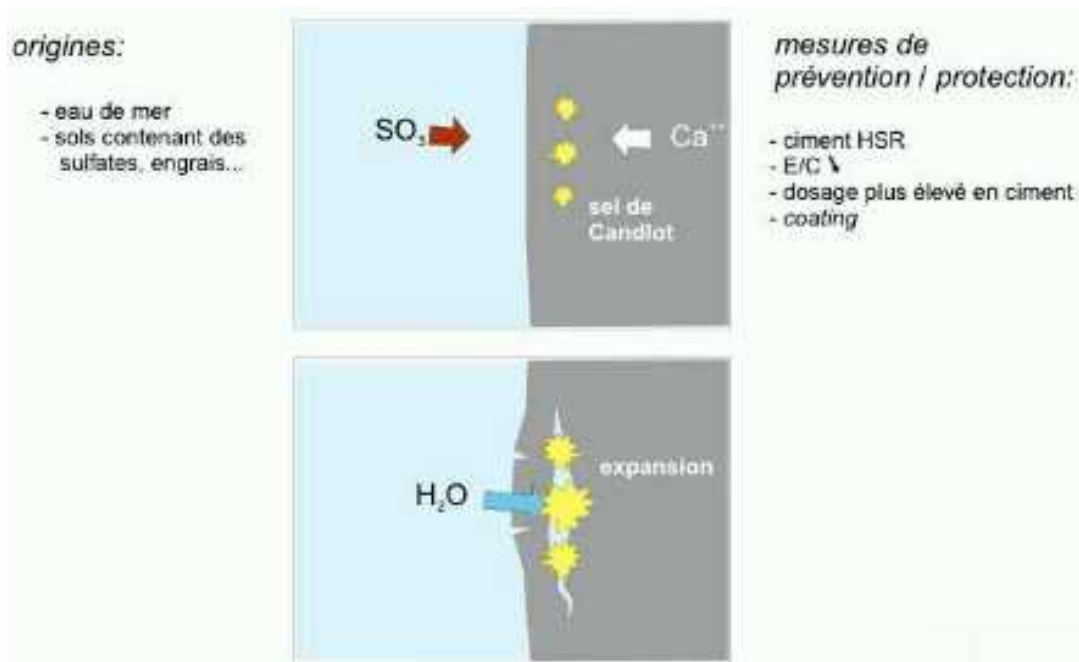


Figure II -4 : L'attaque par les sulfates. [29]

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

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

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

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

- Les mécanismes de destruction sont **fonction de la concentration** et de **la source des ions sulfates** (le cation qui leur est associé) dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment.

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une **expansion** du béton suite à la formation de produits expansifs (Fig 2.86)

- Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction.

- Ces expansions peuvent causer des **dommages structuraux** considérables

L'action des sulfates peut aussi engendrer une **perte de résistance et une perte de masse** du béton en surface (Fig 2.87).

- Ces effets sont alors dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

Fig 2.86 - Éprouvettes de béton dégradées après 5 ans de contact avec des sols riches en sulfates.

a: E/C = 0,50

b: E/C = 0,39

### II.1.4.1 Les deux types d'interactions chimiques.

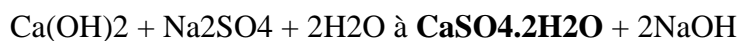
- Les **aluminates** et la **portlandite** sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

- Les dégradations peuvent survenir suite à la formation de **produit expansifs**

- Les expansions peuvent résulter de la formation **d'ettringite secondaire** (l'ettringite primaire n'est pas expansive).

1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates).

Dans le cas du sulfate de sodium:



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

CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

2) Formation **d'ettringite secondaire**,

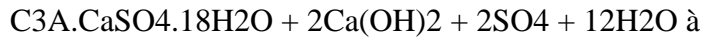
- à partir du **C3A anhydre** résiduel:



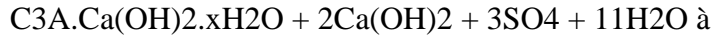
## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

- à partir des **aluminates hydratés**:

(monosulfoaluminates)



(C4AHx)



Dépendant de la **composition de la solution interstitielle**,

(Particulièrement de la concentration en portlandite), la cristallisation de

**l'ettringite secondaire peut être expansive.**

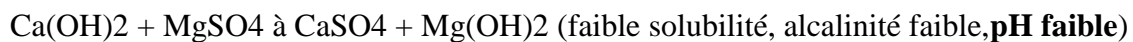
La **précipitation rapide de l'ettringite** conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le **volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur** (suivant qu'il s'agit de C3A ou du C4AH13) au volume du solide initial (Fig. 2.88).

Dans les **ciments qui libèrent moins de portlandite** (CHF, CLK -ciment avec laitier),

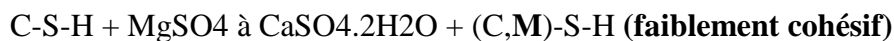
l'ettringite précipite à partir de la solution dans les vides interstitiels du béton et la

**cristallisation en aiguilles n'est pas**

- Le **sulfate de magnésium** est **très agressif** (double action)



Substitution des ions Ca<sup>++</sup> par les ions Mg<sup>++</sup> dans les C-S-H :



- L'attaque par le **sulfate de calcium** (CaSO4.2H2O ou CaSO4 dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.

- L'attaque par le **sulfate de sodium** (très soluble) (Na2SO4) entraîne la formation d'ettringite secondaire expansive.

- Le **sulfate de potassium** (K2SO4) peut aussi être agressif. Le rythme d'attaque est similaire à celui du sulfate de sodium.

- La plupart des **sulfates métalliques solubles** (FeSO4,...) peuvent être **agressifs (notamment en présence de certaines bactéries)**.

- Problèmes de soulèvement des dalles sur des fondations contenant des shales pyritiques

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II.1.4.2 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment.
- ° Les bétons avec un **dosage en ciment plus élevé** sont généralement plus compacts et ont une **perméabilité plus faible** qui **ralentit la pénétration des sulfates** et de l'ion qui leur est associé.
- Le **taux de dégradation** est proportionnel à la quantité de **C3A** du ciment

### II -1-5) Processus d'attaque par les sulfates internes :

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



Figure II -5 : La formation de l'ettringite secondaire.

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

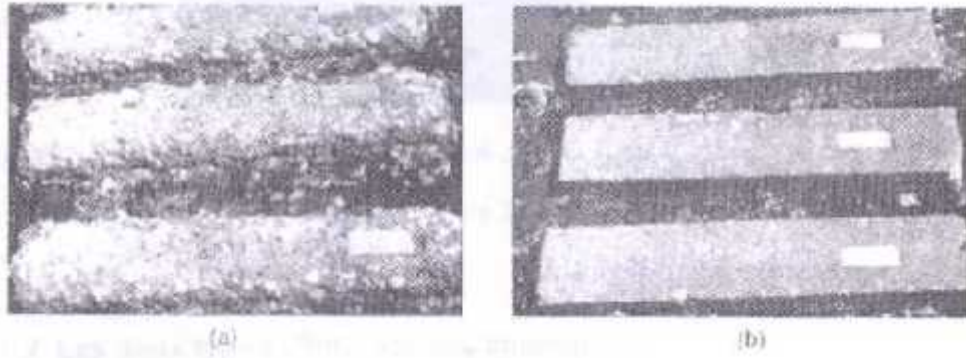
**B-** Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

- Soit à partir de reliquats de C<sub>3</sub>A anhydre :
- $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 24-26H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{30-32}$ .

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

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

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



**Figure II -6 :** Eprouvette de béton dégradée après 5 ans a) E/C=0.5 b) E/C=0.39  
De contact avec des sols riches en sulfates.

### II -1-6) 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 :

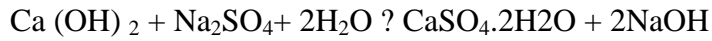
- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions  $SO_4$ , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation ( $Mg^{+2}$ ,  $Na^{+2}$ ,  $NH_4...$ ),  $Ca^{+2}$  et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en  $SO_4$  et en  $Ca(OH)_2$ .
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres ( $C_3A$ ) ou hydraté ( $C_4AH_x$  et  $C_3ACASO_4H_{12}$ ).
- 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. [2]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### Exemples de l'attaque par les sulfates :

#### Le cas de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :

A- Formation de gypse secondaire :

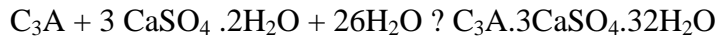


NaOH : alcalinité élevée ? Stabilisation des C-S-H

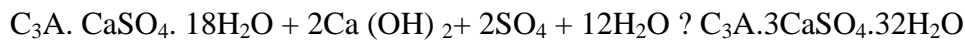
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté (pas ou peu d'expansion).

B-Formation d'ettringite secondaire :

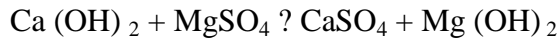
#### • à partir du $\text{C}_3\text{A}$ anhydre résiduel



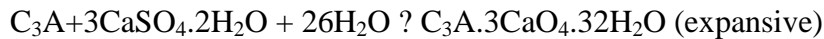
#### • à partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



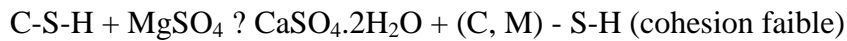
#### Le cas de sulfate de magnésium $\text{MgSO}_4$ (double action) :



$\text{Mg}(\text{OH})_2$  : brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



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



Etant donné la très faible solubilité du  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates.

Une réaction ultérieure entre le  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  et le gel de silice est possible et peut aussi provoquer une détérioration des C-S-H.

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

Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'ettringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion.

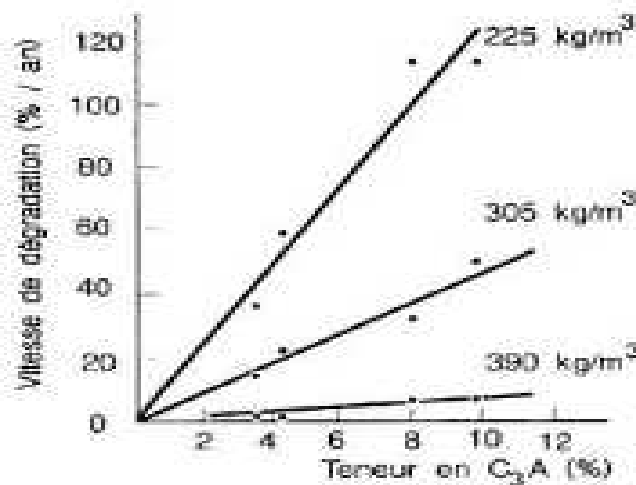
Lors d'une attaque du béton par des sulfates externes, sa dégradation se produit par la formation d'ettringite ou de gypse et par la pression et la fissuration conséquentes. [3]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -1-7) Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton :

Suite aux études effectuées, à travers le monde, sur l'influence de l'attaque sulfatique sur les matériaux cimentaires, il a été conclu que :

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment (voir la figure II. 7).
- Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qui ralentit la pénétration des sulfates et de l'ion qui leur est associé.
- Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de  $C_3A$  du ciment.
- Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en  $C_3A$  du ciment est faible.



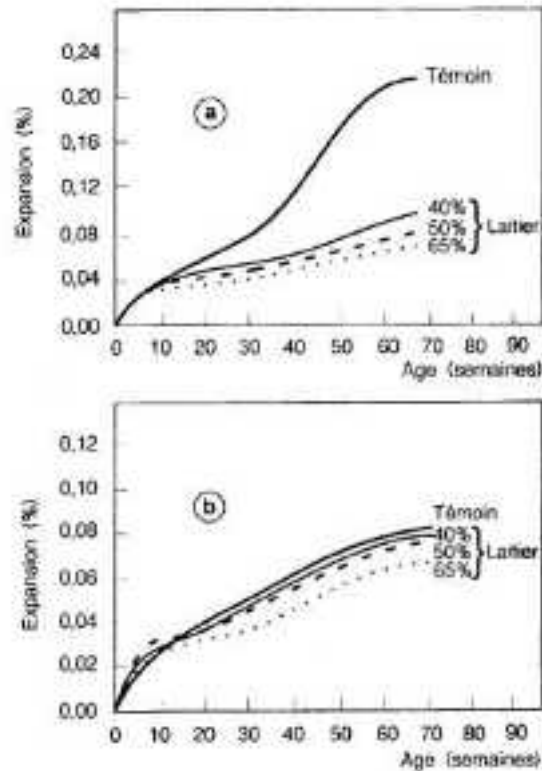
**Figure II -7 :** Influence du dosage en ciment et de la teneur en  $C_3A$  sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans  $Na_2SO_4$  à 10%).[4]

- Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates.

#### D'après les travaux de Gagné [4], il a trouvé que :

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

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -8 :** Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.

a: Ciment type II 6,4% de C<sub>3</sub>A b: Ciment type V 3,7% de C<sub>3</sub>A. [4]

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

° La fumée de silice (7%-10%) améliore très significativement la résistance aux sulfates.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

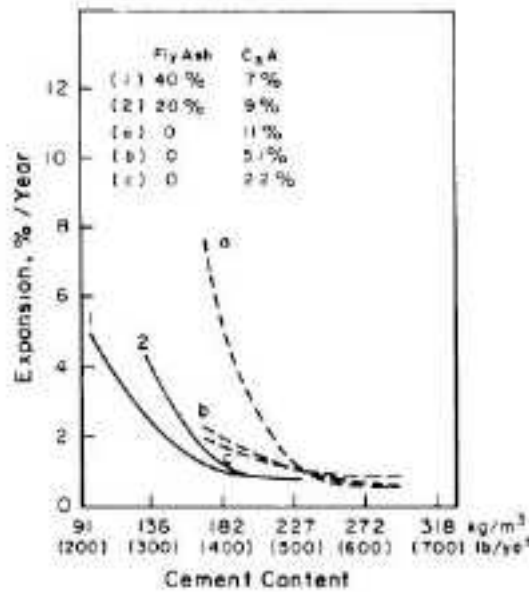


Figure II -9 : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier. [4]

### II -1-8) Revue des essais de résistance des matériaux cimentaires aux attaques sulfatiques :

#### II -1-8-1) Essais de résistance aux attaques sulfatiques externes :

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

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

##### • Essai Mehta :

Les essais sont réalisés à partir de petits cylindres de pâte pure de rapport E/C élevé, préparés en ajoutant une barbotine du ciment pré-hydraté destinée à éviter le ressuage. Les cylindres, de diamètre 11 mm et de longueur 22 mm (élanement 2) sont conservés 1 jour à 20 °C en atmosphère humide puis 13 jours à 40 °C et 100 % d'humidité relative. Ils sont ensuite immergés dans une solution à 4 % de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de pH stabilisé à 7 #177; 0,5 par addition de

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,1 N), à température ambiante. La résistance en compression des cylindres est mesurée après 28 jours et/ou 90 jours d'immersion. Le critère de non résistance aux sulfates est une perte mécanique de 25 % par rapport à la résistance des cylindres à l'issue du traitement à 40 °C. Cet essai est intéressant par sa rapidité, mais peut donner des résultats variables d'un laboratoire à un autre, en raison d'un mode opératoire non optimisé.

### • Norme ASTM C1012-04:

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

## II -1-8-2) Essais de résistance aux attaques sulfatiques internes :

### • Le test de Duggan:

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

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

### • L'essai de Fu :

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes de mortiers prismatiques (25x25x160 mm<sup>3</sup>). Les éprouvettes sont tout d'abord conservées 1 heure à 23 °C dans une enceinte humide. Elles subissent ensuite deux traitements thermiques :

- le premier de 12 heures à 95 ± 1,7 °C, suivi d'une immersion dans l'eau pendant 6 heures à 23 °C ;
- le deuxième de 24 heures à 85 ± 1,7 °C.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

La mesure initiale des dimensions des éprouvettes est réalisée avant le deuxième étuvage. Le délai d'une heure, accordé pour la maturation des mortiers à température ambiante a pour objectif d'augmenter la quantité d'ions sulfates adsorbés à la surface des C-S-H. Le deuxième traitement thermique doit permettre d'accélérer les processus d'expansion. À la suite de ces cycles, les échantillons sont conservés dans une solution saturée en chaux à 23 °C. L'expansion des mortiers est mesurée tous les 7 jours. Le seuil retenu est de 0,04 % d'expansion après 42 jours d'immersion. [1]

### II -1-9) Mesures de préventions contre les ions sulfates :

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

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.
- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment. [4]

### II -1-10) Conclusion :

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

L'attaque sulfatique					
Cause (Source et origine)	Substances concernées	Mécanisme	Circumstances	Préventions et solutions	Normes et essais
Milieu intérieur :	Granulats	ou les sulfates réagissent avec les substances concernées et forment des produits secondaires (étringite, gypse...).	Précipitation de produits secondaires « secondaires » ;	Utilisation d'un ciment de Portland à haute résistance aux sulfates (CEM I HSR)	Essai Anstett ou Chatelier-ArrestBlondiau ;
Régulateur de prise :	fillers ;	de place que les composants à partir desquels ils se forment causent ainsi le gonflement et la fissuration.	« secondaires » ;	résistance aux sulfates	Essai Mehta ;
Granulats pollués :	Les plus sensibles sont		Expansion importante ;	(CEM I HSR)	Norme ASTM C1012-04 ;
Milieu extérieur :			Détériorations chimiques ;	d'une faible teneur en CA ;	Le test de Duggan ; l'essai de Fu... etc.
Les sols :	le C-S-H, la portlandite,		La ruine du matériau cimentaire	Augmentation de f/c ;	
Les eaux :	et les aluminates				
L'atmosphère :	ouvrages anhydres (C/A) ou hydraté.				
Les ouvrages d'accrètement :				Utilisation de ciment à ajouts pozzolaniques	
L'eau de mer :				sous	

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Le béton, matériau basique par excellence, est très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagit suivant la réaction bien connue : Base + Acide ? Sel + Eau.

La nocivité d'un acide dépend de la solubilité du sel qu'il forme lors de la réaction avec les hydrates du ciment.

### II -2-2) Définition :

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution.

Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al [35], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.



**Figure II -10** : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

(Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures).

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -2-3) Les différents types des acides :

#### • les pluies acides (cas extrême des eaux douces) :

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO<sub>x</sub> d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

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

#### • les acides minéraux :

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl<sub>2</sub> et au nitrate de calcium (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ca, sels très solubles, sont très agressifs vis à- vis des ciments Portland.

L'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO<sub>2</sub> atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton.

#### • les acides organiques

On les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigrieres, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...).

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Ils peuvent dans certains cas avoir un effet colmatant sur le béton : c'est le cas par exemple, de l'acide tartrique (cuves à vin) ou de l'acide oxalique. Les acides organiques tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment.

Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Toutefois leur neutralisation par les ions alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$ ) entraîne la permanence de la dissociation de l'acide et corrélativement une augmentation de son agressivité par production cumulée d'ions  $\text{H}^+$ . Des dégradations importantes du béton ont pu être observées en milieu agricole dans des silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mise à nu des aciers...). [10]

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ.

Le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H peuvent aussi être attaqués. Les granulats calcaires sont également vulnérables.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant de  $\text{CO}_2$  libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le  $\text{CO}_2$  n'est pas agressif par ce qu'une partie de ce  $\text{CO}_2$  est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Quoique les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en  $\text{H}_2\text{S}$  par des bactéries anaérobies. Ce composé n'est pas en lui-même un agent destructeur, mais il est dissout par le mince film d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique.

L'attaque apparaît donc au dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer. [26]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -2-4) Mécanisme d'attaque des acides :

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau I.1 mentionne les composants du béton menacés par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	$\text{Ca(OH)}_2$
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	$\text{CaCO}_3$
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

**Tableau I.1** : Composants du béton menacés par la corrosion.

On distingue deux types de détérioration:

- i- L'agression résolvente ;
- ii- Le gonflement.

#### **i- Agression résolvente :**

Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de "béton lavé" et la porosité augmente. L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) 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 :



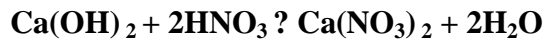
acide hydroxyde de calcium sel de calcium eau

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

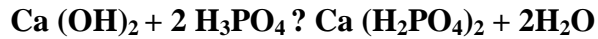
**Par exemple :**



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau



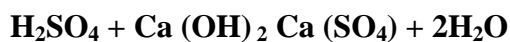
Hydroxyde de calcium + acide nitrique → nitrate de calcium + eau



Hydroxyde de calcium + acide orthophosphorique → hydrogène phosphate de calcium

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous :



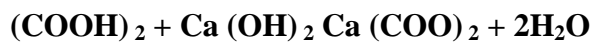
Acide sulfurique + hydroxyde de calcium sulfate de calcium + eau.

(Le produit de sulfate de calcium contribue à l'attaque de sulfate).

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment. La deuxième phase étant la réaction acide-silicate de calcium hydraté, cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

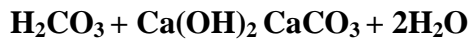
## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Les attaques acides sont, dans leur principe, similaires au phénomène de lixiviation. En effet, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés. On mettra de côté ici l'action des acides forts comme l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, qui dissolvent entièrement le béton, conduisent à un recul de l'interface matériau-acide, et pour lesquels une protection de surface du béton est absolument nécessaire. La nocivité de l'attaque acide dépend essentiellement de la solubilité du sel formé par réaction avec la portlandite. Par exemple, pour l'acide oxalique on a:



Le sel formé (oxalate de calcium) est insoluble dans l'eau et donc le béton n'est pas endommagé. C'est aussi le cas avec les acides phosphorique et tartrique.

Le cas de l'acide carbonique (solution aqueuse de  $\text{CO}_2$ ) est un peu particulier. En effet, comme dans le cas du  $\text{CO}_2$  sous forme gazeuse, l'acide carbonique réagit avec la portlandite pour former de la calcite. Mais, s'il y a du  $\text{CO}_2$  en excès et si l'eau est douce, la calcite va réagir avec l'acide carbonique pour donner du bicarbonate de calcium très soluble dans l'eau (165g/l). Il y a alors lixiviation. L'agressivité d'une eau contenant du gaz carbonique dépend donc de la quantité de gaz dissous et de la dureté de l'eau.[3]



Dioxyde de carbone Calcite



Bicarbonate de calcium

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Le **tableau I.2** résume quelques solubilités des sels de calcium formés à partir différentes attaques acides :

Composés	solubilité en g/100ml H <sub>2</sub> O			
	à basse température		à haute température	
Oxalate de calcium (sel cacique)	0.00067	13 °C	0.0014	95 °C
Carbonate de calcium (calcite)	0.0014	25 °C	0.0018	75 °C
Carbonate de calcium (aragonite)	0.00153	25 °C	0.0019	75 °C
Fluorure de calcium	0.0016	18 °C	0.0017	26 °C
Sulfite de calcium	0.0043	18 °C	0.0011	100 °C
Sulfure de calcium	0.021	15 °C	0.048	60 °C
Tartrate de calcium (de l'acide tartrique)	0.0266	0 °C	0.0689	37 °C
Phosphate de calcium	= 0.03	38 °C	= 0.08	100 °C
Oléate de calcium (de l'acide oléique)	0.04	25 °C	0.03	50 °C
Hydroxyde de calcium	0.185	0 °C	0.077	100 °C
Sulfate de calcium hémihydraté (gypse)	0.241	20 °C	0.22	100 °C
Citrate de calcium (de l'acide citrique)	0.85	18 °C	0.96	23 °C
Lactate de calcium (de l'acide lactique)	3.1	0 °C	7.9	30 °C
Formate de calcium (de l'acide ormique)	16.2	0 °C	18.4	100 °C
Chromate de calcium	16.3	20 °C	18.2	45 °C
Acétate de calcium (de l'acide acétique)	37.4	0 °C	29.7	100 °C
Chlorure de calcium dihydrate	74.5	20 °C	159	100 °C
Thiosulfate de calcium	100	3 °C	---	---
Nitrate de calcium	121.2	18 °C	376	100 °C
Bromure de calcium	142	20 °C	312	106 °C
Chlorure de calcium	177.7	8 °C	Très soluble	--
	177.7		Très soluble	---
Perchlorate de calcium	188.6	25 °C	Très soluble	--

**Tableau I.2** : Solubilité dans l'eau des sels calciques sélectionnés. [3]

Les graisses et huiles d'origine végétale et animale réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des sels d'acides gras. L'effet de dégradation sur le béton dépend principalement de la solubilité dans l'eau des produits de réaction formés.

La pâte de ciment fortement alcaline (valeur pH env. 12.5) offre une excellente résistance aux bases. Seules des bases très fortes (hydroxyde de sodium ou potasse caustique, > 20 %) attaquent l'alumine de la pâte de ciment et les granulats amorphes.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### ii- Effet d'éclatement lié au gonflement :

Les attaques sous la forme de gonflement sont provoquées par les réactions des matières transportées dans la structure susceptibles de donner naissance à des formations nouvelles très volumineuses. A l'état plastique, les pressions de cristallisation et d'hydratation sont neutres étant donné qu'il y a des possibilités de déformation. Ce n'est qu'après un état de durcissement minimal que les réactions de gonflement peuvent causer des dommages. (C'est pourquoi une eau contenant des sulfates peut tout à fait être appropriée en qualité d'eau de gâchage, bien qu'elle causerait des dommages ultérieurement au béton durci.)

La figure II -11 peut résumer l'attaque par les acides.

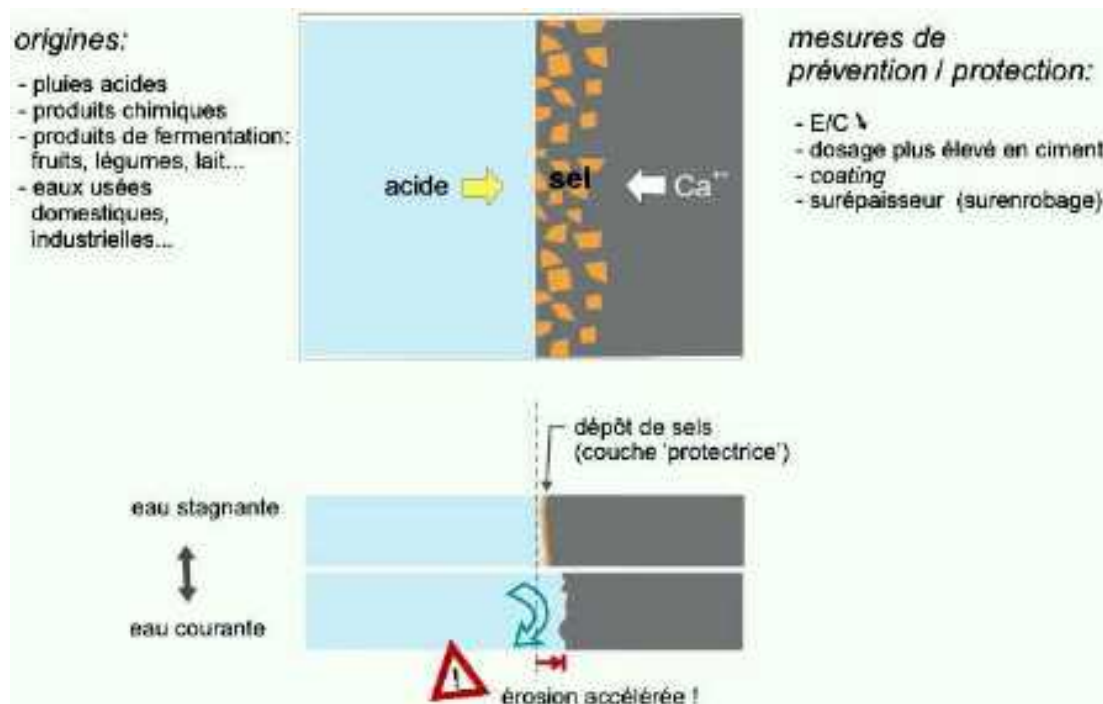


Figure II -11: L'attaque par les acides. [29]

### II -2-5) Revue des essais :

#### - Attaque des mortiers par les acides ASTM C 267-96 :

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes cubiques de mortier 50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup> sont confectionnées selon la Norme ENV 197-1. Démoulées à 24 heures, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20° ± 2°C jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans les différentes solutions acides :

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

La résistance due aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides est évaluée selon la Norme ASTM C 267-96.



**Figure II -12 :** Eprouvettes cubiques 50x50x50mm immergées dans la solution acide.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.01g. Cette opération est effectuée à 1-7- 14 -21- 28- 35- 42- 49 et 56 jours après l'immersion dans la solution

Les solutions d'attaque sont renouvelées chaque semaine, de telle façon à maintenir un pH constant et égale à un.

- Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante :

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

Avec  $M_1$  : masse des éprouvettes avant immersion.

$M_2$  : masse des éprouvettes après immersion. [3]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### -Essais de lixiviation aux acides organiques :

Des essais spécifiques ont été développés pour étudier le comportement des matériaux cimentaires au contact d'acides organiques présents dans les milieux agricoles (jus d'ensilage, lisiers) ou agroalimentaires (laiterie, fromagerie...).

Ils consistent généralement à plonger des échantillons de pâte ou de mortier dans des acides organiques en maintenant le pH à 4 (ou 6) et à suivre l'évolution de la profondeur dégradée (microanalyse par sonde électronique). Les acides utilisés sont généralement l'acide acétique et l'acide lactique, la valeur initiale du pH étant obtenue par addition de soude.. [10]

### II -2-6) Moyens de protection contre les acides :

Indépendamment des moyens supplémentaires de protection qu'il peut être nécessaire de mettre en oeuvre (résines, bitumes et autres revêtements), les mesures à prendre pour réduire les risques d'attaque par les acides, sont les suivantes :

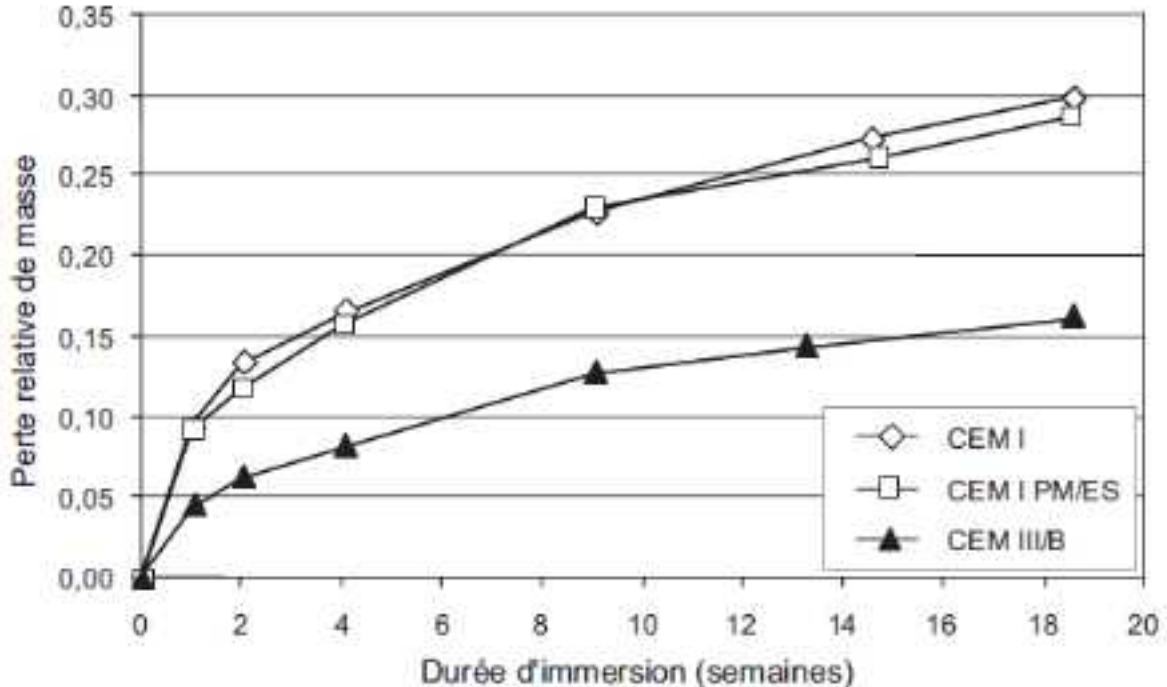
- bien identifier les risques : nature de(s) l'acide(s), concentrations, mode d'action (mobilité, renouvellement, température...), actions extérieures (piétinement, abrasion...);
- utiliser des ciments à faible teneur en chaux, en particulier des ciments avec ajouts minéraux consommateurs de chaux (laitiers, cendres volantes silico-alumineuses, pouzzolanes réactives, fumées de silice).

Les travaux de Mehta [30] effectués sur des bétons de faible rapport E/C contenant soit des fumées de silice soit un ajout de latex styrène-butadiène et soumis à des solutions d'acides chlorhydrique (1 %), sulfurique (1 %), lactique (1 %) et acétique (5 %), concluent à la meilleure tenue générale des bétons avec fumées de silice. L'effet du latex se traduirait par un enrobage des hydrates qui les protégerait des agressions chimiques.

Les expériences de Bertron et al. [31] sur des pâtes de ciments (deux CEM I dont l'un à faible teneur en  $C_3A$ , et un ciment au laitier de haut-fourneau) soumises à un mélange d'acides organiques à pH 4 simulant l'agression accélérée d'un lisier, montrent l'effet bénéfique du laitier sur les pertes de masse des échantillons et confirment la nécessité de réduire la quantité de chaux et d'augmenter celle de la silice. D'autres tests ont été effectués par les mêmes auteurs sur un ciment au laitier de haut-fourneau et trois ciments Portland ordinaires, le premier sans ajout, le deuxième avec ajout de fumée de silice, le troisième avec ajout de cendres volantes : l'analyse du comportement des éléments chimiques Ca, Si, Al, Fe et Mg

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

dans chacune des pâtes de ciments, montre l'influence favorable des éléments Si, Al et Fe sur la résistance chimique des liants vis-à-vis des acides organiques acétique, propionique, butyrique, iso-butyrique et lactique, ce dernier étant le plus agressif .



**Figure II -13:** perte relative de masse de pâtes de ciment ( $E/C = 0,27$ ) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acides organiques (maintenue à pH 4) simulant un lisier de porc [10] .

Les éprouvettes cylindriques (hauteur 75 mm, diamètre 25 mm) de pâtes de ciment ont été plongées après 28 jours de cure humide dans une solution d'acides organiques composée d'acides acétique (12,8 g/L), propionique (2,8 g/L), butyrique (1,6 g/L), iso-butyrique (0,6 g/L) et valérique (0,3 g/L) ramenée à pH 4 par une solution de soude à 2g/L et maintenue à ce pH par renouvellement de la solution. Le rapport volumique solide / liquide était de 0,059. Les courbes montrent que le ciment au laitier de type CEM III/B est celui qui présente la plus faible perte relative de masse alors que les deux ciments sans ajouts de type CEM I conduisent à des plus fortes pertes de masse, indépendamment de leur teneur en  $C_3A$  (faible teneur pour le CEM I PM/ES (3,4 %), teneur élevée pour le CEM I (10,5 %)). Des conclusions semblables ont été avancées par De Bélie et al. [32], [33] qui classent la résistance des ciments aux attaques par les acides lactique et acétique dans l'ordre suivant, du

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

plus résistant au moins résistant : ciment au laitier de haut-fourneau, ciment aux cendres volantes, ciment Portland ordinaire et ciment Portland sans C<sub>3</sub>A.

Cependant, il convient de faire attention au choix des critères de durabilité utilisés pour qualifier un matériau ou un liant (profondeur dégradée, perte relative de masse, taux de dissolution des éléments chimiques...) car cela peut conduire à des classements différents en terme de performances.

Par ailleurs, les études réalisées par Monteny et al. [34] ont montré l'effet bénéfique de l'addition d'un polymère de type ester styrène-acrylique sur la tenue des bétons soumis à l'acide sulfurique d'origine biogénique.

La mise en oeuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton, constitue également une bonne mesure de protection. Toutefois, en cas de risque d'attaque très sévère, il peut être nécessaire d'appliquer une protection supplémentaire, les phénomènes de dissolution et d'érosion superficielle ne pouvant être évités. [10]

### II -2-7) Conclusion :

Le tableau suivant conclue la dégradation due à l'attaque des acides :

L'attaque par les acides					
Causes (Sources et origines)	Substances concernées	Mécanisme	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
Les pluies acides et tous les liquides dont le pH est inférieur à 5.5 ; Milieux industriels ; Les réseaux d'égouts.	Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est le plus vulnérable, mais les autres hydrates peuvent aussi être attaqués.	L'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés.	La solubilité du sel formé ; la dissolution des CSH, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.	Identification des risques ; Utilisation de ciments composés ; Utilisation du béton de haute compacité.	Essais de lixiviation aux acides organiques, et d'autres.

### II -3) Les dégradations dues à l'eau de mer :

La présentation des dégradations des bétons dues aux attaques des sulfates et des acides dans les paragraphes (II-1 et II -2), nous aide à comprendre les attaques marines car l'eau de mer

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

contient une grande proportion d'acide et du sulfate, ainsi que d'autres composants tels que les chlorures.

### II -3-1) Introduction :

L'eau de mer est intrinsèquement un milieu modérément agressif chimiquement. Toutefois, dans les zones de marnage et d'aspersion, soumises aux cycles d'humidification/ séchage ainsi qu'aux effets mécaniques des vagues, le milieu doit être considéré comme fortement agressif.

[10]

L'eau de mer est constituée de sels chargés en ions chlorures de composés sulfatiques contenant les ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), etc. Ces ions sont nocifs au béton lorsqu'ils pénètrent en son sein.

La grande particularité de l'eau de mer est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes (c'est-à-dire indépendante de la salinité (teneur en sels dissous)).

La salinité moyenne de l'eau de mer est 35g/l. Le pH de l'eau de mer est proche de 8,2. Les gaz dissous comprennent principalement : 64% d'azotes, 34% d'oxygène ; 1,8% de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre). [12]



## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -14:** Quelques photos d'ouvrage en BA dégradés par l'eau de mer. [12]

### II -3-2) Définition de l'attaque marine :

Les environnements maritimes sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux à matrice cimentaire. En terme de composition chimique, par exemple, la présence d'ions étrangers à la solution interstitielle, tels que les ions chlore ou magnésium peut conduire à la formation de précipités, la dissolution ou la modification de la structure de certaines phases, au sein de la matrice cimentaire. A l'échelle de structures en béton armé, des risques de corrosion des armatures sont à considérer, à la suite de la pénétration d'ions chlore ou d'un abaissement du pH de la solution interstitielle.

A ces agressions d'origines chimiques, l'eau de mer est source, pour un matériau cimentaire, d'agressions physiques et mécaniques. La houle et les vagues sont des sollicitations mécaniques qui peuvent abraser la surface de la structure en béton. L'alternance des marées provoque, dans la zone de marnage, des cycles de mouillage/séchage. Des organismes tels que les algues peuvent se fixer et altérer la surface du matériau.

Dans la zone immergée, le matériau béton est constamment saturé. L'agression chimique due à l'eau de mer y est prépondérante. Cette zone se caractérise par une évolution importante de

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

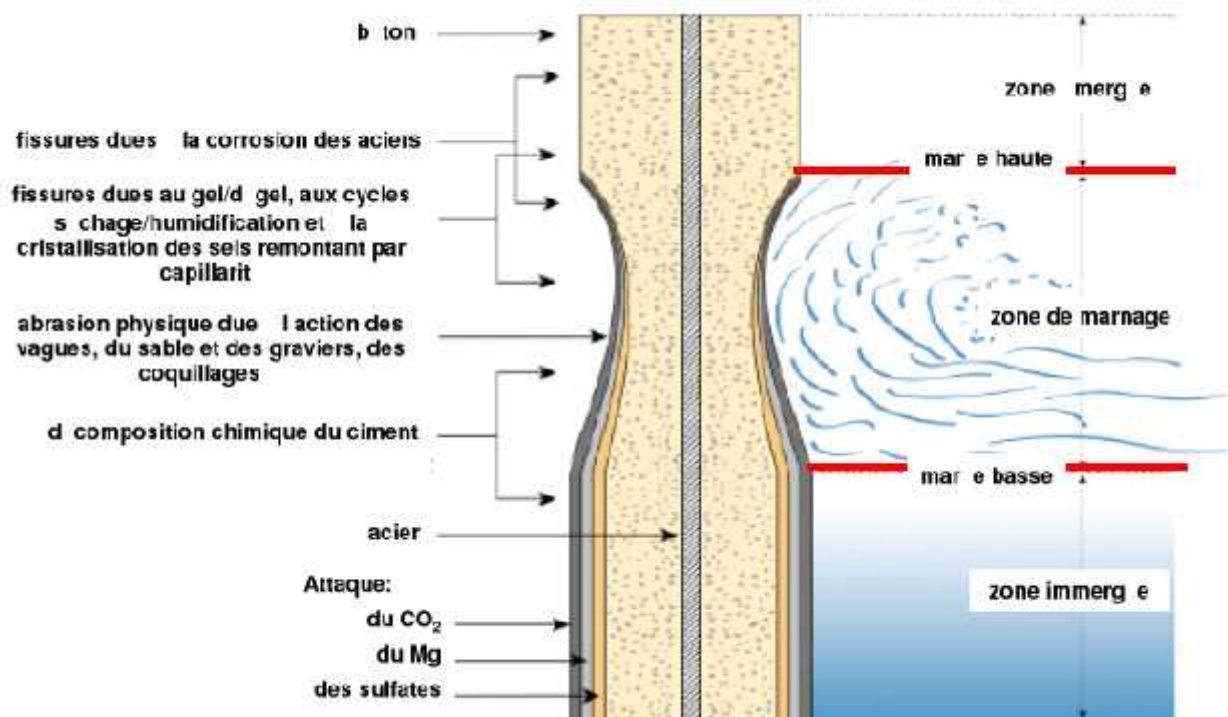
la microstructure de la pâte de ciment. En particulier, il se forme à la surface du matériau des couches de carbonates de calcium (calcite et aragonite) et d'hydroxyde de magnésium, qui ont tendance à imperméabiliser la paroi. Plus en profondeur, sur une épaisseur plus ou moins importante le matériau subit une attaque sulfatique.

Dans la zone de marnage, puisque le matériau est partiellement soumis à l'eau de mer, les couches protectrices de carbonate de calcium et d'hydroxyde de magnésium ont une épaisseur plus faible. Le matériau est soumis à une agression mécanique provoquée par les vagues, et par des cycles de mouillage/séchage, ce qui se traduit par l'apparition de fissures et par une abrasion de la surface.

Lorsque les ions chlore atteignent les armatures de béton armé, il y a un risque de corrosion de ces armatures et par conséquent de fissuration du béton.

En partie totalement émergée, le matériau est soumis aux embruns et par conséquent à une alternance de cycles de séchage/humidification, initiant la corrosion des armatures en béton armé qui induisent une fissuration du matériau. [5]

Les différentes zones et les processus d'attaque du béton par l'eau de mer, sont illustrées dans la figure II -15.



**Figure II -15 :** représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer, d'après Mehta.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent, en effet, dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures. Ces chlorures, d'origine externe, sont présents dans les ouvrages en environnement marin ou lorsque des sels de déverglaçage sont utilisés. Les conditions d'exposition de la structure sont des éléments prépondérants dans le mécanisme de dégradation. Suivant le type d'exposition, différents mécanismes de transports des ions chlorures sont considérés. En environnement marin par exemple (figure II -15), on distingue les zones submergées, pour lesquelles le béton est saturé ce qui conduit à un transport des chlorures uniquement par diffusion, de celles où le transport se fait par diffusion et convection lorsque le béton n'est que partiellement saturé (zone de marnage par exemple). [20]

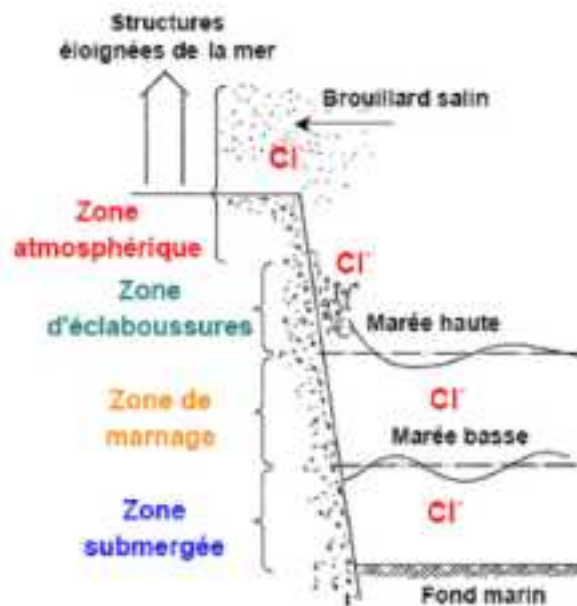


Figure II -16: Conditions d'exposition en environnement marin. [20]

### II -3-3) L'eau de mer, du point de vue chimique :

Suivant les régions du monde, l'eau de mer peut avoir des compositions chimiques différentes. Elle se caractérise généralement par une grande concentration de sels dissous. La salinité peut varier de  $10\text{g.l}^{-1}$  dans la mer Baltique, à  $40\text{g.l}^{-1}$  dans la mer Rouge, voire pratiquement  $400\text{g.l}^{-1}$  dans les mers Caspienne et Morte. Plus proche de nous, l'océan Atlantique a une salinité proche de  $35\text{g.l}^{-1}$  et la mer Méditerranée  $40\text{g.l}^{-1}$ .

Les sels dissous qui composent l'eau de mer sont généralement :

- le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), qui est prépondérant,

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

- le chlorure de magnésium ( $MgCl_2$ ),
- le sulfate de magnésium ( $MgSO_4$ ),
- le sulfate de calcium ( $CaSO_4$ ),
- le chlorure de calcium ( $CaCl_2$ ),
- le carbonate de potassium ( $KHCO_3$ ).

Espèce ionique	Atlantique (g/L)	Méditerranée (g/L)	Eau de mer standard (g/L)
$Cl^-$	17,8	21,4	20,06
$Br^-$	0,2	0,07	
$SO_4^{2-}$	2,5	3,06	2,81
$CO_3^{2-}$			0,14
$Na^+$	10	11,6	11,16
$K^+$	0,3	0,4	0,41
$Ca^{2+}$	0,4	0,47	0,42
$Mg^{2+}$	1,5	1,8	1,34

**Tableau I.3** : composition des eaux de l'Atlantique, de la Méditerranée et d'une eau de mer standard [10].

Le tableau I.3 montre que la composition d'une eau de mer est très différente de la solution interstitielle d'une pâte de ciment Portland. Comme pour la lixiviation à l'eau pure, à cause de ces différences de composition, des échanges ioniques vont se mettre en place. L'arrivée dans la matrice cimentaire d'ions étrangers tels que les ions magnésium ou carbonates conduit à la formation de nouvelles espèces, tandis que l'augmentation de la concentration d'ions déjà présents tend à sursaturer la solution interstitielle et par conséquent à précipiter des espèces solides dans un milieu rigide.

### II -3-4) Les mécanismes d'attaques par les eaux de mer :

L'attaque des ciments par l'eau de mer résulte de plusieurs mécanismes physicochimiques plus ou moins simultanés et interdépendants résumés par la figure II -17 :

L'effet global n'est ni la somme des effets individuels, ni proportionnel à une action isolée donnée. Par exemple l'eau de mer est moins agressive qu'une solution de même concentration en sulfate de magnésium en raison de la plus grande solubilité de l'ettringite et du gypse dans les solutions chlorurées ainsi qu'en raison de la formation de chloroaluminates de calcium qui consomme une partie de l'alumine (du  $C_3A$  et des aluminates hydratés) et de la chaux nécessaires à la formation d'ettringite.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Les principaux mécanismes mis en jeu, fortement imbriqués, sont les suivants :

- dissolution de la portlandite et lixiviation de la chaux des C-S-H ;  
échanges  $\text{Ca}^{2+}$  /  $\text{Mg}^{2+}$  avec précipitation de brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , insoluble, et transformation progressive des C-S-H en C-M-S-H, sans propriétés liantes ;
- formation de monochloroaluminates de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Précipitation de gypse secondaire  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ;
- formation d'ettringite  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  expansive par réaction des sulfates avec les aluminates du ciment et par transformation des chloroaluminates ; cristallisation de calcite ou d'aragonite  $\text{CaCO}_3$  ;
- formation de thaumasite  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ .

L'ensemble de ces réactions se traduit par un accroissement de la porosité du béton, par des gonflements et des fissurations, fortement aggravés par les cycles climatiques, les effets mécaniques des vagues et éventuellement par la corrosion des armatures.

La formation de brucite et de calcite à la surface du béton peut avoir un effet atténuateur. **[10]**

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

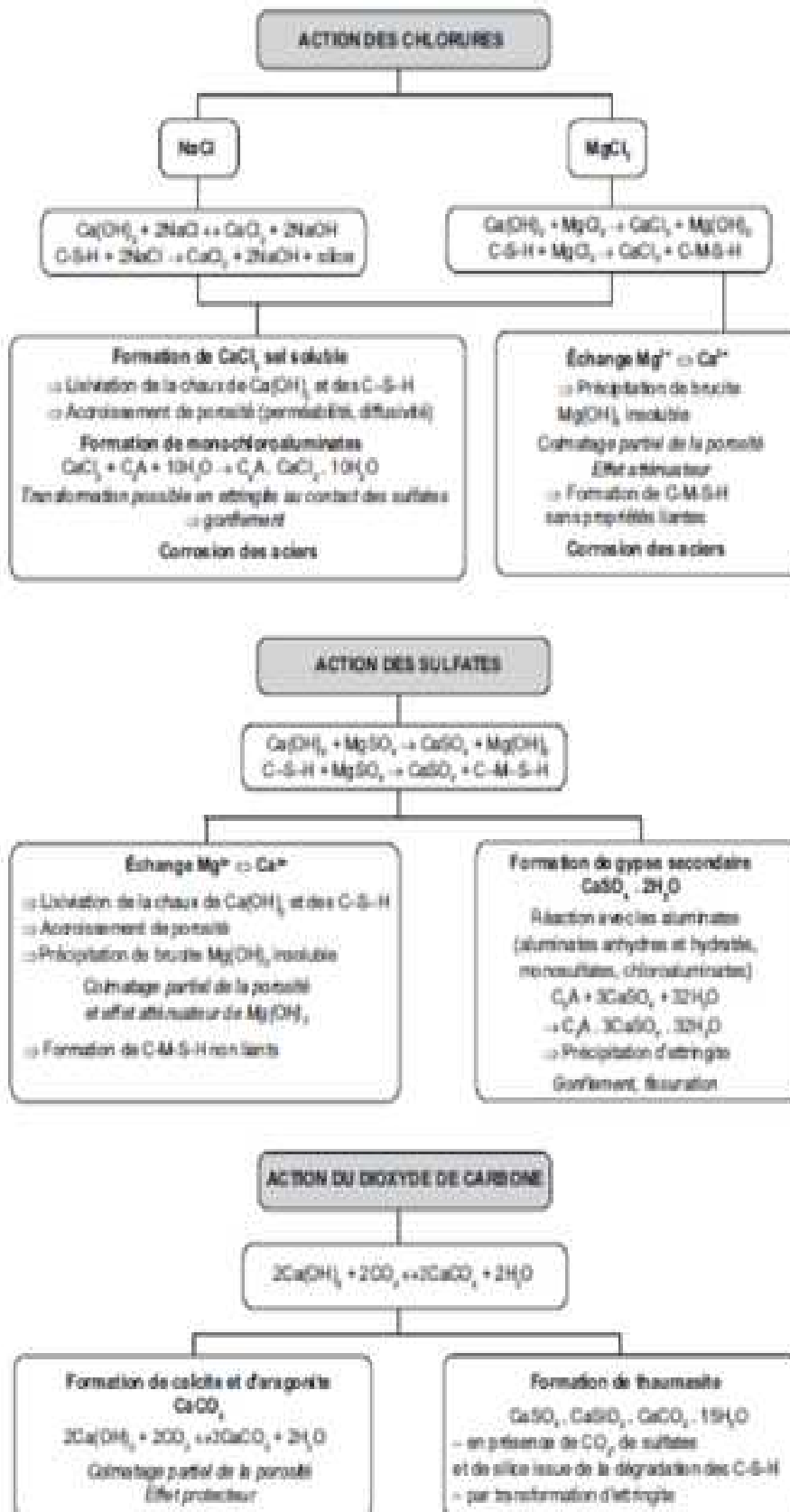


Figure II -17 : Les différentes actions de l'eau de mer sur le béton. [10]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -3-5) Les paramètres qui conditionnent la durabilité des bétons en milieu marin :

La durabilité du béton 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** (cycles de gel-dégel, activation par les hautes températures)
- ° **Paramètres mécaniques** (abrasion)

Une faible porosité et une faible perméabilité sont essentielles pour obtenir un bon comportement face à l'eau de mer.

Un béton bien formulé et bien mûris possède généralement une très bonne durabilité face à l'eau de mer.

Des ouvrages maritimes en Belgique sont encore en très bonne condition après plus de 100 ans d'exposition à l'eau de mer.

Des dégradations peuvent apparaître très rapidement (5 à 10 ans) dans le cas d'ouvrages mal conçus (mauvais recouvrement des armatures) ou fabriqués avec un béton de mauvaise qualité (choix du type de ciment, dosage en ciment trop faible, E/C trop élevé, etc.). [4]

L'attaque par l'eau de mer est fortement conditionnée par la température de l'eau.

Activation des réactions chimiques - accélère la cinétique des réactions de dégradation.

### II -3-6) Essai de tenue à l'eau de mer :

La norme NF P 18-837 propose un essai de tenue à l'eau de mer pour les produits de calage et/ou de scellement à base de liants hydrauliques. Cet essai, qui a souvent été transposé aux mortiers normaux, permet un classement des ciments.

Bien que de nombreux essais sur bétons aient été effectués soit en laboratoire, soit en milieu naturel dans des stations expérimentales (Boulogne-sur-Mer, La Rochelle, Treat Island aux USA), il n'existe pas de mode opératoire recommandé ou normalisé. [10]

### II -3-7) Paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :

- **Perméabilité** : Une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Rapport E/C** : Un rapport E/C faible diminue la porosité, la perméabilité et retarde la pénétration des ions agressifs.
- **-Recouvrement** : Il faut prévoir un bon recouvrement (60 mm) des aciers d'armature pour éviter la corrosion métallique.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### Type du liant :

- Un ciment à faible teneur en  $C_3A$  et en  $C_3S$  peut être nécessaire.
- Utiliser un ciment ayant un rapport  $C_3A / SO_3$  inférieur à 3.
- Le choix du type de liant est un paramètre important de la durabilité des bétons en milieu marin
- L'expérience européenne montre que les liants contenant une forte teneur en laitiers (>60%) ont un bon comportement en eau de mer.
- Attention à la cure.
- Mise en place soignée. [4]

### II -3-8) Conclusion :

Le tableau qui englobe les dégradations dans un milieu marin.

L'attaque par l'eau de mer					
Causes (Sources et origines)	Substances concernées	Mécanismes	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
L'eau de mer	Le $Ca(OH)_2$ et les CSH	la dissolution de la portlandite et du CSH, la précipitation de la brucite, la formation d'ettringite expansive, la formation de thaumasite, le tout impliquant une dégradation rapide du béton.	Un accroissement de la porosité du béton ; Des gonflements et des fissurations, fortement aggravés par les cycles climatiques et les effets mécaniques des vagues ; Eventuellement la corrosion des armatures.	Diminution de perméabilité ; Diminution du rapport $E/C$ ; Un boi Recouvrement ; Utilisation d'un ciment ayant un rapport $C_3A / SO_3 < 3$ ; et à faible teneur en $C_3A$ et en $C_3S$ .	Essais de tenue à l'eau de mer (la norme NFP 18-837)

### II -4) Attaque par les ions chlorures :

#### II -4-1) Introduction :

Dans les bétons 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. L'hydrolyse de ces derniers entraîne l'acidification de la matière et la formation d'hydroxyde ferreux insoluble dont l'évolution donne la rouille.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -18 :** Agression du béton par activité des chlorures. [2]

La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de complexes mécanismes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important.

- La capacité de fixation des ions  $Cl^-$  par le ciment dépend de la nature du ciment, utilisé principalement de la quantité d'aluminate  $C_3A$  présente dans le clinker.
- D'autres espèces ioniques peuvent provenir sur la fixation chimique des chlorures.
- La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte du ciment, elle décroît avec le rapport E/C, de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante en sels. [2]

### **II -4-2) Définition de l'attaque par les ions chlorures :**

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique.[12]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -4-3) Source de l'attaque des ions chlorures :

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

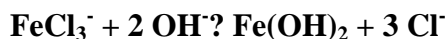
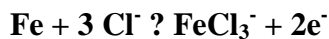
- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores.[12]

On considère que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures.

### II -4-4) Mécanisme d'attaque des ions chlorures :

Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec l'aluminate tricalcique ( $C_3A$  en nomenclature des cimentiers) et former des monochloroaluminates hydratés ( $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ), relativement stables dans le béton.

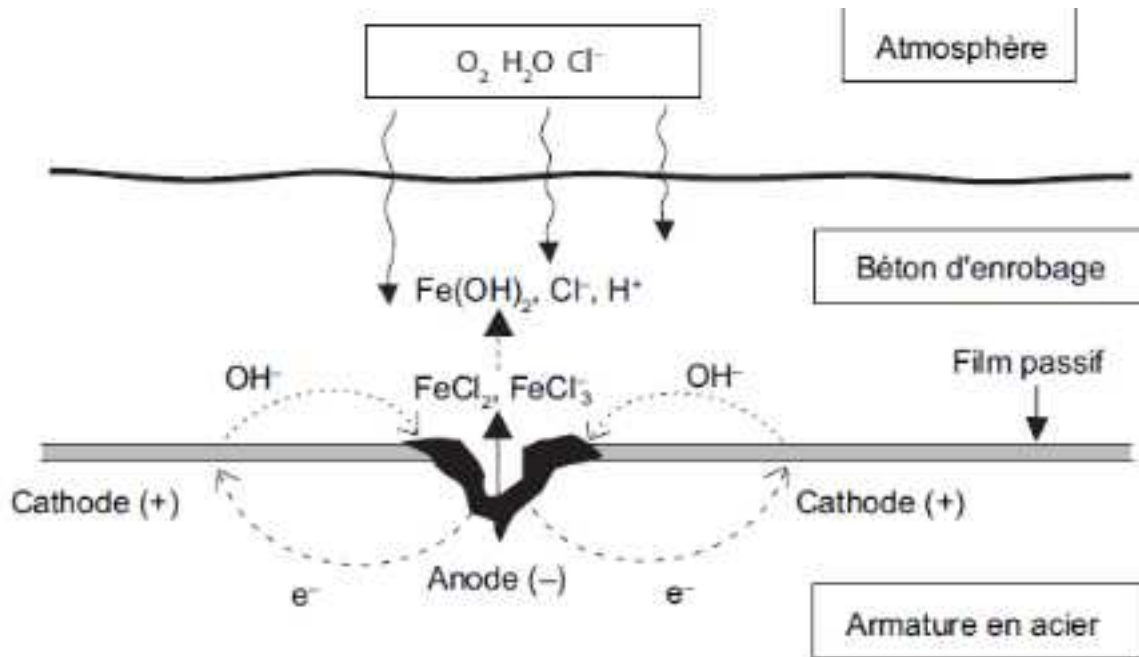
Par rapport au mécanisme induit par la carbonatation, le mécanisme de corrosion électrochimique en présence de chlorures est différent dans le sens où la corrosion n'est plus une corrosion généralisée mais une corrosion locale sous forme de piqûres [12]. Si l'on observe que la vitesse de corrosion est, en général, plus élevée en présence d'ions chlorure, les mécanismes physico-chimiques sous-jacents ne sont pas encore parfaitement expliqués. Toutefois, il apparaît qu'une conséquence de la présence des ions chlorure est la dissolution locale de la couche passive et une migration à travers celle-ci. De très faibles concentrations en chlorures ( $> 0,01\%$ ) modifieraient la morphologie de la couche passive en formant le composé  $FeOOH$ , puis des ions complexes instables  $FeCl_3^-$  qui consomment les ions hydroxyles présents selon les réactions :



Les électrons libérés par la réaction d'oxydation se déplacent à travers le métal jusqu'aux sites cathodiques. Selon les réactions ci-dessus, le processus conduit à une diminution du pH et à un recyclage des ions chlorure (Figure II -19).

La création de piles électrochimiques sur l'armature conduit progressivement à la dissolution du métal dans les zones anodiques.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -19** : mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures.

L'attaque du métal est localisée en des points particuliers se matérialisant par des trous étroits : les piqûres. A la surface du métal, on observe une distribution de micropiles, les piqûres sont les sites anodiques et le film passif environnant constitue de larges surfaces cathodiques.

Les piqûres constituant les sites anodiques et le film passif les surfaces cathodiques, on observe des micropiles dont le rapport des surfaces cathode/anode est élevé. Cela conduit à des densités de courant de corrosion localement très grandes.

Au niveau des aires cathodiques, la production des ions  $\text{OH}^-$  relève le pH, ce qui réduit les possibilités d'attaques ultérieures sur ces surfaces. Pour que les réactions se poursuivent, il faut que les ions  $\text{Cl}^-$  soient toujours disponibles au détriment des ions  $\text{OH}^-$  afin de maintenir le rapport  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  au-dessus de la valeur critique de dépassivation. Or, la formation des produits de corrosion intermédiaires contenant du chlore diminue temporairement la concentration en chlorures. En outre l'apport d'ions  $\text{OH}^-$  à partir de la réserve alcaline du liquide interstitiel tend à repassiver les zones attaquées et limite la propagation de la corrosion. Si l'apport en chlorures se maintient, la concentration de ces derniers augmente dans les aires anodiques, puis se redistribue grâce aux courants de corrosion sur toute l'armature.

Les variations d'humidité et les gradients de concentration en chlorures créent de nouvelles anodes qui finissent par se rassembler en larges zones corrodées.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

La corrosion est d'autant plus élevée que la quantité de chlorures disponible au niveau de l'armature est importante.

Il est difficile de connaître exactement la concentration en chlorures libres « critique » (appelée encore « seuil ») susceptible de permettre l'amorçage de la corrosion des armatures. En effet, cette concentration dépend de nombreux paramètres tels que, notamment, la microstructure au contact des armatures. De plus, Béton d'enrobage la concentration en chlorures de la solution interstitielle n'est pas identique (même au voisinage des armatures) à la concentration au niveau des sites de corrosion (piqûres). En outre, l'amorçage de la corrosion dépend du potentiel électrochimique de l'acier. Un critère d'amorçage de la corrosion souvent retenu est celui proposé par Hausman [25]. Il prend en compte le rapport entre la concentration en chlorures libres et en hydroxydes au droit des armatures :  $[Cl^-] / [OH^-] = 0,6$ . Plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de corrosion est grande. Ce critère est compatible avec une analyse thermodynamique de la stabilité de la couche de passivation en fonction du pH, et sa fiabilité a été démontrée expérimentalement. On peut alors déduire de ce critère la valeur de la concentration « critique » en chlorures, si l'on connaît le pH de la solution interstitielle.

Précisons de plus que cette relation permet d'intégrer les interactions entre carbonatation (diminution de la concentration en  $OH^-$ ) et pénétration des chlorures (augmentation de la concentration en chlorures libres). Rappelons ici que l'état hydrique du béton est un paramètre déterminant vis-à-vis de la corrosion des armatures, d'une part, pour le transport des espèces chimiques (nécessité d'une phase gazeuse pour le transport du  $CO_2$  gazeux et d'une phase liquide pour les ions chlorure), et, d'autre part, pour les réactions chimiques entre ces espèces et le béton. [10]

### **II -4-5) L'attaque des structures par les chlorures via les fissures ou la porosité :**

L'évaluation de la durée de vie des structures de béton fissurées est influencée par leurs caractéristiques, et par les propriétés du béton et les conditions d'exposition environnementales comme il est indiqué à la figure II -20. [19]

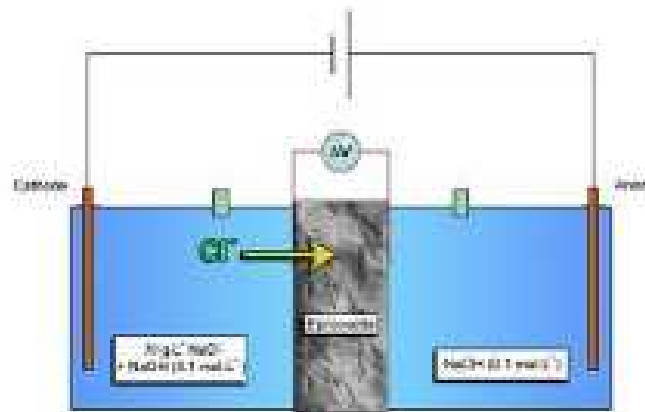
## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -20:** Schéma de l'attaque des structures par les chlorures via les fissures ou la porosité. [19]

### II -4-6) Les essais de pénétration des ions de chlorures :

#### -Essai de migration des ions chlorure :



**Figure II -21:** Essai de migration.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Cet essai permet la détermination du coefficient de diffusion des chlorures en régime non stationnaire à partir d'un essai de migration sous champ électrique. Un échantillon cylindrique de béton est placé au centre d'une cellule constituée de deux compartiments qui contiennent, du côté aval, une solution exempte de chlorures (solution basique), et du côté amont, une solution de NaCl. A l'extrémité de chaque compartiment, se trouve une électrode (métallique) reliée à un générateur de tension stabilisée. Une différence de potentiel est appliquée entre ces électrodes de sorte que les ions chlorure migrent en direction du compartiment aval. L'essai consiste à mesurer la profondeur de pénétration des chlorures  $x_d$  induite par une différence de potentiel électrique  $DE$  entre les faces de l'échantillon appliquée pendant un temps  $Dt$ . Cette profondeur de pénétration est mesurée après fendage de l'échantillon à l'aide d'une méthode colorimétrique (pulvérisation de nitrate d'argent). Le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure est calculé à partir de  $DE$ ,  $Dt$  et  $x_d$ . [18]

### -Autres essais de migration :

Pour accélérer le transport des chlorures, l'essai de migration a été développé. Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel dans la cellule de diffusion des chlorures, afin d'accélérer leur transport à travers le matériau. Il existe deux types d'essais :

#### A- Essai de migration en régime permanent

La figure (II -22), montre le principe de cet essai. Une éprouvette de béton saturée est placée entre deux conteneurs avec deux solutions différentes. Le conteneur attaché à la cathode contient une solution de chlorure de sodium, hydroxyde de sodium et hydroxyde de potassium. Le conteneur attaché à l'anode contient la même solution sauf les chlorures de sodium. La mesure de taux de chlorures est effectuée quand la concentration de chlorures dans le béton est stable.

Le champ électrique utilisé est situé entre 3 et 10V/cm. Pour la majorité des essais, le champ électrique est fixé à 4 V/cm. En effet cette valeur est suffisante pour le mouvement des chlorures et permet de limiter l'augmentation de la température, par conséquent, le risque de modification de la porosité du béton est négligeable. Sous l'effet du champ électrique, les ions chlorures se déplacent de la cathode vers l'anode quand le régime de l'écoulement est stable, et le coefficient de migration peut être déterminé.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

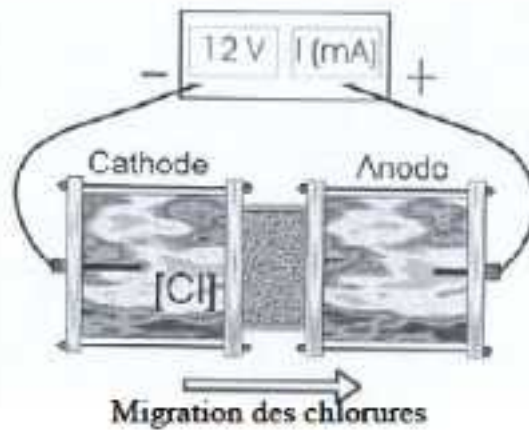


Figure II -22: Cellule de migration en régime permanent.

### B- Essai de migration en régime transitoire :

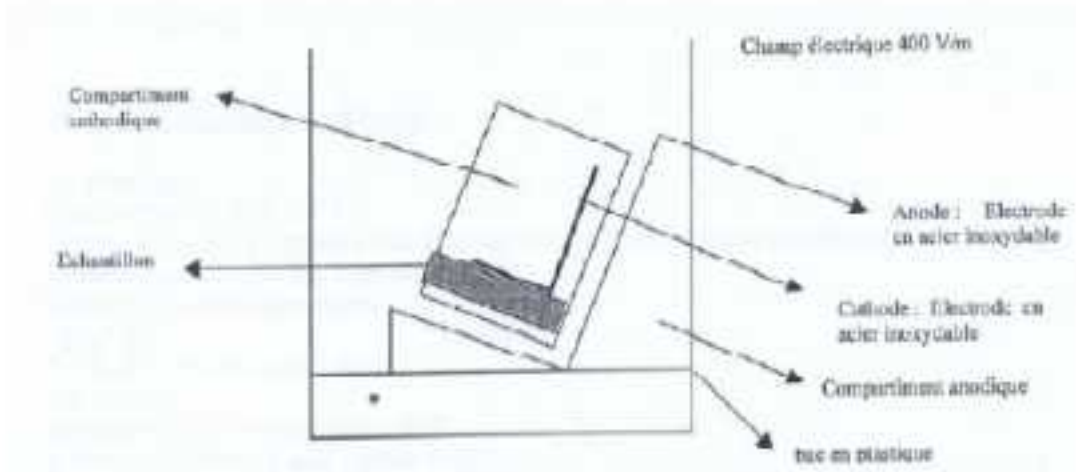
Cet essai a pour but la détermination de la profondeur de pénétration des chlorures pendant l'état de transition. Le premier essai de migration à l'état non stable est appelé « Rapid chloride permeability test ». Cette méthode est utilisée principalement aux USA. Comme dans l'essai de migration en régime permanent, une tranche de béton est mise entre deux électrodes et un champ électrique est appliqué à travers l'échantillon.

Les paramètres qui sont mesurés pendant l'essai sont :

- La charge électrique totale qui passe à travers la tranche de béton durant l'essai.
- La résistivité du béton au début et à la fin de l'essai.

D'autres essais de migration en régime transitoire ont été développés par Tang Luping et par des chercheurs du LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), à Toulouse qui permettent de déterminer un coefficient de diffusion. Un champ électrique a été appliqué à travers l'éprouvette comme dans l'essai de migration en régime permanent, mais l'équipement utilisé et la façon d'obtenir le coefficient de migration sont fondamentalement différents. Les détails de la cellule de migration utilisée au LMDC sont présentés sur la figure (II -23). [19]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -23:** Cellule de migration en régime transitoire (LMDC standard). [19]

### II -4-7) Influence de la microstructure et des additions minérales sur l'attaque des chlorures :

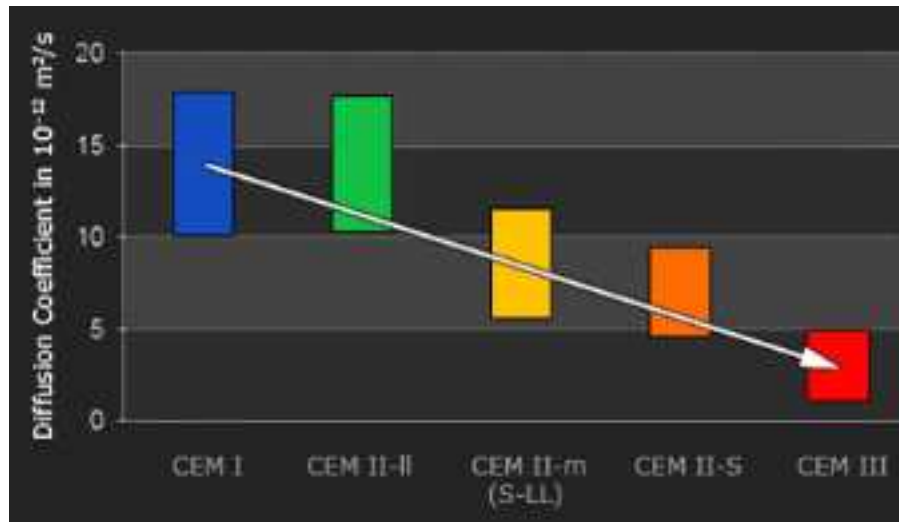
L'ajout de produits minéraux modifie la valeur critique du seuil de dépassivation, mais surtout réduit la vitesse de pénétration des chlorures, ce qui est déterminant dans le développement de la corrosion. On peut cependant affirmer qu'en ce qui concerne la période d'amorçage, la qualité du béton (faible rapport E/C et classe de résistance du ciment élevée) a une plus grande influence que le choix du type de ciment utilisé et que les conditions d'exposition des ouvrages jouent un rôle majeur sur la corrosion des armatures. [10]

### II -4-8) Précaution contre la pénétration des ions chlorures :

La fabrication d'un béton dense et compact est la précaution « de base » à prendre, quelles que soient les espèces chimiques qui composent le milieu agressif auquel le béton est exposé. Toutefois, le choix d'un ciment « le mieux approprié » reste la mesure additionnelle indispensable pour garantir une durabilité à long terme vis-à-vis d'une substance « nocive » spécifique tel que la pénétration des ions  $Cl^-$ .

Le béton à base de laitier moulu a été largement utilisé en Europe pour les constructions situées en bord de mer : c'est notamment le cas en Hollande.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -24 :** Coefficient de diffusion en fonction du Type de Ciment. [28]

Un coefficient de diffusion plus élevé témoigne d'un taux de pénétration plus élevé des chlorures dans le béton. [28]

La désignation des types de ciment est montrée dans le chapitre I paragraphe (I -7).

### II -4-9) Conclusion : L'attaque par les ions chlorures est illustrée dans le tableau suivant :

L'attaque par les ions chlorures					
Causes (Sources et origines)	Substances concernées	Mécanismes	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
-Eau contenant des chlorures ou des agrégats contaminés ; -Environnement (atmosphère marine et les sels de déverglaçage, produits chimiques) ; -Eau de mer.	Ca (OH) <sub>2</sub> et les CSH	A cause de la pénétration des ions chlorures, la couche protectrice du béton est dépassivée et la corrosion des armatures peut commencer.	La corrosion des armatures.	Limitation de la teneur en chlorure de béton. -Evitement de la pénétration des ions chlorures.	Essais de migration des ions chlorure.

### II -5) La carbonatation :

#### II -5-1) Introduction :

Un climat doux et tempéré, un environnement urbain, peuvent être considérés comme confortables et propices aux activités humaines. Cependant, du point de vue du béton armé cela constitue un environnement agressif, qui pourra affecter la durabilité d'une structure. C'est bien la durabilité du béton armé qui est concernée, et non directement celle du béton. En effet, si la carbonatation entraîne des modifications notables dans la structure du matériau,

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

elle n'altère pas systématiquement ses propriétés mécaniques et de transfert. Il semble même qu'elle conduise à une augmentation de la résistance en compression et du module, cependant le matériau deviendrait plus fragile. En revanche, la carbonatation peut entraîner la corrosion des armatures. Le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  qui pénètre dans le béton se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les silicates de calcium hydratés. La réaction provoque la diminution du pH de la solution interstitielle, et les armatures en acier ne sont alors plus passivées. En présence de dioxygène, leur corrosion peut alors débuter. Le gonflement des produits d'oxydation des armatures qui en résulte pourra à terme entraîner l'éclatement du béton d'enrobage. [11]

### II -5-2) Définition de la carbonatation :

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons et qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ), présent dans l'air à un taux moyen de **0,03 % en volume**. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.

Elle est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. La combinaison de l'hydrate de chaux (contenu dans le ciment) et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, le pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence. [2] [13]

A partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux grâce aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment. Le pH reste stable à une valeur d'environ 11. La corrosion ne se manifeste pas.

Compte tenu de l'absence d'échanges gazeux, les bétons immergés ne carbonatent pas. Il est à remarquer que des manifestations de carbonatation peuvent survenir sur des faces intérieures de béton lors de climatisation et d'humidification de l'air ambiant. [14]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

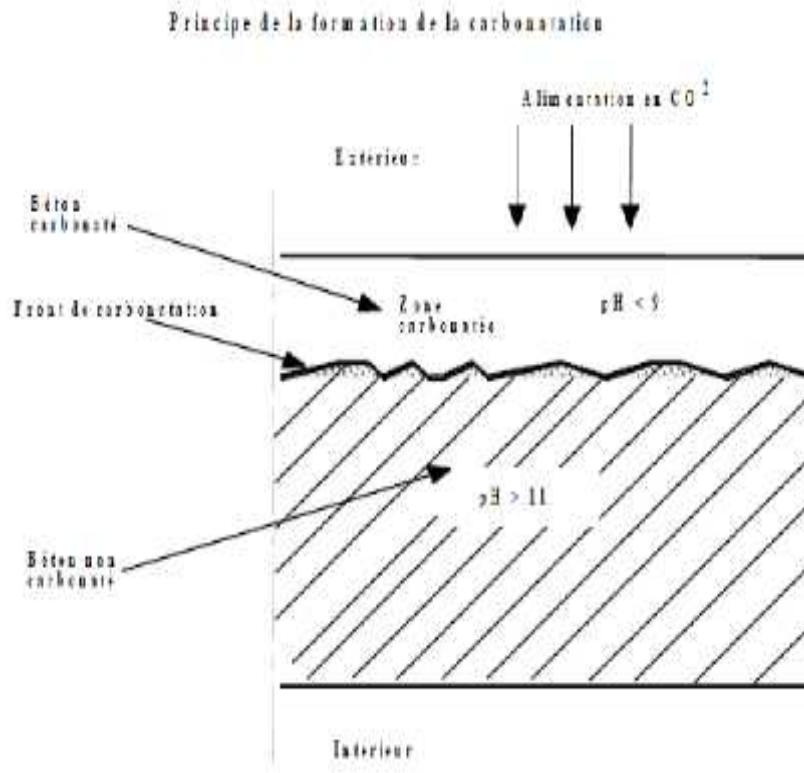


Figure II -25: Coupe théorique d'un mur en béton. [14]

### II -5-3) Mécanisme de la carbonatation :

Les armatures du béton armé sont passivées, c'est-à-dire recouvertes d'une couche protectrice d'oxydes, dans un milieu basique de pH environ égal à 13 comme dans la solution interstitielle du béton. La portlandite constitue une réserve importante d'ions  $\text{OH}^-$  :

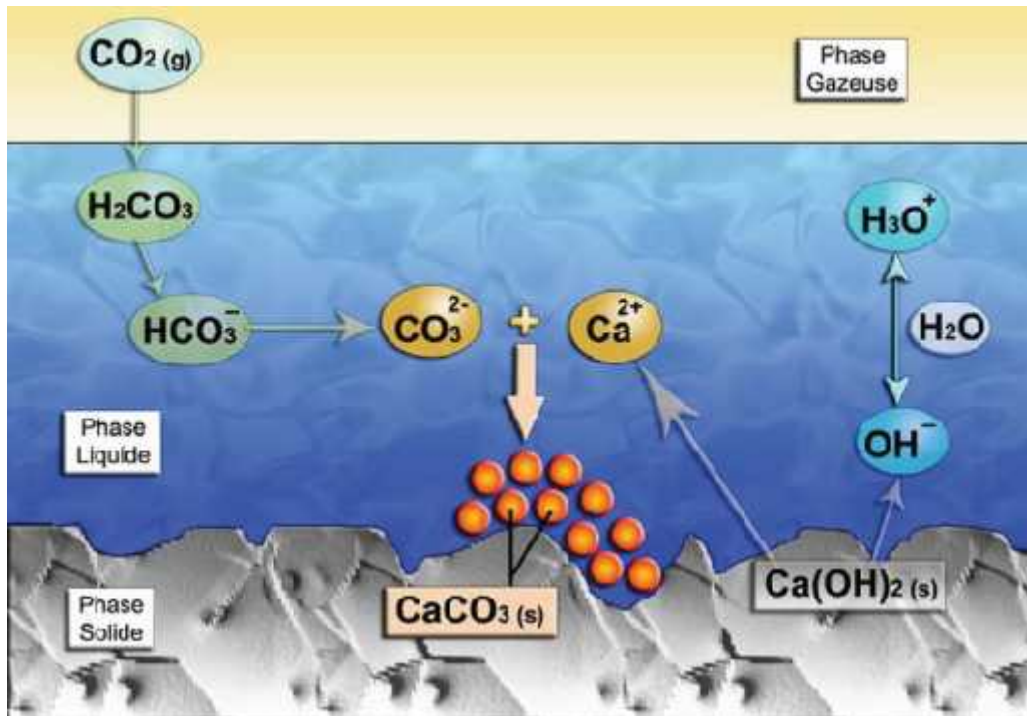


Le dioxyde de carbone, présent dans l'atmosphère en faible proportion, 0,035 % en volume, se dissout dans l'eau et forme l'acide  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Ce dernier réagit avec la portlandite pour former des carbonates de calcium qui précipitent selon la formule suivante [17] :



Les réactions chimiques de la carbonatation sont illustrées par la figure II -26.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -26:** mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca(OH)}_2$  . [10]

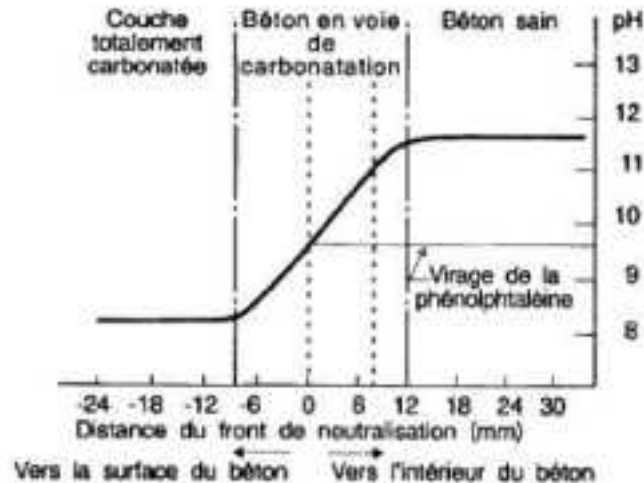
Tant que de la portlandite peut se dissocier et apporter des ions  $\text{OH}^-$  un fort pH est maintenu. Mais quand la majeure partie de la portlandite est consommée, le pH de la solution interstitielle diminue fortement, les armatures sont alors dépassivées. Le front (ou la profondeur) de carbonatation est théoriquement défini comme étant la limite entre la zone carbonatée où le pH n'est plus assez élevé pour protéger les armatures et la zone non carbonatée (ou très faiblement) où le pH est encore égal à 13.

Pour suivre l'évolution du phénomène, il est essentiel de pouvoir déterminer la profondeur de carbonatation. La méthode consiste à rompre un échantillon de béton et à répandre sur la face de rupture une solution alcoolique de phénophtaléine qui sert d'indicateur coloré. Pour un PH de l'ordre de 9, on observe le virage de l'indicateur: la partie superficielle carbonatée reste incolore, alors que la partie interne non transformée prend une coloration rose (voir figure II-30).

Cependant, la méthode à la phénophtaléine ne donne qu'une vue incomplète de la zone carbonatée qui s'étend au-delà du front de neutralisation décelé par le virage.

Pour un échantillon de béton avec  $E/C=0.7$ , le PH évolue progressivement sur une épaisseur de 20 mm comme l'indique la figure II -27 suivante.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -27:** Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée. [17]

Par ailleurs, la profondeur du front de neutralisation n'est pas régulière, les valeurs les plus grandes sont à considérer en priorité car elles témoignent d'un béton perméable avec risques précoces de corrosion des armatures.

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la porosité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. Elle est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80% (60% semble la valeur la plus critique).

- Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre de  $\text{CO}_2$ .

- Dans les environnements très humides, le béton est saturé, ce qui ralentit considérablement la diffusion du  $\text{CO}_2$ . [17]

### II -5-4) Les conséquences de la carbonatation :

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de **10 à 15 %** de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert. [13]

### II -5-6) Possibilité de ralentir la progression de la carbonatation : En :

- Augmentant le dosage en ciment ;
- Diminuant le rapport E/C ;
- Augmentant le temps de cure ;
- Augmentant la résistance à la compression.

L'incorporation de fortes teneurs en cendres volantes (> 30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement la vitesse de carbonatation du béton. Dans ce cas, une cure humide prolongée est de rigueur. [17]



Figure II -28: Corrosion des armatures suite à la carbonatation du béton d'un pilotis.

### II -5-7) Les essais sur la carbonatation :

**-Essai de carbonatation accélérée :** Une station de carbonatation, à teneur en dioxyde de carbone et humidité contrôlées, permet la carbonatation accélérée de matériaux à base de ciment. La chute du pH entraînée par la carbonatation peut être détectée par un indicateur pH-métrique (phénolphthaléine). La quantité de dioxyde de carbone fixée par la matrice cimentaire au cours de la carbonatation peut être suivie par gammadensimétrie via le gain de masse volumique induit. Ce dernier essai non destructif permet un suivi de la carbonatation des bétons en temps (cinétique) et en espace (profil). [18]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

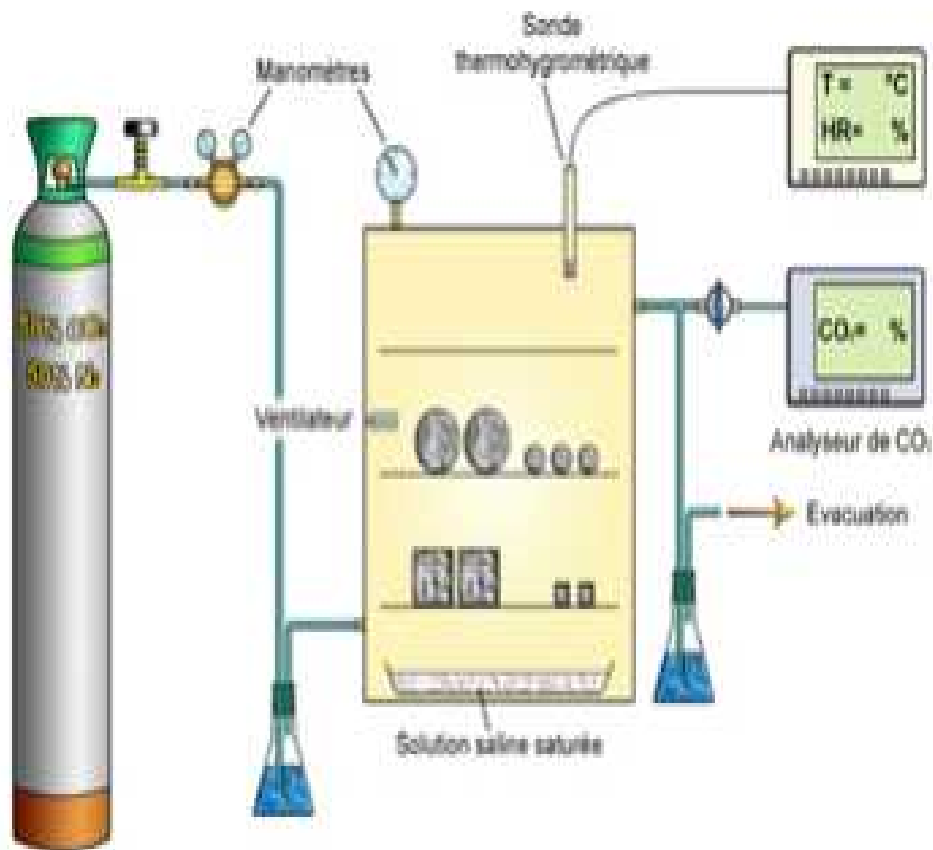


Figure II -29: Essai de carbonatation accélérée. [18]

### -La mesure de la carbonatation :

La technique la plus simple à mettre en oeuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée ( $\text{pH} < 9$ ) qui reste incolore, de la zone non carbonatée ( $\text{pH} > 9$  et allant jusqu' à 13) colorée. Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages. [13]



**Figure II -30:** Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone carbonatée (incolore) par la phénolphthaléine. [11]

### II -5-8) Techniques d'investigation :

Les différentes techniques d'investigation sont:

- l'observation visuelle directe ;
- le prélèvement d'échantillons (carottes ou éclats) ;
- la détermination de l'âge du béton ;
- mesure du pH par contact avec des réactifs,
- la mesure électrique afin de localiser les armatures et d'en déterminer leur diamètre et la distance du front de carbonatation.

### II -5-9) Méthodes d'assainissement et actions préventives :

#### A- Carbonatation avec éclats et armatures apparentes :

Les diverses étapes de restauration sont énumérées ci-après:

- Lavage, bouchardage, hydrodémolition du béton afin de détacher toutes les parties non solidaires de l'ensemble.
- Décapage par sablage des armatures, couper celles très corrodées.
- Protection des fers par un revêtement alcalin.
- Réalisation de l'adhérence à la structure par l'emploi de mortiers de résine.
- Application d'un enduit de finition micro-perméable et éventuellement d'une peinture micro-poreuse.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### B- Carbonatation sans ou avec très peu de dégâts :

Il est possible de ré-alcaliser le béton et donc de recréer un environnement fortement basique autour des armatures, par infiltration de substances alcalines. Cette solution respecte les caractéristiques esthétiques et géométriques initiales de l'ouvrage. Cette technique consiste en l'application contre la surface à traiter d'un "manteau" composé d'une pâte cellulosique, imbibée d'une solution alcaline, installée contre un treillis métallique.

Une circulation électrique est mise en place entre l'armature du béton et le "manteau". En deux à trois semaines, la solution alcaline est passée dans le béton. Le milieu est à nouveau non corrosif. Il convient ensuite de laver la surface et d'y appliquer une peinture micro-poreuse.

Cette méthode n'est toutefois utilisée que lorsque les effets de la carbonatation sont minimes, elle est plutôt considérée comme prophylactique (préventif ou protecteur).

### C-Actions préventives :

Assurer une distance de 30 mm entre les armatures et les faces du béton. Les dernières normes en la matière le stipule très clairement.

Pour des ouvrages particuliers en milieux très exposés, il est possible d'utiliser des armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou en acier inoxydable. [14]

### II -5-10) Conclusion :

La pathologie de la carbonatation est résumée dans ce tableau suivant :

La carbonatation					
Causes (Sources et origines)	Substances concernées	Mécanismes	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
L'atmosphère (CO <sub>2</sub> )	- La portlandite Ca(OH) <sub>2</sub> ; - Les silicates de calcium hydratés CSH.	Le CO <sub>2</sub> se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec la portlandite Ca(OH) <sub>2</sub> et les silicates de calcium.	- Diminution du pH de la solution interstitielle ; - La corrosion ; - L'éclatement du béton d'enrobage.	- Augmentation du dosage en ciment et du temps de cure ; - Diminution du rapport E/C.	- Essai de carbonatation accélérée

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -6) Corrosion des armatures :

La corrosion des armatures est induite par la carbonatation et par la pénétration des ions chlorures, c'est pour cette raison, qu'il faut mieux connaître ces deux altérations chimiques avant d'étudier la corrosion des bétons armés.

#### II -6-1) Définition de la corrosion:

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes. En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (**jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes**) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif (comme les ions chlorures). [22]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



a) Fissuration b) Éclatement localisé

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



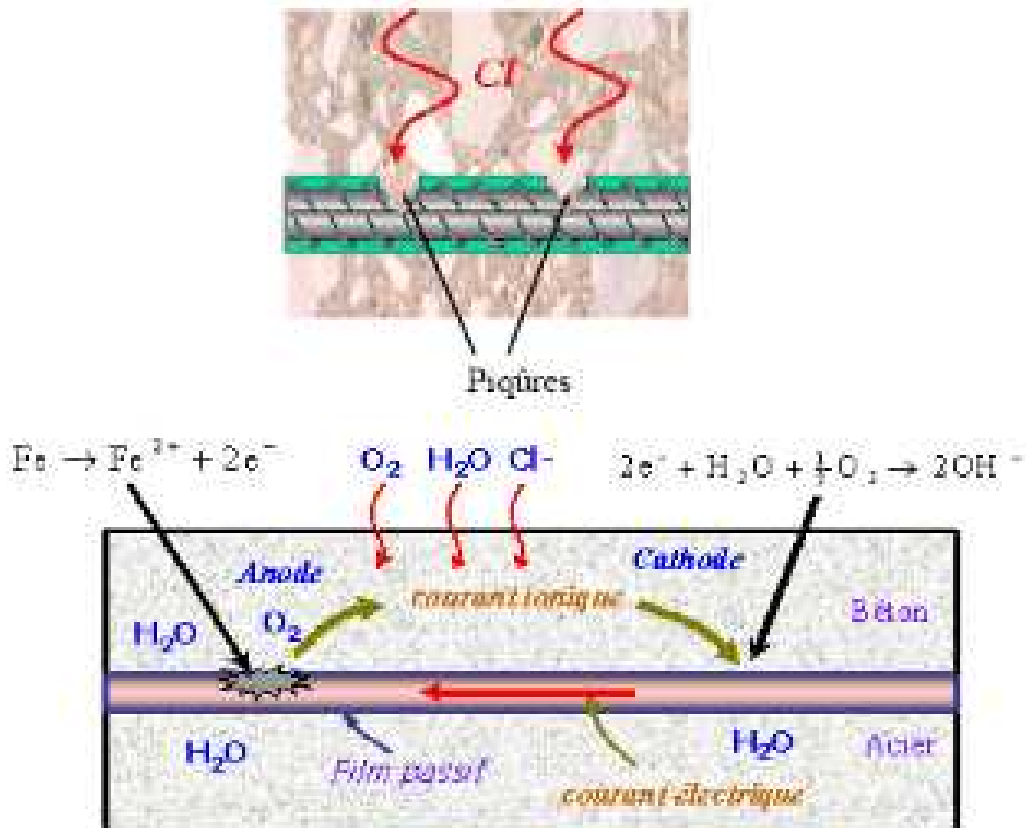
c) Corrosion d'armature.

**Figure II -31:** Exemples de détériorations dues à la corrosion des poteaux en béton armé dans une bâtisse à Mascara (Photo A.Bensafir)

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

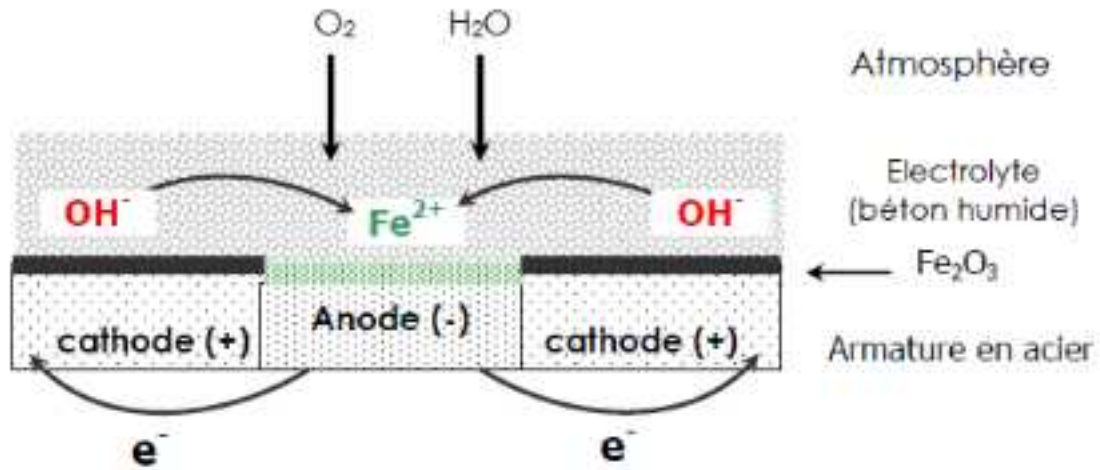
### II -6-2) Processus de la corrosion :

Il est d'abord important de souligner que la durabilité de n'importe quelles structures est conditionnée par le béton qui protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. En effet, la forte alcalinité (pH =13) de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton permet la formation d'une couche passivante d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui protège les aciers de la corrosion. Cependant, certaines espèces chimiques délétères, provenant du milieu environnant, peuvent traverser la barrière physique que constitue le béton d'enrobage, perturber la stabilité chimique de la couche passivante et corroder les armatures. La carbonatation du béton par le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère et la pénétration des ions chlorures (provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage) sont les deux principales causes de ce phénomène.[21]



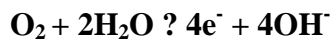
## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Les processus fondamentaux de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés sur la figure II -33 suivante :

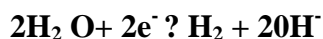


**Figure II -33:** Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton.μ

L'oxygène qui peut diffuser dans le béton via le réseau poreux, se dissout dans la solution interstitielle et finit par atteindre la surface de l'acier. Sur cette surface, dans la zone cathodique, l'oxygène est réduit en ion hydroxyde (OH<sup>-</sup>) selon la réaction électronique :



C'est, dans la plupart des cas, la réaction cathodique associée à la corrosion des aciers dans le béton. Cependant, dans le cas d'un béton carbonaté ayant un pH moins élevé (8-9), l'eau peut être réduite en dihydrogène selon la réaction:



Quelque soit la réaction cathodique mise en jeu, la production d'ions hydroxyde fait augmenter le PH de la solution interstitielle au niveau de la zone cathodique.

La réaction anodique correspondante est la dissolution de l'acier conformément à la réaction :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ . Celle-ci entraîne une diminution de la section de l'acier qui peut finir par rompre.

Les ions Fe<sup>2+</sup>, produits intermédiaires de la corrosion, pouvant s'oxyder ensuite en Fe<sup>3+</sup> sous certaines conditions, s'accumulent à la surface de l'acier ou sont dissous dans la solution interstitielle ou bien encore diffusent loin de l'armature en fonction des caractéristiques du milieu.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Dans la solution interstitielle du béton, normalement riche en oxygène et possédant un pH élevé, les ions  $Fe^{2+}$  peuvent rester sous la forme  $Fe(OH)_2$  ou être oxydés en ions  $Fe^{3+}$ , qui hydrolysés se trouvent alors sous la forme  $Fe(OH)_3$ , formant ainsi un mince film passif à la surface de l'acier, ce qui va retarder la dissolution du fer. Dans ce cas, l'acier est bien protégé et il n'y aura pas de dommages détectables dus à la corrosion.

Sous certaines conditions, le cas lorsque le béton a été carbonaté et que le pH de la solution interstitielle est descendu en dessous de 9 ou lorsqu'une quantité suffisante d'ions chlorure ( $Cl^-$ ) a pénétré dans le béton, saturé en eau, et atteint l'armature de ce fait, la section de l'acier peut continuer de se réduire et la rupture de l'armature se produire. Ce processus, préjudiciable à la durée de vie d'un ouvrage, est favorisé lorsque le béton est saturé en eau car l'évacuation des ions  $Fe^{2+}$  de la surface de l'acier est facilitée. Ces ions peuvent alors migrer à la surface du béton et y former des rouilles mais ce type de dommage dû à la corrosion n'a pas d'impact significatif sur l'enrobage du béton ; il améliore même l'adhérence du béton sur l'acier.

La corrosion devient préjudiciable lorsque la vitesse de corrosion de l'acier est très élevée et que les produits de corrosion, ne pouvant être évacués de la zone de corrosion, s'accumulent à la surface de l'acier. C'est le cas si la solution interstitielle est riche en oxygène et en espèces agressives, et si l'enrobage de béton n'est pas assez humide. Une partie des ions  $Fe^{2+}$  dissous peuvent alors s'oxyder et être transformés en oxydes ferriques hydratés ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) qui se déposent ensuite, avec des oxydes et hydroxydes ferreux, à l'interface acier béton. Le volume des produits de corrosion étant 2 à 6 fois supérieur à celui du métal, une contrainte d'expansion se crée à cette interface plus l'acier est corrodé, plus cette contrainte est importante, et lorsque celle-ci devient plus importante que la résistance à la traction de l'enrobage, des fissures apparaissent. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait les processus de corrosion. Un processus corrosion ? fissures ? pénétration d'espèces agressives ? plus de corrosion ? plus de fissures ? plus d'espèces agressives ... s'instaure. [22]

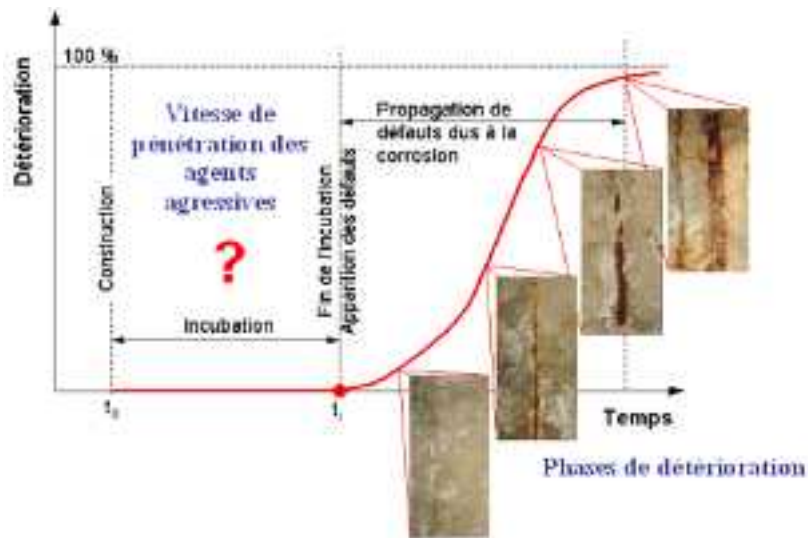
### II -6-3) Les deux étapes de la corrosion :

Dans la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux périodes : Une période d'initiation et une période de propagation (Figure II -34) .La durée de la première période est déterminée par la vitesse de neutralisation du béton d'enrobage ou la vitesse de pénétration de substances agressives telles que les ions chlorures. Lorsque la concentration en chlorures au niveau de la barre d'acier est suffisamment importante, la période de propagation

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

commence, puis l'acier se corrode jusqu'à ce que la section des aciers soit inférieure à une valeur acceptable. On atteint alors la durée de vie de la structure ou la durée d'utilisation avant réparation.

La façon la plus simple et la plus efficace de prédire la durée de vie des ouvrages consiste à évaluer la phase d'initiation (ou d'incubation) de la corrosion. [21]



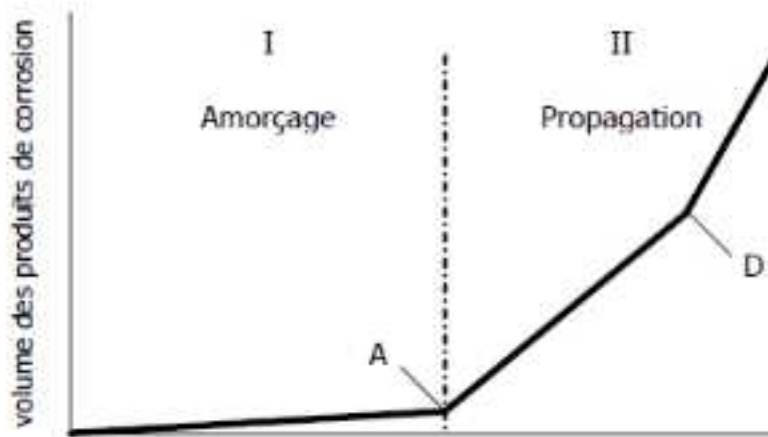
**Figure II -34:** Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps. [21]

Selon TUUTI [41], l'évolution de la corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux étapes (Figure II -35)

- Au départ, l'acier est stabilisé par la couche de passivation qui empêche la formation de rouille supplémentaire. Puis, durant la phase d'amorçage (incubation), les espèces néfastes vis-à-vis de la corrosion pénètrent dans le béton et l'acier se dépassive alors progressivement. Cette dépassivation peut être engendrée par de nombreux facteurs dont la carbonatation et la pénétration des ions chlorures.

- Les oxydes et hydroxydes produits par des réactions d'oxydation à la surface du métal s'accumulent. La formation de ces produits d'oxydation va alors entraîner un gonflement qui finira par provoquer la fissuration de l'enrobage de béton (point D).

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -35:** Schéma de la cinétique de corrosion des armatures dans le béton. [22]

En pratique, il doit être fait en sorte que la période d'amorçage (incubation) soit la plus longue possible. Pour cela, il faut prévoir des épaisseurs d'enrobage suffisantes et choisir une formulation de béton permettant de diminuer sa perméabilité à l'eau et aux gaz.[22]

### II -6-4) Facteurs influents de la corrosion :

Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent affecter directement le processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosive.

La température et l'humidité, tout comme les autres facteurs pouvant détériorer le béton, jouent aussi un rôle important dans la corrosion des armatures. La corrosion de l'acier n'est donc pas dépendante d'un unique paramètre mais de plusieurs dont les interactions concourent ou non à la corrosion.

-Influence de l'enrobage :

L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature.

-Influence de la composition du béton :

Tout ce qui conditionne la solution interstitielle et la porosité du béton est un facteur pouvant affecter ou non la corrosion. Le type et la teneur en liant, les additions minérales et le rapport E/C (Eau/ciment) déterminent la performance d'un béton.

-Influence de l'humidité :

## **Chapitre II: Les attaques chimiques du béton**

L'effet du taux d'humidité, ou degré de saturation en eau, dans le béton est important car la vitesse de corrosion dépend fortement de ce taux, celui-ci influençant directement la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène.

-Influence de la résistivité du béton :

La résistivité électrique affecte de manière significative la corrosion des armatures puisqu'il existe une relation entre la corrosivité et la résistivité du béton. La résistivité du béton est fonction de la composition de la solution interstitielle, de la microstructure du béton (taille et distribution des pores), de l'humidité et de la teneur en sels ainsi que de la température.

-Effet de l'oxygène :

Dissous dans la solution interstitielle, l'oxygène est primordial dans la réaction cathodique du processus de corrosion des armatures dans le béton.

-Autres agents agressifs :

Des sels, contenus dans l'eau pénétrant le béton, peuvent contribuer à la formation de produits de corrosion sur l'acier. Ainsi, les ions sulfate agissent qualitativement comme les ions chlorures et certains sels solubles tels les perchlorates, les acétates, les halogénures autres que les chlorures peuvent aussi être corrosifs pour les armatures. [12]

### **II -6-5) Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :**

**-L'aspect du parement de l'ouvrage :**

Les efflorescences et les tâches de rouille qui sont la conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage du béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Parfois, ce point est considéré comme étant de peu d'importance par le gestionnaire des ouvrages mais par contre ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire car des éclats de béton peuvent se produire.

**-La sécurité vis-à-vis des usagers :**

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage ou l'exploitent. Leur prévention et leur élimination doivent par conséquent être traitées avec grand soin.

**-La stabilité de l'ouvrage :**

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement. [12]

### II -6-6) Investigation de la corrosion in situ :

Une investigation type se compose d'une série de tests différents suivie d'une phase d'analyse permettant le choix de la stratégie optimale de réparation. La réalisation du même genre de tests est également un moyen de contrôle de qualité pour les ouvrages récents. Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants :

- l'importance de la structure ;
- la nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes ;
- les délais et les coûts ;
- l'accessibilité ;
- l'environnement, etc. [12]

### II-6-7) Prévention et réhabilitation :

#### II-6-7.1) Prévention. Mesures constructives :

Pour se prémunir des problèmes liés à la corrosion, il est possible d'utiliser des armatures en acier inoxydable. Le coût d'investissement initial est plus élevé que celui des armatures classiques, mais il faut considérer le coût global de la structure en incluant les actions de maintenance sur toute la durée de vie. Dès lors, les différences sont moindres et le choix de l'inox peut s'avérer économique. Le développement d'armatures en matériaux composites (fibres de verre) est également en cours mais pas encore en phase opérationnelle à grande échelle.

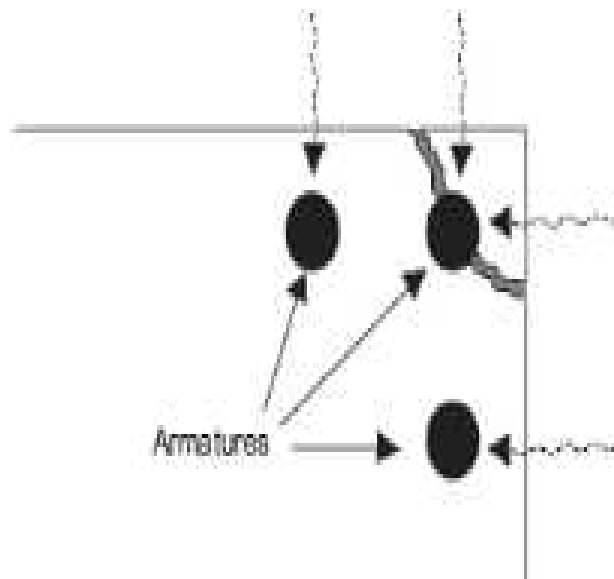
La conception générale d'un ouvrage n'est pas non plus sans influence sur la durabilité générale du béton. Un certain nombre de règles de l'art simples doivent être respectées afin de réduire au maximum les effets de la corrosion.

· En premier lieu, l'ouvrage doit être dimensionné de telle sorte que les charges ne donnent lieu au cours du temps qu'à des déformations acceptables de façon à éviter l'apparition de fissures macroscopiques préjudiciables à sa durabilité. Il apparaît ainsi que la carbonatation et la pénétration des chlorures sont plus importantes dans les zones tendues des éléments de structure que dans les zones comprimées. C'est pourquoi la répartition des armatures doit être étudiée de façon à minimiser la formation éventuelle de fissures : tout ce qui contribue à

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

réduire la concentration des contraintes a un impact favorable sur la pénétration des agents agressifs.

· Au niveau des aspects géométriques des ouvrages, les éléments aux formes simples assorties de dimensions suffisantes permettent un positionnement et un enrobage correct des armatures. On évitera les structures trop minces où la pénétration des agents agressifs s'effectue suivant deux directions opposées. Une attention particulière est à porter aux angles dans la mesure où l'attaque suivant deux directions perpendiculaires peut décoller prématurément le béton d'enrobage (figure II -36).

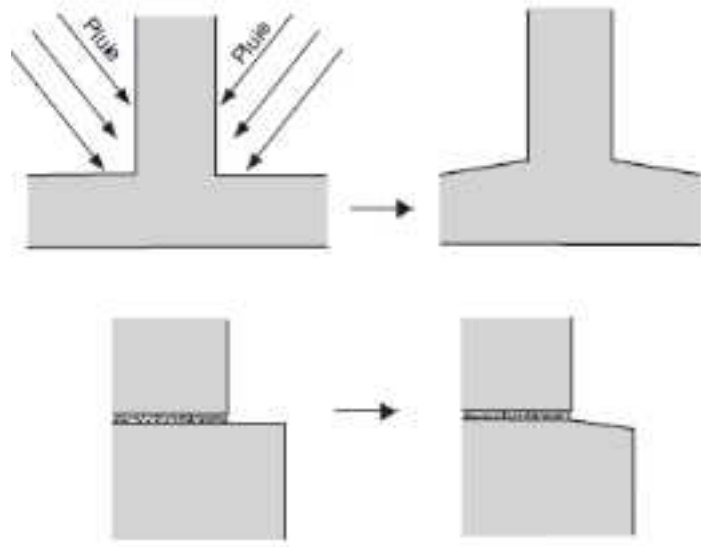


**Figure II -36** : effets de la corrosion au niveau des angles des constructions.

Pour éviter ce décollement du béton d'enrobage, on dispose des armatures transversales.

· Au niveau des détails des dispositions de construction, un grand soin doit être apporté aux parties de l'ouvrage les plus exposées aux intempéries. Un principe simple doit pouvoir s'appliquer : éviter la présence d'eau stagnante et le cheminement préférentiel des eaux de ruissellement. Les surfaces horizontales en béton sont particulièrement concernées et une simple pente suffit généralement à résoudre les problèmes (Figure II -37).

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -37** : dispositions constructives permettant d'éviter la stagnation d'eau.

Ainsi les ponts, les aires de stationnement, les routes, les balcons et terrasses doivent être conçus de façon à éviter la stagnation d'eau. Cependant les zones les plus exposées des surfaces horizontales soumises à une humidité fréquente, à des éclaboussements répétés avec des sels en ambiance hivernale sont à traiter de façon spécifique et nécessitent souvent un revêtement imperméable.

### **II-6-7.2) Requalification des ouvrages en béton armé :**

Si, comme nous l'avons vu, les ruines d'ouvrages directement liées à la corrosion sont rares, il faut garder à l'esprit que, selon le degré d'avancement des réactions, la structure atteinte perd une partie de sa capacité portante. Il est donc essentiel de garder à l'esprit le respect de la sécurité de l'ouvrage en service.

Si la perte de section des armatures est manifeste, il est nécessaire de réévaluer la capacité portante de l'ouvrage par un calcul mécanique. L'estimation de la section n'est toutefois pas toujours aisée car elle ne peut se faire que de manière discrète par l'intermédiaire de sondages, et il est parfois difficile de remonter à des moyennes statistiques.

Si la perte de section est supérieure à 10 %, il convient de renforcer les armatures. L'apport de nouvelles armatures peut se faire dans la masse, après démolition des zones atteintes et reconstitution du béton, soit par un apport externe enrobé dans un béton projeté connecté à la structure, soit par des armatures additionnelles collées sous forme de plaque de tôles ou de tissus de fibres de carbone.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

La corrosion entraîne également une perte d'adhérence qui nécessite la dépose du béton dégradé puis la reconstitution de l'enrobage. Il est à noter que cette opération libère totalement les ancrages des barres. Il faut généralement étayer l'ouvrage pour ce type d'opération car le risque de modification du comportement et de mauvais fonctionnement des matériaux en tant que béton armé, peut alors être important.

Si les aciers sont la partie dégradée la plus naturelle quand on parle de corrosion, il ne faut pas négliger la diminution de la section efficace de béton qui joue un rôle dans le fonctionnement du béton armé notamment en compression. Comme pour les problèmes d'adhérence, il faut s'assurer du bon fonctionnement des matériaux acier et béton ce qui peut nécessiter un étayement. Les produits de réparation doivent être compatibles avec les matériaux en place et assurer une adhérence suffisante à défaut de quoi le comportement mécanique initial ne sera pas restauré.

### II-6-7.3) Méthodes de réhabilitation

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de recenser de manière exhaustive toutes les techniques existantes mais plutôt de passer en revue les grandes familles de méthodes.

Les différentes méthodes de réhabilitation des ouvrages en béton armé concernent:

- **la reconstitution de l'enrobage** : Elle permet de réparer et d'arrêter la progression des dégradations d'un parement. Après élimination des zones dégradées, remplacement des armatures trop corrodées et protection directe des armatures si l'enrobage reconstitué est trop faible par rapport aux normes actuelles, un béton de réfection est appliqué. Celui-ci devra montrer une bonne adhérence avec les matériaux en place ;
- **l'imprégnation** : Les produits appliqués par imprégnation sont des consolidants (consolidation locale et peu profonde d'une zone faiblement altérée) ou des hydrofuges (constitution d'une barrière interne vis-à-vis de l'eau liquide mais pas de la vapeur d'eau, ce n'est donc pas un imperméabilisant). Ces produits n'ont pas d'action directe sur la corrosion mais sont des traitements complémentaires ;
- **les inhibiteurs de corrosion** : composés chimiques ajoutés en faible concentration au milieu cimentaire ralentissant, ou stoppant, le processus de corrosion. Ces produits ont pour fonction de pénétrer l'enrobage du béton, d'abaisser la vitesse de corrosion de l'acier sans altérer ce dernier. Ils doivent être stables et compatibles avec le milieu cimentaire et ne pas être toxiques. On distingue les inhibiteurs anodiques (diminution du courant sur la partie anodique du métal), les inhibiteurs cathodiques (augmentation de la surtension cathodique) et

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

les inhibiteurs mixtes. Actuellement, l'efficacité de ces produits est de l'ordre d'une dizaine d'années ;

- **les revêtements de surface** : La mise en peinture des ouvrages a pour objectif d'améliorer l'esthétique, de contribuer à la protection du béton (l'amélioration de l'imperméabilité du support ralentit la pénétration de l'humidité, de la vapeur d'eau et des agents agresseurs) et à la correction des défauts de surface (porosité, fissures). Les ouvrages concernés sont les bâtiments, les tunnels, les murs de soutènement, les écrans acoustiques et certains ponts. Un critère important de tenue dans le temps est la bonne adhérence au support ;

- **le béton projeté** : mélange de granulats, de ciment et d'eau, contenant parfois des ajouts, projeté sous pression d'air comprimé sur une paroi ;

- **les traitements électrochimiques** : Il en existe deux types :

- **la ré-alkalinisation et l'extraction des chlorures**. Ces traitements consistent à polariser l'armature à l'aide d'une anode enrobée d'une pâte saturée d'un électrolyte approprié et recouvrant le parement. Le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature (cathode). Les armatures plus profondes doivent être reliées électriquement à celle qui est directement polarisée. Ces traitements durent environ de une à six semaines et sont temporaires. On distingue la technique suivant laquelle un générateur électrique (technique du courant imposé) est placé entre l'anode et l'armature et la technique suivant laquelle l'anode, en alliage judicieusement choisi, est directement reliée à l'armature (courant galvanique). L'objectif de ces méthodes est de redonner au béton d'enrobage sa capacité à protéger les armatures. La réalcalinisation permet d'augmenter le pH d'un béton qui a été carbonaté ; la déchloruration permet d'extraire les ions chlorure qui ont pénétré l'enrobage,

- **la protection cathodique** : La protection cathodique des armatures permet de ralentir, voire d'arrêter la corrosion. Elle consiste à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil, dite potentiel de protection, qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement, ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA/m<sup>2</sup> de surface d'armature. Il existe deux techniques de protection cathodique :

- par courant imposé : un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature,
- par anode sacrificielle (courant galvanique) : l'anode, en alliage correctement sélectionné, est directement reliée à l'armature.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Une installation de protection cathodique est efficace tant que les éléments les moins durables que sont les électrodes de références et l'anode, sont fonctionnels. Ces éléments sont facilement remplaçables et, dans le cas d'une électrode de titane, la durée de vie peut atteindre 20 ans. Ce survol rapide des différentes méthodes de réparation et de protection montre qu'il existe aujourd'hui un large éventail de techniques permettant de prolonger la durée de vie des ouvrages dégradés. Le choix de la technique repose sur des aspects technico-économiques liés à la structure et nécessite une étude au cas par cas de manière à optimiser les coûts. [10]

### II-6-8) Quelques solutions pratiques pour protéger les fondations contre la corrosion :

#### -Principe du drain :

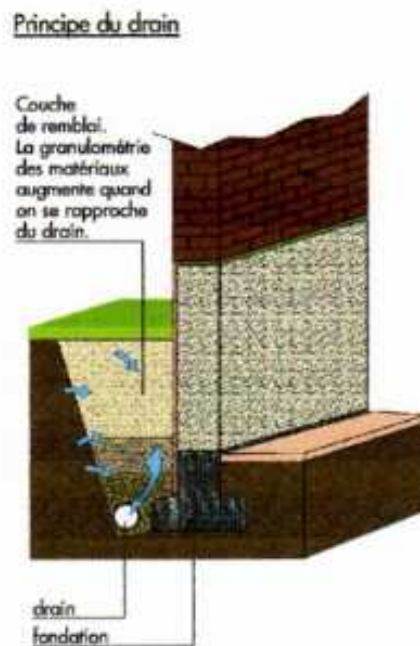


Figure II -38 : Principe du drain.

#### - Dégagement de la coupure de capillarité :

Pour combattre les remontées capillaires, les murs des constructions anciennes comportaient à leur base un appareillage de pierre très peu poreux (granit, silex) destinées à empêcher le phénomène. Les murs étaient ensuite élevés avec des pierres plus poreuses (calcaire par exemple) sans risque de remonté d'humidité.

Avec le temps, par apports progressifs de terre autour du bâtiment (jardinage, cultures...), le niveau de sol a pu être remonté jusqu'à venir recouvrir les premiers rangs de pierres calcaires

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

.Par infiltration , cette partie du mur s'est trouvée en contact avec l'eau et l'humidité ascensionnelle a pu se développer .

Le remède à la situation consiste dans ce cas à simplement dégager la terre pour retrouver le niveau initial et redonner son efficacité à la coupure capillaire.



Figure II -39 : Dégagement de la coupure de capillarité. [12]

### II-6-9) Conclusion :

Le tableau suivant conclue la dégradation due à la corrosion.

La corrosion				
Causes(Sources et origines)	Substances concernées	Mécanisme	Conséquences	Préventions et solutions
Carbonatation(CO <sub>2</sub> ); - Les ions chlorures ;	l'acier armatures).	(En présence d'eau et d'O <sub>2</sub> , le film passif est détruit par différents agents (Cl <sup>-</sup> ). La corrosion commence avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume supérieur à celui du fer initial entrainera des fissurations du béton.	- La diminution de la section utile; - La fissuration du béton d'encrobage ; - La perte d'adhérence.	Un bon dimensionnement ; la reconstitution de l'encrobage ; Utilisation des inhibiteurs de corrosion ; la protection cathodique...ect

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -7) L'alcali-réaction :

#### II -7-1) Introduction :

Vers 1940, STANTON a découvert une pathologie, la réaction alcali-granulats (ou alcali-réaction), qui affecte les bétons et que les chercheurs ont surnommée «le cancer des bétons». Sous ce terme se regroupent toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. [27]

#### II -7-2) Définition :

L'alcali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alcali-granulat, désigne la réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi, la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de la périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux. [6] [5]

#### II -7-3) Les différents types d'alcali-réaction :

Il est admis que les alcali-réactions se présentent sous trois types : réaction alcali-silice (les plus fréquentes), réaction alcali-silicate, réaction alcali-carbonate.

##### - Réaction alcali-silice (RAS) :

Certains granulats siliceux, lorsqu'ils sont constitués de silice amorphe, mal cristallisée ou microcristalline (par exemple des verres, de l'opale, de la calcédoine...) sont attaqués par la solution interstitielle qui occupe les pores du béton. La silice libérée réagit ensuite avec les alcalins  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  de cette solution interstitielle et l'on observe finalement, l'apparition de gels silico-alcalins s'ils renferment Si, Na (et ou K) ou calco-silico-alcalins s'ils contiennent, en plus, du calcium.

##### - Réaction alcali-silicate :

La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllo-silicates, tecto-

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

silicates, sains ou altérés). En ce qui concerne les produits de la réaction, on admet qu'ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcalisilice ; des études plus anciennes signalaient que l'on n'observe pas la production de gels siliceux.

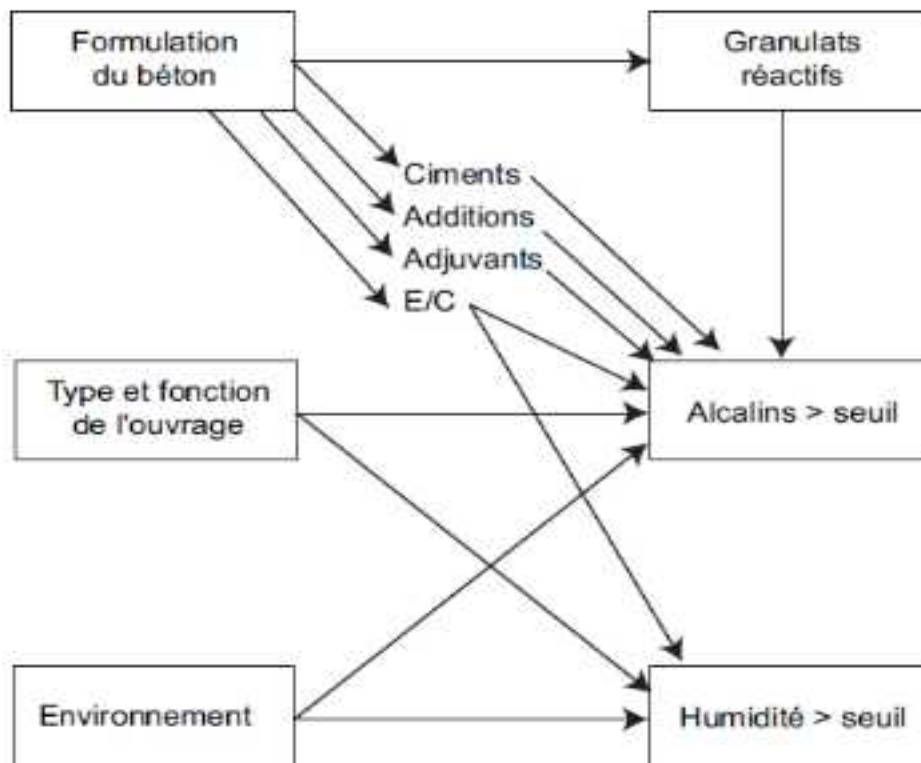
### - Réaction alcali-carbonate :

On désigne par cette expression la réaction manifestée par des calcaires dolomitiques qui renferment des impuretés phylliteuses. Sur le plan pratique, on retiendra que les expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf si le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses .[10]

### II -7-4) Conditions d'apparition de l'alcali-granulat :

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que :

- Le granulat soit potentiellement réactif,
- L'humidité relative excède 80 à 85%
- La concentration en alcalins dépasse un seuil critique. [9]



**Figure II -40** : facteurs intervenant sur l'apparition des 3 conditions nécessaires au déclenchement de l'alcali-réaction. [10]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

### II -7-5) Source de cette attaque :

Ces alcalins proviennent d'une part du ciment, et d'autre part, des autres constituants du béton (granulats, eau de gâchage, adjuvants,...). Initialement, ils sont présents à l'état diffus dans les phases anhydres, et ils se dissolvent à l'état basique ( $K^+OH^-$ ,  $Na^+OH^-$ ) lors de l'hydratation. [7]

### II -7-6) Pathologie et manifestations externes :

La dégradation du béton des ouvrages résultant du phénomène d'alcali-réaction a été répertorié dans de nombreux pays. En général les désordres apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans ou plus.

La pathologie et les manifestations externes se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Une fissuration ;
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures ;
- Des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels translucides ;
- Des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement,
- Des mouvements et déformations,
- Des colorations ou décolorations. [7]



a) Fissuration sévère d'un massif de fondation

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



. b) Exhaussement des bordures de crête sur le barrage du Chambon .

**Figure II -41** : Exemples bétons dégradés par l'alcali-réaction. [6]

### II -7-7) Mécanisme de l'alcali-réaction :

Les mécanismes de l'alcali-réaction consistent, généralement, en la dissolution de la silice par la solution interstitielle alcaline du béton suivie de la formation d'un gel gonflant. L'alcali-réaction dépend de plusieurs facteurs conditionnant les particularités de certains de ses mécanismes, à savoir :

**La structure** : c'est-à-dire les facteurs dépendant de la structure cristalline des minéraux réactifs dont le réseau peut avoir des défauts. Ces derniers sont en général dus à la destruction des liaisons siloxanes  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ . Ces anomalies constituent un site des réactions pour les ions présents dans la solution ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ).

**La texture** : les facteurs liés à cet aspect concernent essentiellement la granularité, la microfissuration et la microporosité. Ils conditionnent plus la cinétique des réactions. Les surfaces d'échange des granulats en relation avec l'état de microfissuration sont en croissance en fonction de leur classe granulaire.

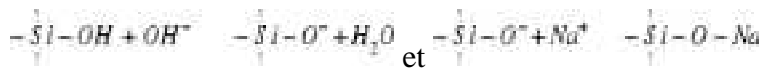
**La composition chimique**: on cite ici les facteurs : PH, concentrations en  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , et la quantité de la silice réactive.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

**La vitesse des réactions :** dépend essentiellement des facteurs structuraux, texturaux et des facteurs de composition.

Le mécanisme général des réactions alcali-silice est, généralement, présenté par un processus en deux étapes fondamentales :

\*Une première étape consistant à la neutralisation des radicaux silanols Si-OH suivant une réaction du type acide-base :



Les charges terminales sont équilibrées par les ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  diffusés. D'autres ions  $\text{OH}^-$  peuvent se présenter soit dans les trous de la structure soit sur sa surface externe.

L'accessibilité des  $\text{OH}^-$  et de  $\text{Na}^+$  est limitée par la dimension des trous et par leur distance à la surface de la particule.

\*La deuxième phase, est une attaque des ponts siloxanes Si-O-Si par les ions  $\text{OH}^-$  :



Lors de cette réaction, on remarque la destruction de la structure du minéral et la formation d'un gel silico-alcalin polymérisé. [7]

### II -7-8) Les méthodes d'essais de qualification des granulats :

#### Essais de qualification :

Concernant les essais de qualification, il convient de bien préciser les objectifs :

- S'il s'agit de qualifier un lot de granulats ou d'échantillons de roches ;
- S'il s'agit de qualifier une carrière.

#### Qualification des granulats :

Aux termes du projet de norme P 18-541 "Granulats pour béton hydraulique", en cours de parution, les granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction peuvent être qualifiés :

- Soit de **non réactifs (NR)**, pouvant être utilisés sans précautions particulières ;
- Soit de **potentiellement réactifs (PR)** c'est-à-dire susceptibles de réagir, si les conditions nécessaires et suffisantes à la manifestation de la réaction sont réunies. Ces granulats peuvent, dans la plupart des cas, être utilisés dans les bétons moyennant des précautions particulières définies dans les recommandations précitées.

Les granulats potentiellement réactifs comportent une sous classe, qui est celle des granulats **potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP)**. Ce sont des granulats qui contiennent des espèces réactives pour lesquelles existe la notion de teneur critique. Les effets expansifs

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

ne se manifestent que lorsque l'on se rapproche de cette teneur dite pessimale, ce phénomène étant lié à des notions de cinétiques de réactions et de rapport  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  des solutions interstitielles.

De tels granulats pourront être utilisés sans danger si d'une part, leur teneur en espèces réactives est suffisamment éloignée de la teneur critique, et d'autre part, s'ils sont utilisés seuls ou avec des granulats de même nature pétrographique.

### **La méthodologie de conduite d'une opération de qualification des granulats :**

La démarche de qualification des granulats impose d'identifier le type de granulats auquel on a à faire et les espèces réactives qui sont contenues dans ce granulat. Cela implique, d'une part la recherche d'espèces réactives par une identification pétrographique du granulat au sens large et d'autre part par la vérification de la potentialité de réactivité qui implique des essais rapides et à long terme.

**La recherche d'espèces réactives** peut s'appuyer, soit uniquement sur une analyse chimique, soit par des examens pétrographiques plus poussés utilisant tout ou partie de méthodes telles que :

- l'analyse pétrographique sur lame mince,
- la diffraction X,
- la spectrographie infra-rouge,
- des essais de réactivité par examen au microscope électronique à balayage après traitement alcalin, etc.

Après identification pétrographique du granulat :

- soit le granulat ne contient pas d'espèces réactives en quantité néfaste et il est directement classé non réactif (NR),
- soit le granulat contient des espèces réactives en quantité supposée critique ou néfaste, et dans ce cas là, on vérifie que la présence et la teneur de ces espèces réactives confèrent au granulat une potentialité de réactivité (PR) qui peut être testée par l'un des essais normalisés.

**La vérification de la potentialité de réactivité :** on procède à des essais qui sont :

- soit des essais rapides donnant des résultats, dans un délai de l'ordre d'une semaine :
- essais Microbar P 18-588 ;
- test cinétique P 18-589 ;
- autoclave P 18-590.
- soit des essais à plus long terme, qui sont aussi des essais accélérés, mais qui donnent des résultats en quelques mois :

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

. essais sur mortier P 18-585, . essais sur béton P 18-587.

Ces essais peuvent être classés en deux familles d'essais :

- d'une part, les essais de gonflement dans des conditions d'accélération qui utilisent l'alcalinisation du milieu et la température. Si le gonflement est inférieur à un seuil déterminé, le granulats est classé "non réactif", si le gonflement est supérieur au seuil déterminé, le granulats est classé "potentiellement réactif" avec une plage d'incertitude de 10 % autour de la valeur du seuil.

- d'autre part, un essai chimique basé sur la mesure de l'évolution du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  en fonction du temps d'une solution de soude dans laquelle le granulats broyé est conservé à 80°C.

### Les essais rapides :

Trois essais permettent d'obtenir un résultat de qualification en moins d'une semaine. Les trois normes proposées sont expérimentales.

### L'essai Microbar P 18-588 :

Cet essai utilise des micro-éprouvettes 1 x 1 x 4 cm qui sont soumises successivement à une cure humide, à la vapeur d'eau bouillante, puis à une cure alcaline en milieu KOH à 10 % et à 150°C et dont on mesure les variations dimensionnelles pour trois rapports C/G (ciment - granulats).

### L'essai de cinétique chimique P 18-589 :

Cet essai est une optimisation déterminante de l'ASTM C 289 ou de la norme P 18-584 par introduction notamment de la notion de cinétique de dissolution et du suivi de l'évolution du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de la solution.

Aux échéances de 24, 48, 72 heures, le point représentatif de l'évolution du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  est reporté sur un diagramme qui permet le classement non réactif, potentiellement réactif ou potentiellement réactif à effet de pessimum.

**L'essai P 18-590 :** Cet essai s'appuie sur le suivi dimensionnel d'éprouvettes 4 x 4 x 16 suralcalinisées à 4 % en équivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  par rapport au ciment, qui après cure humide et une conservation pendant 24 heures, sont soumises à un autoclavage à une pression de 0,15 MPa durant 5 heures.

Les essais P 18-588 et P 18-589 sont actuellement les seuls qui permettent le classement (PRP) (potentiellement réactifs à effets de pessimum). Il existe dans le projet de fascicule de documentation P 18-542 un diagramme de classement des essais P 18-589 et P 18-588 qui

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

permet le classement des granulats en (NR), (PR), (PRP) suivant leur appartenance à une des trois zones définies.

### Les essais à moyen terme :

Les deux normes proposées sont expérimentales.

Dans les essais à moyen terme, il s'agit d'optimisation extrêmement importante des essais ASTM C 227 d'une part, et de l'essai canadien ACNOR, optimisation qui porte sur l'alcanisation du milieu (1,25 % en équivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  par rapport au ciment) et sur le maintien de conditions strictes d'hygrométrie et de température (38°C et saturation d'humidité) qui sont extrêmement importantes pour la fiabilité de ces essais.

### Pour la norme P 18-585 :

Les essais sont réalisés sur mortier (prismes 2,5 x 2,5 x 28,5 cm) et concernent les sables. Les résultats sont obtenus à six mois avec une mesure indicative à trois mois.

### Pour la norme P 18-587 :

Les essais sont réalisés sur béton (prismes 7 x 7 x 28 cm) et concernent les gravillons ; le sable utilisé pour la confection des prismes étant un sable non réactif. Les résultats sont obtenus à huit mois. [7]

## II -7-9) Traitements de protection et de réparation :

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de traitement qui assure la réparation définitive d'un ouvrage atteint d'alcali-réaction : les procédés existants ne font que prolonger la durée de vie du service. Ces traitements interviennent à deux niveaux: chimique et mécanique.

Au niveau chimique, partant du principe que le déroulement de l'alcali-réaction exige simultanément {eau + alcalins + silice soluble}, on peut soit assécher le béton soit inhiber la réaction alcali-silice.

Au plan mécanique, on contrecarre l'effet des contraintes résultant de l'expansion: on opère alors soit par libération de ces contraintes soit en s'y opposant par des renforcements variés.

### II -7-9.1) Assèchement du béton :

On dispose de plusieurs techniques pour réduire les venues d'eau dans le béton.

#### - Injection des fissures

Par injection d'un produit scellant, on peut obturer les fissures et réduire ainsi la pénétration, à condition que ce produit soit suffisamment souple pour suivre l'élargissement de la fissure avec le temps : on emploie souvent des résines époxydiques. Ce genre de traitement n'a

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

qu'une efficacité très réduite car il n'empêche pas l'eau de pénétrer par les espaces interfissurés et il ne freine pas le développement de la fissuration superficielle.

### - Application de revêtements superficiels

Lorsqu'il s'agit d'une simple application de peinture, donc de faible épaisseur (<300 ou 400 μm), le film n'est pas totalement imperméable à l'eau et il est perméable à la vapeur d'eau : le résultat est donc médiocre.

Par contre, l'application d'un revêtement plus épais (quelques millimètres), généralement sous la forme d'une membrane en matière plastique, est une pratique qui réduit considérablement la pénétration de l'eau dans le béton. L'efficacité du film protecteur est évidemment abaissée lorsqu'il est déchiré, situation à envisager au cours de son vieillissement. Cette technique a été fréquemment mise en œuvre et a montré son aptitude à prolonger la durée de service des ouvrages.

### - Imprégnation par des agents hydrophobes

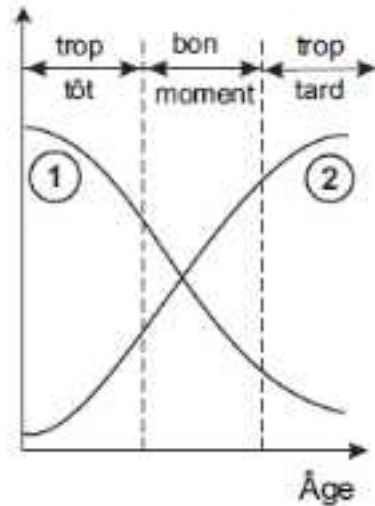
Plusieurs expérimentations en laboratoire et des retours de mesures in situ montreraient qu'on peut fortement diminuer l'humidité relative dans un béton et ralentir le gonflement consécutif à l'alcali-réaction par imprégnation au moyen d'une solution hydrophobe : produits essentiellement à base de silanes.

### II -7-9.2) Imprégnation par des agents chimiques inhibiteurs :

Des sels de lithium pouvaient contrer les effets de l'alcali-réaction :  $\text{LiNO}_3$  est le plus sûr d'emploi. Néanmoins, comme la pénétration du lithium dans le béton est faible (au mieux 5 cm), ce genre de traitement présente essentiellement un intérêt pour des ouvrages tels que des bétons de revêtement routier.

Dès lors que le degré de fissuration du béton est le facteur essentiel qui commande la profondeur de pénétration du lithium, il se pose la question suivante : à quel moment faut-il traiter un ouvrage dont la fissuration progresse avec le temps?

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -42:** Schématisation des évolutions comparées de la dégradation et de la résistance à la pénétration de lithium .D'après [42]

Si le traitement est appliqué trop tôt, il est inefficace car non pénétrant : trop tard implique que les dégâts sont irréversibles donc incurables.

Thomas et Stokes [42]résumant la situation sur la figure ci-dessus et suggèrent que l'optimum correspond à une expansion de l'ordre de  $1.10^{-3}$ .

### II -7-9.3) Relâchement des contraintes :

Un traitement propre aux barrages, consiste à relâcher les contraintes en réalisant des saignées par sciage. Il a été appliqué, notamment, aux barrages de Beauharnois et Mactaquac (au Canada), du Chambon (en France) : dans ce dernier cas, trois campagnes de sciage (1995-1997) ont permis de réduire une contrainte de compression parasite, évaluée à 5 MPa, en diminuant l'effet « voûte » exercé sur les appuis et en redonnant à cet ouvrage son fonctionnement de barrage-poids.

### II -7-9.4) Renforcement par des armatures :

Une structure endommagée par l'alcali-réaction peut être renforcée par la pose d'armatures actives ou passives. Ces armatures constituent un réseau soit unidirectionnel, soit bi ou tridirectionnel suivant l'effet recherché : une armature agit en effet de façon anisotrope et ne s'oppose qu'au gonflement suivant sa direction.

Cette technique a été employée dans des ouvrages variés : appuis de pont, piles du barrage du Temple-sur-Lot, massifs de fondation de pylônes de lignes électriques. Dans ces derniers cas,

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

les massifs ont été épinglés par des barres d'acier Ø 25 mm et recouverts par une couche de nouveau béton ; dans les deux ans suivant la réparation la vitesse moyenne d'expansion est passée d'une valeur de 0,011 %/an (moyenne de 6 années précédant la réparation) à 0,002 % environ, soit cinq fois moins.

D'autres solutions innovantes de remplacement apparaissent : par exemple utilisation de plaques d'acier frettant l'élément endommagé, de feuilles de polymères renforcés de fibres de carbone . [10]

### II -7-10) Conclusion :

Le tableau suivant conclue la dégradation due au cancer des bétons ( l'alcali-réaction).

L'alcali-réaction					
Causes (Source et origine)	Substance et concernée	Mécanisme	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
Des alcalins (Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> )	La silice contenue dans les granulats réactifs	La dissolution de la silice par la solution interstitielle alcaline du béton suivie de la formation d'un gonflant.	Le gonflement des ouvrages atteints ; La fissuration et chute caractéristiques mécaniques du béton.	Evitement des alcalins ; Assèchement du béton ; l'imprégnation par des agents chimiques inhibiteurs.	Essais de qualification Microbar P 18-588 ; Test cinétique P 18-589 ; Autoclave P 18-590.

### II -8) La lixiviation en eau douce :

#### II -8-1) Définition :

La phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé. Si le béton se trouve au contact d'une eau douce, très peu chargée en ions, et donc de pH plus faible que celui de la solution interstitielle, la pâte de ciment durcie se trouve en déséquilibre avec ce milieu. On constate alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte : dissolution de la portlandite et attaque progressive des C-S-H. Ce phénomène est lent (quelque centimètre pour plusieurs centaines d'années) et ne pose problème que dans le cas où le béton est potentiellement au contact permanent de l'eau douce.

La lixiviation entraîne une variation très importante de la porosité et donc une variation forte des propriétés de transfert, notamment la diffusivité. Les propriétés mécaniques sont également affectées : on constate par exemple que la résistance à la compression chute fortement. Les autres propriétés mécaniques comme le module d'élasticité et la résistance en flexion sont aussi affectées.

Les cinétiques de dégradation sont très variables et dépendent en particulier du matériau et de l'environnement aqueux. Par exemple, F. Badouix rapporte que, pour des durées d'exposition

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

et un environnement agressif comparables (53 et 66 ans), les couches superficielles dégradées du barrage de Saint Etienne du Vigan et de l'écluse de Krembs ont pour épaisseur respectives 6 à 8 mm d'une part, et 1 à 3 mm d'autre part. Cet écart est imputé aux ciments utilisés, un CEM I/CPA pour le barrage et un CEM II/CPJ pour l'écluse. Y. Fujiwara a montré que la présence d'ions dissous dans l'eau modifie aussi fortement les cinétiques de dégradation de bétons enfouis dans un sol. En effet, certains de ces bétons, âgés de 60 à 100 ans, ont été dégradés sur quelques centimètres en présence d'une eau saline, soit des épaisseurs dix fois plus importantes qu'en eau douce.

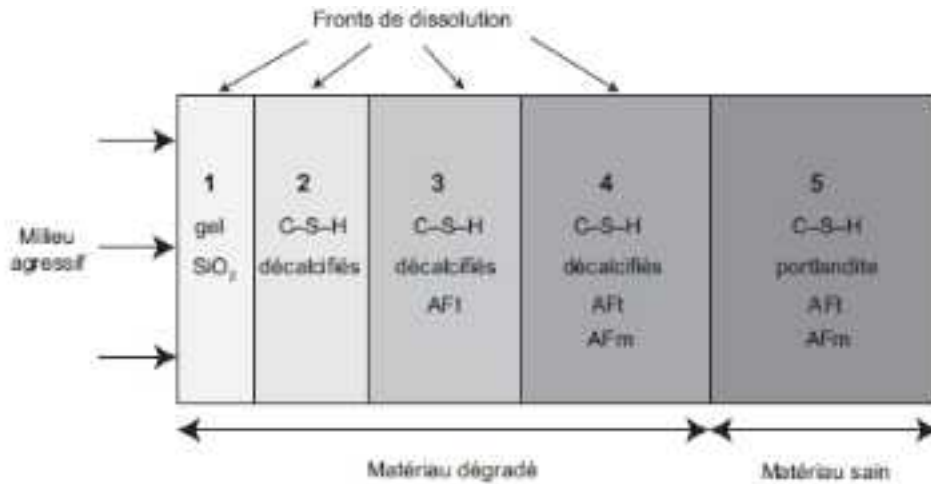
Des études précédentes ont mis en évidence une dissolution progressive des principaux hydrates : d'abord la portlandite, qui est l'hydrate le plus soluble, puis le monosulfoaluminate de calcium, et enfin l'ettringite. Après que la portlandite soit totalement dissoute, les C-S-H se décalcifient jusqu'à former, dans l'état ultime de dégradation un gel de silice.

La variation de porosité (et donc des autres caractéristiques) dépend notamment de la quantité de portlandite présente. L'utilisation d'un ciment aux cendres volantes ou l'ajout de fumée de silice, en réduisant la quantité de portlandite, permet en général d'améliorer la résistance à la lixiviation et de réduire la chute de résistance. Un rapport eau/liant plus bas permet également de diminuer la vitesse de lixiviation. [5]

### II -8-2) Mécanisme :

En ce qui concerne le béton on parle plus généralement de lixiviation qui, dans sa définition première, est une opération qui consiste à faire passer lentement un solvant à travers un matériau en couche épaisse afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles. C'est le terme souvent employé pour décrire le phénomène d'extraction progressive des ions calcium (dissolution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et décalcification des C-S-H) lors de la percolation des solutions agressives dans le béton. La lixiviation peut être décrite comme une dissolution progressive résultant d'une succession d'états d'équilibre entre les hydrates et la solution : au fur et à mesure que les ions agressifs arrivent au contact des hydrates, l'équilibre entre ces hydrates et la solution interstitielle est rompu ; mais il est aussitôt rétabli par une nouvelle dissolution des hydrates et/ou par la précipitation d'un nouveau composé selon que la solution est sous-saturée ou sursaturée par rapport à ce composé. Le terme de « lessivage » parfois employé, a un sens analogue. Les composés précipités peuvent être nocifs ou non vis-à-vis de la durabilité du béton. [10]

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton



**Figure II -43** : représentation schématique de la dégradation d'une pâte de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure déionisée stabilisée à pH 7.

- Zone 1 : solubilisation totale des hydrates Ca(OH)<sub>2</sub>, mono et trisulfoaluminates ; lixiviation totale du calcium des C-S-H et formation d'un gel résiduel de silice hydratée très peu soluble;
- Zones :2, 3 et 4: solubilisation totale de Ca(OH)<sub>2</sub>, décalcification progressive des C-S-H et solubilisation des phases AFm (monosulfoaluminates) d'abord, puis des phases AFt (trisulfoaluminates) ; Zone 5 = matériau non dégradé. [10]

### II -8-3) Conséquences générales :

La dissolution des hydrates, accompagnée ou non de la précipitation de composés nouveaux, a deux effets majeurs :

- d'une part, un accroissement de la porosité du béton qui a pour conséquence une augmentation de sa perméabilité et de sa diffusivité. L'augmentation de porosité se traduit également par une dégradation plus ou moins importante des caractéristiques mécaniques : module d'Young, résistances;
- d'autre part, selon la nature, la solubilité et les conditions de précipitation des composés néoformés, un gonflement et une fissuration plus ou moins importants du matériau : ce peut être le cas, par exemple, de l'ettringite due à une agression par des sulfates d'origine externe.

### L'agressivité des eaux naturelles dépend :

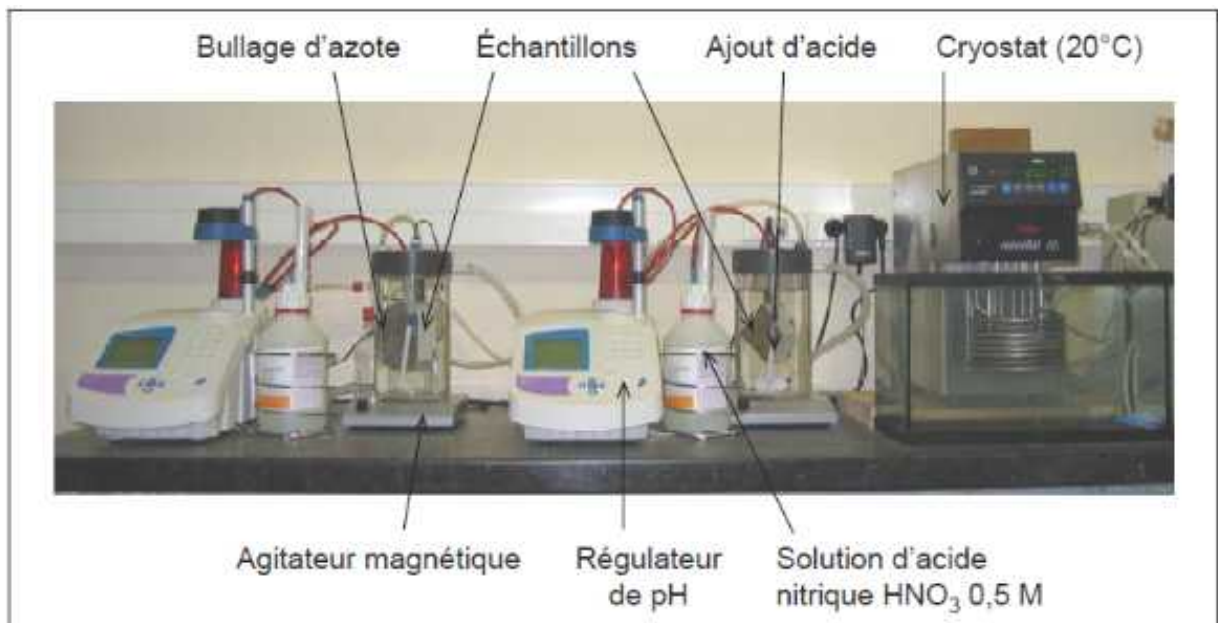
- du pH (compris entre 4 et 6,5 suivant les cas) ;
- de la teneur en dioxyde de carbone agressif ;
- de la dureté ou titre hydrotimétrique (principalement [Ca<sup>2+</sup>] + [Mg<sup>2+</sup>]) ;
- de la mobilité du milieu agressif.

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

Le processus d'altération correspond essentiellement à la lixiviation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et des silicates de calcium hydratés C-S-H (accompagnée de la dissolution plus tardive des phases AFm et AFt). Il conduit à une augmentation de la porosité et, dans les cas les plus graves, à la dégradation des propriétés mécaniques du matériau. [10]

### II -8-4) Essai de lixiviation à pH constant :

L'essai utilisé reprend le principe de celui développé au CEA pour étudier les effets de la lixiviation et des sulfates sur les pâtes de ciment (Planel, 2006). A l'issue de la cure humide « 24 h - Eau », l'échantillon de béton est immergé pendant au moins 60 jours dans 1,5 L de solution régulée à pH = 5 par ajout d'acide nitrique. Tous les 30 ml d'acide ajoutés, la solution est renouvelée et dosée par spectroscopie d'absorption atomique. Les quantités d'acide ajoutées et d'ions calcium passés en solution donnent accès aux cinétiques de lixiviation, et l'épaisseur dégradée peut être évaluée en fin d'essai après pulvérisation de phénolphthaléine sur une section de l'échantillon. [11]



**Figure II -46 :** Photo des deux dispositifs expérimentaux de lixiviation à pH constant. [11]

### II -8-5) Les critères de résistance à l'agression par les eaux naturelles : sont :

- la compacité du béton (perméabilité et diffusivité réduites) ;

## Chapitre II: Les attaques chimiques du béton

- l'incorporation, aux ciments ou aux bétons, d'additions minérales (laitiers de haut-fourneau, cendres silico-alumineuses, fumées de silice, pouzzolanes) qui abaissent la teneur en chaux et sont favorables à l'accroissement de compacité du matériau. [10]

### II -8-6) Conclusion :

Le tableau suivant conclue la dégradation due à l'attaque par l'eau douce :

La lixiviation					
Causes (Sources et origines)	Substances concernées	Mécanisme	Conséquences	Préventions et solutions	Normes et essais
Eau douce.	La portlandite Les C-5-H.	dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et décalcification des C-5-H	Un accroissement de la porosité Un gonflement et une fissuration	Augmentation de la compacité Utilisation des ajouts minéraux.	Essai de lixiviation à pH constant

# Chapitre III: Résultats et discussions



### Chapitre III: Résultats et discussions

Les analyses chimiques effectuées au niveau de notre laboratoire, sur un échantillon représentatif résultant de plusieurs échantillons primaire prélevés à partir de saignées, tranchées de surface et d'un sondages profonds, ont permis de définir des teneurs en CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et autres. Les résultats sont portés sur le tableau ci-dessous.

#### Carrière de dolomite de teiouelt

#### Carrière de calcaire dhafri

Paramètres	Unités	Valeurs en	Méthodes
Perte au feu	%	46,31	Hach lange après oxydation
Silice (SiO <sub>2</sub> )	%	0,50	Fluorescence X
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,42	Fluorescence X
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,65	Fluorescence X
Oxyde de calcium (CaO)	%	29,46	Fluorescence X
Oxyde de magnésium (MgO)	%	21,37	Fluorescence X
Sulfates (SO <sub>4</sub> ) exprimé en (SO <sub>3</sub> )	%	0,22	Spectrophotométrie hach lange
Oxyde de potassium (K <sub>2</sub> O)	%	0,03	Fluorescence X
Oxyde de sodium (Na <sub>2</sub> O)	%	0,17	Fluorescence X
Oxyde de titane (TiO <sub>2</sub> )	%	0,05	Fluorescence X
Oxyde de manganèse (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,08	Fluorescence X
Phosphates exprimés en (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	0,11	Fluorescence X
Chlorures (Cl)	%	0,072	Méthode charpentier Volhart
Fluorure (F)	%	0,002	Spectrophotométrie hach lange

Paramètres	Unités	Valeurs en	Méthodes
Perte au feu	%	44,38	Hach lange après oxydation
Silice (SiO <sub>2</sub> )	%	0,56	Fluorescence X
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,42	Fluorescence X
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,65	Fluorescence X
Oxyde de calcium (CaO)	%	50,12	Fluorescence X
Oxyde de magnésium (MgO)	%	2,31	Fluorescence X
Sulfates (SO <sub>4</sub> ) exprimé en (SO <sub>3</sub> )	%	0,27	Spectrophotométrie hach lange
Oxyde de potassium (K <sub>2</sub> O)	%	0,04	Fluorescence X
Oxyde de sodium (Na <sub>2</sub> O)	%	0,17	Fluorescence X
Oxyde de titane (TiO <sub>2</sub> )	%	0,06	Fluorescence X
Oxyde de manganèse (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	0,08	Fluorescence X
Phosphates exprimés en (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	0,14	Fluorescence X
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	%	0,011	Méthode charpentier Volhart
Fluorure (F <sup>-</sup> )	%	0,004	Spectrophotométrie hach lange
Matières organiques MO	%	0,003	Oxydation au dichromates (LCK)

III.1. résultats d'essai mécaniques sur les éprouvettes après ajout des différents composés suivant a différentes concentrations:

- ❖ Le chlorure de sodium (NaCl) qui est prépondérant ;
- ❖ Le chlorure de magnésium (MgCl<sub>2</sub>) ;
- ❖ Le sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>) ;
- ❖ Le sulfate de calcium (CaSO<sub>4</sub>) ;
- ❖ Le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) ;
- ❖ Le carbonate acide de potassium (NaHCO<sub>3</sub>).

### III.1.A/La Résistance à la compression du béton formulé par agrégats calcaire (carrière Dhafri) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le NaCl a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

### Chapitre III: Résultats et discussions

Quantité de sel ajouté(NaCl)	02 jours (MPa)	15 jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
<b>0 g</b>	12.6	22.1	32.6	41.2
<b>7.5</b>	12.3	22.0	32.7	41.3
<b>15</b>	12.9	22.2	32.8	41.5
<b>22.5</b>	12.2	21.9	32.5	41.1
<b>30</b>	13.44	22.1	32.6	42.00

#### III.2.A/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le NaCl a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

Quantité de sel ajouté(NaCl)	02 jours (MPa)	15 jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
<b>0 g</b>	9.0	19.0	14.0	38
<b>7.5</b>	9.1	20.2	14.8	37.5

### Chapitre III: Résultats et discussions

<b>15</b>	9.5	20.5	15.0	38.1
<b>22.5</b>	10.0	19.90	14.6	37.4
<b>30</b>	9.9	21.0	14.2	38.2

Remarque :

\*on remarque que la résistance mécanique ne varie pas pour les différentes concentrations en NaCl cela veut dire que ce sel n'attaque pas la microstructure aluminosilicatée des différentes phases cimentaires

#### III.1.B/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives compensées par le MgCl<sub>2</sub> à différentes concentrations et à différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci-dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(MgCl<sub>2</sub>)</b>	<b>02 jours (MPa)</b>	<b>15 jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	09.1	19.2	25	31.1
<b>7.5</b>	09.2	18.5	24.9	31.4

### Chapitre III: Résultats et discussions

<b>15</b>	10.0	19.4	24.7	31.8
<b>22.5</b>	9.9	19.0	25.1	30.7
<b>30</b>	9.2	19.6	25.4	30.4

#### III.2.B/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le MgCl<sub>2</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(MgCl<sub>2</sub>)</b>	<b>02 jours (MPa)</b>	<b>15 jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	07.1	16.8	20.6	28.2
<b>7.5</b>	07.3	17.1	19.7	28.4
<b>15</b>	07.8	16.9	20.0	28.0
<b>22.5</b>	8.0	16.6	20.3	27.9
<b>30</b>	8.2	17.3	20.4	27.8

Observation :la présence du Mg engendre des réactions chimiques avec le sodium et potassium (eau de gachageet ciment lui même) donne un désordre du granulats et formation du Burcite (Alcaliréaction au carbonate)

## Chapitre III: Résultats et discussions

### III.1.C/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire

(carrière dhafri) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le CaCl<sub>2</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

Quantité de sel ajouté(CaCl <sub>2</sub> )	02 jours (MPa)	15 jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
0 g	12.7	20.0	32.6	41.4
7.5	12.5	21.6	32.4	41.3
15	12.9	21.8	32.3	41.5
22.5	12.2	21.9	31.9	41.1
30	13.1	22.1	32.6	42.00

### III.2.C/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite aux différents ajouts du milieu agressives composées par le CaCl<sub>2</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

### Chapitre III: Résultats et discussions

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

Quantité de sel ajouté(CaCl <sub>2</sub> )	02jours (MPa)	15jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
0 g	9.0	19.0	14.0	38
7.5	9.1	20.2	14.8	37.5
15	9.5	20.5	15.0	38.1
22.5	10.0	19.90	14.6	37.4
30	9.9	21.0	14.2	38.2

Remarque :

\*on remarque que la résistance mécanique ne variée pas pour les différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub> cela veut dire que ce sel n'attaque pas les microstructure aluminosilicaté des différentes phases cimentaires

#### III.1.D/ La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire

(carrière dhafri) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite aux différents ajouts du milieu agressives composées par le CaSO<sub>4</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

Quantité de sel ajouté(CaSo <sub>4</sub> )	02jours (MPa)	15jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
0 g	08.2	16.2	21.4	25.7

### Chapitre III: Résultats et discussions

<b>7.5</b>	08.5	16.5	21.6	25.4
<b>15</b>	08.7	15.9	22.0	25.1
<b>22.5</b>	07.9	16.6	21.7	26.0
<b>30</b>	07.8	16.8	21.9	25.2

#### III.2.D/ La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite aux différents ajouts du milieu agressives composées par le CaSo<sub>4</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(CaSo<sub>4</sub>)</b>	<b>02jours (MPa)</b>	<b>15jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	07.4	14.7	19.8	23.7
<b>7.5</b>	07.3	14.5	19.5	23.4

### Chapitre III: Résultats et discussions

<b>15</b>	07.8	14.3	20.0	22.9
<b>22.5</b>	07.2	14.2	19.7	23.2
<b>30</b>	07.6	14.8	19.3	23.9

**Observation :** sulfate du calcium issus de la déshydrations du gypse ne libère pas les sulfates agressives donc il n'aura aucune attaque sulfatique

#### III.1.E/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) : Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le  $MgSO_4$  a différentes concentrations et a différents temps de durcissement Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(<math>MgSO_4</math>)</b>	<b>02jours (MPa)</b>	<b>15jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	04.1	08.3	11.6	13.2
<b>7.5</b>	04.6	08.4	11.2	13.4

### Chapitre III: Résultats et discussions

<b>15</b>	03.9	08.1	10.8	13.2
<b>22.5</b>	04.2	07.9	11.4	12.9
<b>30</b>	04.4	08.2	11.3	13.3

#### III.2.E/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le MgSo<sub>4</sub> a différentes concentrations et a différents temps de durcissement Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(MgSo<sub>4</sub>)</b>	<b>02jours (MPa)</b>	<b>15jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	03.5	07.3	10.5	12.1
<b>7.5</b>	03.1	07.5	10.2	11.7
<b>15</b>	02.9	07.2	10.0	11.9
<b>22.5</b>	03.2	07.4	10.3	12.2
<b>30</b>	03.6	07.1	10.0	11.8

**Observation** : ce composé est très soluble il libère le magnésium et les sulfates le 1<sup>er</sup> sera responsable de la réaction de la formation de la burcite(alcali-carbonateréaction ) du granulats (RAG) le second Sera la cause de la formation de l'étringit.

## Chapitre III: Résultats et discussions

### III.1.F/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats calcaire (carrière dhafri) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite au différent ajouts du milieu agressives composées par le  $\text{NaHCO}_3$  a différentes concentrations et a différents temps de durcissement Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

Quantité de sel ajouté( $\text{NaHCO}_3$ )	02jours (MPa)	15jours (MPa)	28 jours (MPa)	90 jours (MPa)
0 g	12.6	19.9	31.6	40.3
7.5	12.5	20.7	31.4	40.2
15	12.9	20.2	31.8	39.8
22.5	12.2	20.9	31.9	39.7
30	13.1	20.8	31.2	40.0

### III.2.F/La Résistance à la compression du béton formé par agrégats dolomitique (carrière Teiouelt) :

Cette partie présente les résultats de la résistance à la compression du béton qui permet d'évaluer le comportement mécanique suite aux différents ajouts du milieu agressives composées par le  $\text{NaHCO}_3$  a différentes concentrations et a différents temps de durcissement

### Chapitre III: Résultats et discussions

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci -dessous selon le milieu correspondant.

<b>Quantité de sel ajouté(NaHCo3)</b>	<b>02jours (MPa)</b>	<b>15jours (MPa)</b>	<b>28 jours (MPa)</b>	<b>90 jours (MPa)</b>
<b>0 g</b>	7.8	17.7	13.2	36.1
<b>7.5</b>	08.3	17.9	12.8	36.5
<b>15</b>	07.9	18.1	13.1	35.8
<b>22.5</b>	08.1	17.5	12.9	36.4
<b>30</b>	07.7	18.0	12.7	35.9

**Observation :** cette substance n'attaque pas les microstructures du béton en libérant le CO<sub>2</sub> Actif Le Ph du béton chutera jusqu'à des valeurs sinférieuresa 07 donc le milieu deviendra acide (carbonatation)

# Conclusion générale

Les besoins des hommes évoluent eux aussi avec le temps. Des bâtiments ou des équipements construits il y a seulement quelques dizaines d'années peuvent ne plus être adaptés aux besoins actuels et aujourd'hui démolis. Mais certains ponts construits il y a plusieurs siècles sont encore très empruntés. En fonction de l'évolution prévue des besoins, est donc définie pour chaque ouvrage une durée de vie ou « durabilité » souhaitée (50 ou 100 ans par exemple), pendant laquelle le bâtiment, stade ou pont en question devra non seulement être stable, mais en plus offrir un confort d'utilisation constant, moyennant un entretien régulier. Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence, en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales.

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

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

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

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

Le béton est un système chimique fortement basique, évolutif, plus ou moins réactif au contact du milieu extérieur souvent plus « acide » (atmosphère, eaux, solutions salines, acides). Le béton est un solide poreux, qui renferme dans ses pores une solution interstitielle enrichie en alcalis dont le pH varie de 12,5 à 13,5. Le système chimique du béton, avec son pH élevé, est presque toujours en déséquilibre avec son environnement, dont le pH est bien inférieur. L'eau de l'extérieur pénètre à travers le système des pores et des capillaires, même dans un béton non fissuré, entraînant une diminution de son pH. Cette eau de l'extérieur peut également apporter des agents agressifs tels que les ions sulfates.

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

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

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

Compte tenu des multiplicités des types d'agressions chimiques d'une part, et des similitudes des dégradations constatées d'autre part, il est souvent très difficile d'établir un diagnostic simple et univoque. Mais malgré ces similitudes, on peut distinguer les attaques chimiques d'après les manifestations et les caractéristiques de chaque attaque : la corrosion par exemple est induite soit par la carbonatation, soit par la pénétration des ions chlorure, et dans la plupart du temps on peut différencier entre les deux par l'éclatement : s'il est local, on parle des ions chlorures mais s'il est général c'est une carbonatation. Même les autres attaques telles que la réaction alcali-granat (due aux granulats réactifs), l'attaque par les acides, par les sulfates et par l'eau de mer engendrent une fissuration et un gonflement mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations qui la caractérisent. Donc la connaissance du milieu ou de l'environnement où se trouve l'ouvrage participe à connaître l'attaque.

La durabilité pose un problème lorsque la résistance d'un matériau à la dégradation est moins grande que celle qui est nécessaire pour s'opposer à l'agressivité du milieu dans lequel il doit fonctionner. Par exemple, l'acier ne sera pas affecté par la corrosion dans un environnement sec et sans sel, mais il le sera en présence d'humidité et d'ions chlorures.

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

A l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes à la durabilité font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. La perméabilité du béton doit presque toujours être prise en considération. Les milieux les plus agressifs pour le béton sont soit des acides, soit salins (nitrates, sulfates). On peut observer des dégradations du béton par dissolution et érosion en cas d'attaque acide, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaques salines, en particuliers sulfatiques.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les

spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

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

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

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

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

Pour le béton, l'environnement externe (l'eau de pluie ou de ruissellement, le CO<sub>2</sub> de l'air) apparaît comme un milieu extrêmement corrosif. C'est un peu comme si nous devions vivre dans un environnement constitué d'acide sulfurique !

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



