



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et Génie Civil

## Mémoire fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de master Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux En Génie Civil

## Thème

Etude de réhabilitation des structures en béton armé

**Encadreur :**

- Dr. FARIK Ali

**Co-encadreur :**

- Dr. Mani mohamed

**Présente par :**

- MILOUDI Bade Eddine

- LETOUFA Soufiane

Soutenu le 14/06/2022. Devant le jury composé de:

Dr. Mani mohamed .....Président

Dr. DJEDID Tarek ..... Examineur

Mr. BEDDADI Eleid..... Examineur

Année Universitaire 2021/2022

## *Dédicace*

*Nombreuses sont les personnes qui m'ont marqué durant ma vie, autant d'amour qui m'a entouré et qui a fait de moi cette personne que je suis.*

*A tous je leur dédie ce modeste travail.*

*C'est avec le grand honneur que je le dédie aux êtres les plus chers de ma vie.*

*Ma mère et ma femme qui m'ont toujours encouragé dans ma vie.*

*Toute la famille : mes cousins.*

*Mes amis et mes collègues qui sèment le bonheur sur mon chemin.*

*Enfin je ne saurai oublier toute les personnes trop nombreuses pour être citées ici.*

*A toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail, par un conseil, ou même un sourire*

## ***Remerciement***

*C'est avec l'aide de Dieu tout puissant que ce modeste travail a peut-être réalisé, Dieu qui m'a donné foi raison et lucidité.*

*J'ai l'honneur d'exprimer toute ma gratitude à mes promoteurs*

***M. FARIK Ali & MANNI Mohamed** pour leurs conseils et pour m'avoir guidé dans ce modeste travail.*

*Je remercie également le personnel du groupement **berkine HBNS** pour leurs conseils et aide qu'ils m'ont donné pour compléter ce travail.*

*Je tiens aussi à remercier tous les enseignants du Département de Hydraulique & Génie Civil de Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued qui ont contribué de près ou de loin pour terminer la formation.*

*En définitives je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin de façon directe ou indirecte à la réussite de ce travail pour lequel nous avant tant consacré.*

## *Résumé*

La qualité du béton est souvent influencée par les caractéristiques de ses constituants (eau de gâchage, Granulats, Ciments, Adjuvants), mais d'autres facteurs interviennent pour influencer la durabilité des constructions en béton armé telle que l'agressivité des sols aux alentours immédiats des massives, la porosité, la perméabilité, la composition chimique des eaux de circulation superficielle etc...

Cette étude a été menée dans le but de réparation de la dégradation et la détérioration des supports de l'unité Water Flood, Dans ce mémoire nous parlerons de ces pathologies; comment sont détectées, leurs causes d'y être, choisir la méthode de réparation et comment éliminer les pathologies existes et éviter tous les pathologies similaires.

A partir des résultats obtenus on a pu déduire les causes qui ont engendré la série des dégradations affectant le béton des fondations de l'unité Water Flood, les résultats des auscultations par ultrason ont révélés l'importance des dégâts causés par la pénétration et la circulation des eaux agressives dans le béton exceptionnellement les chlorures et les sulfates qui ont engendré des dégradations interne et externe du béton traduite par la présence de gonflements et fissurations, corrosions et dépassivation des armatures et détachement du béton.

## *Abstract*

The quality of concrete is often influenced by the characteristics of its constituents (mixing water, aggregates, cements, admixtures), but other factors intervene to influence the durability of reinforced concrete constructions such as the aggressiveness of the soils in the immediate vicinity of the massives, the porosity, the permeability, the chemical composition of the surface traffic water etc...

This study was carried out with the aim of repairing the degradation and deterioration of the supports of the Water Flood unit. In this thesis we will talk about these pathologies; how they are detected, their causes of being there, choosing the method of repair and how to eliminate the existing pathologies and avoid all the similar pathologies.

From the results obtained we could deduce the causes that have generated the series of degradations affecting the concrete of the foundations of the Water Flood unit, the results of the ultrasound auscultations have revealed the importance of the damages caused by the penetration and circulation of the aggressive waters in the concrete except the chlorides and the sulfates that have generated internal and external degradations of the concrete translated by the presence of swellings and cracks, corrosions and de-passivation of the reinforcements and detachment of the concrete.

# SOMMAIRE

Dédicace .....	
Remerciement .....	
SOMMAIRE.....	I
Liste des Figures .....	V
Liste des Tableaux .....	VII
Introduction .....	2

## Chapitre I

### **Durabilité des Structures en Béton Armé et les différentes causes de Dégradations**

I.1. Description des pathologies du béton armé: .....	4
II.1.1. Dégradations mécaniques: .....	4
II.1.2. Dégradations Chimiques: .....	4
II.1.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG): .....	4
II.1.2.2. Attaques Sulfatiques: .....	5
II.1.2.3. Attaques Acides: .....	6
II.1.2.4. Lixiviation: .....	6
II.1.3. Dégradations Physiques: .....	7
II.1.3.1. Cycles de gel-dégel: .....	7
II.1.3.2. Sels de déverglaçage: .....	8
II.2. Les pathologies à risque élevé et risque moyen: .....	8
II.2.1. Les pathologies à risque élevé: .....	8
II.2.1.1. La carbonatation : .....	9
A) Les mécanismes de la carbonatation: .....	9
B) Conséquences de la carbonatation: .....	10
C) les causes de la carbonatation: .....	12
D) Paramètres influent sur la cinétique de la carbonatation: .....	13
II.2.1.2. La corrosion: .....	14
A) Aspect physico-chimique de la corrosion: .....	14
B) Phases de la corrosion: .....	15
C) Formes de la corrosion: .....	15
D) Facteurs influençant la corrosion des armatures: .....	16

E) Les causes de la corrosion: .....	20
F) Les conséquences de la corrosion: .....	21
II.2.1.3. Fissure: .....	22
II.2.1.4. Lézardes: .....	23
II.2.1.5. Retrait:.....	24
II.2.1. Les Pathologies à risque moyen: .....	26
II.2.1.1. Faiençage: .....	26
II.2.1.2. Epaufrure:.....	26
II.2.1.3. Lichen: .....	26
II.2.1.4. Le ressuage:.....	27
A) Type de ressuage: .....	27
B) Les raisons du ressuage des bétons: .....	28
C) Dispositif de mesure du ressuage:.....	29
Conclusion:.....	29

## **Chapitre II**

### **Différentes Méthodes de diagnostic des Structures en béton Armé**

Introduction: .....	31
II.1. Réalisation d'un diagnostic:.....	31
II.1.1 Choix des investigations: .....	31
II.1.2. Types d'investigations: .....	33
II.1.2.1. Investigation non destructives: .....	33
A) Relevé visuel: .....	33
B) Scléromètre:.....	34
C) L'auscultation sonore: .....	34
I.1.2.2 Investigations destructives: .....	39
A) Carottage d'éléments en béton armé:.....	39
B) Prélèvements d'aciers:.....	40
C) Test a la carbonatation: .....	41
Conclusion:.....	42

## **Chapitre III**

### **Différentes méthodes de renforcement et de réparation des structures en béton armé**

Introduction: .....	45
III.1 Caractéristiques des produits de renforcement: .....	45

III.2 Adjonction d'armatures d'aciers: .....	46
III.2.1 Mise en place des armatures complémentaires: .....	46
III.2.2 Protection des armatures:.....	47
III.2.3 Réfection des bétons:.....	47
III.3 Projection du béton: .....	48
III.3.1 Description des deux méthodes:.....	49
III.3.1.1 Projection par voie sèche: .....	49
III.3.1.2 Projection par voie mouillée: .....	50
III.3.2 Avantages des deux méthodes : .....	50
III.3.3 Inconvénients des deux méthodes: .....	50
III.4 Chemisage des sections de béton: .....	51
III.5 La mise en œuvre des plats collés: .....	52
III.6 Renforcement des éléments structuraux par des matériaux composites: .....	53
III.6.1 Technique de renforcement: .....	54
III.6.1.1. Les applications des PRF en génie civil: .....	55
a) Les poutres: .....	55
b) Les colonnes: .....	55

## **Chapitre IV**

### **Etude de cas**

IV.1. Description du site .....	58
IV.1.1 Situation géographies .....	58
IV.1.2 Historique du champ: .....	58
IV.1.3 Organigramme du Groupement Berkine: .....	59
IV.1.4 Description de l'ouvrage : .....	60
IV.2 Phase de reconnaissance préliminaire: .....	61
IV.3 Campagne d'évaluation: .....	62
IV.3.1 Les phénomènes:.....	63
IV.3.2. Réalisations des tests ultrasoniques: .....	66
IV.3.3. Prélèvements des échantillons: .....	70
IV.3.3.1. Prélèvements des eaux (circuit entré et sortie): .....	70
IV.3.3.2 prélèvements des sols (aux alentours des fondations):.....	71
IV.3.3.3 prélèvements des dépôts s (a la surface des massives): .....	71
IV.4 Expression des résultats et détermination des facteurs engendrant le phénomène:.....	72
IV.5 Techniques de réparation: .....	73
IV .5.1. Eléments à reprendre: .....	73

IV.5.1.1. Procédure de construction: .....	74
IV.5.2. Éléments à renforcer avec chemisage: .....	74
IV.5.2.1 Procédure de réparation: .....	75
A) Excavation : .....	75
B) Piquage du béton dégradé : .....	75
C) Mise en place des armatures : .....	76
IV.5.3 Eléments à colmater: .....	76
IV.5.3.1. Procédure de réparation: .....	76
IV.5.4. Eléments non endommagés nécessitant une protection : .....	78
IV.5.4.1. Procédure de réparation: .....	78
Conclusion.....	80
Recommandations.....	80
Bibliographie .....	81

## *Liste des Figures*

Figure I.1. dégradations de béton armé. ....	4
Figure I.2. réactions alcalis-granulats. ....	5
Figure I.3. attaques sulfatiques. ....	6
Figure I.4. Attaques acides. ....	6
Figure I.5. lixiviation. ....	7
Figure I.6. Dégradation due aux sels de déverglaçage. ....	8
Figure I.7. Phénomène de la carbonatation ....	9
Figure I.8. Le schéma de la carbonatation. ....	12
Figure I.9. Les phases de carbonatation. ....	13
Figure I.10. Progression du front de carbonatation. ....	14
Figure I.11. Corrosion bar les temps. ....	15
Figure I.12. Les états de corrosion. ....	19
Figure I.13. corrosion de l'armature. ....	20
Figure I.14. Processus de corrosion. ....	21
Figure I.15. Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé. ....	21
Figure I.16. Fissure de béton. ....	23
Figure I.17. lézardes. ....	24
Figure I.18. phénomène de faïençage. ....	26
Figure I.19. Epaufrure dans construction. ....	26
Figure I.20. Lichen sur la structure. ....	27
Figure I.21. Ressuage de béton. ....	28
Figure II.1: Schéma du choix d'investigation ....	32
Figure II.2: Scléromètre ....	34
Figure II.3: Le radar ....	39
Figure II.4: Carotte prélevée. ....	40
Figure II.5: Prélèvement d'aciers ....	41
Figure II.6: Graphique enrobage-carbonatation ....	42
Figure II.7: Carbonatation sur carotte. ....	42
Figure III.1: Référence des bétons et protection des armatures. ....	48
Figure III.2: Renforcement au moyen de béton projet. ....	49
Figure III.3: Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage). ....	51
Figure III.4: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique. ....	53

Figure III.5: Composants d'un matériau composite de PRF. ....	54
Figure III.6: Chemisage d'un poteau par PRFC. ....	55
Figure III.7: Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre. ....	55
Figure III.8: Types de confinement de poteaux.....	56
Figure III.9: Courbe contrainte-déformation pour un béton confiné avec « PRF ». ....	56
Figure IV.1: emplacement du champ. ....	58
Figure IV.2: des dégradations importantes au niveau des massifs supports. ....	61
Figure IV.3: Les eaux d'alimentations et d'injections. ....	62
Figure IV.4: l'état du béton. ....	64
Figure IV.5: Vue par le microscope électronique à Balayage (MEB) de l'évolution des aiguillés de l'ettringite .....	65
Figure IV.6: Gonflement et éclatement du Béton.....	65
Figure IV.7: Les Alkali-réaction.....	66
Figure IV.8: La Lixiviation et l'écaillage.....	66
Figure IV.9: Présentation graphique des mesures ultrasoniques. ....	70

## *Liste des Tableaux*

Tableau IV.1: L'organigramme fonctionnel du groupement Berkine. ....	60
Tableau IV.2: les résultats de Réalisations des tests ultrasoniques .....	66
Tableau IV.3: Présentation des résultats des statistiques effectués sur les mesures obtenues par ultrason. ....	69
Tableau IV.4: Présentation de la classification des vitesses ultrasonique du béton .....	70
Tableau IV.5: Définition des classes d'agressivité chimique . ....	72

# *Introduction*

## **Introduction**

Le béton ordinaire constitue certainement l'un des matériaux de construction les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères.

Il est quelquefois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, La pathologie qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées. Pour ne pas arriver à ce stade on doit freiner sa progression ou la neutraliser le plus vite possible en prenant les mesures nécessaires qui s'imposent.

Cette étude a été menée dans le but de réparation de la dégradation et la détérioration des supports de l'unité Water Flood, Dans ce mémoire nous parlerons de ces pathologies; comment sont détectées, leurs causes d'y être, choisir la méthode de réparation et comment éliminer les pathologies existes et éviter tous les pathologies similaires.

Le diagnostic est l'étape essentielle dans le processus d'entretien de la structure en béton armé, c'est pour cela on a donné une grande importance à cette phase. Parce que un bon diagnostic nous permet de designer la décision adéquate de réparation afin de remédier au confortement des structures et empêcher toute future dégradation.

Une fois les causes ainsi que les pathologies diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir des travaux de réparation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques et mécaniques initiales.

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite le stade de dégradation constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies.

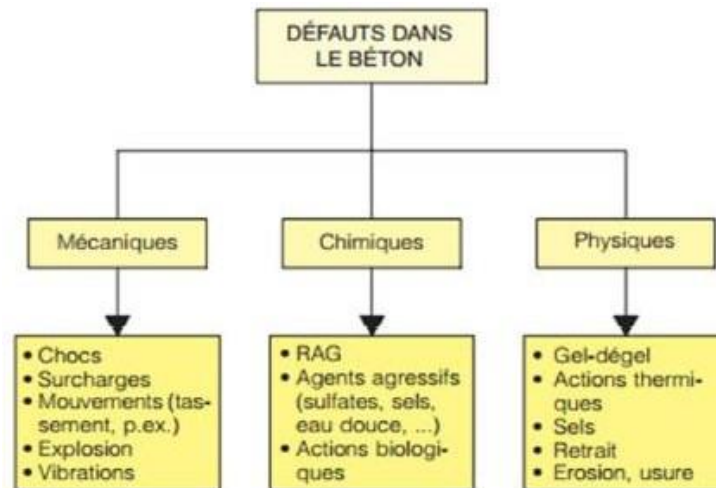
Afin de limiter de nouvelles pathologies similaires, il est impératif de protéger la structure. Il existe un grand nombre de protections, elles sont à choisir selon les différentes pathologies.

# **Chapitre I**

**Durabilité des Structures en Béton  
Armé et les différentes causes de  
Dégradations**

## **I.1. Description des pathologies du béton armé:**

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton armé durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans ce qui suit : dégradations mécaniques, chimiques, et physiques.



**Figure I.1.** dégradations de béton armé.

### **II.1.1. Dégradations mécaniques:**

Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux.

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle.

### **II.1.2. Dégradations Chimiques:**

#### **II.1.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG):**

La réaction alcalis-granulats (RAG) résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...) et des granulats potentiellement réactifs (c'est-à-dire sensibles aux alcalis) qui contiennent de la silice réactive (acide silicique) se présentant sous forme d'opale, de calcédoine, de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin. C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice.

La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent à une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies:

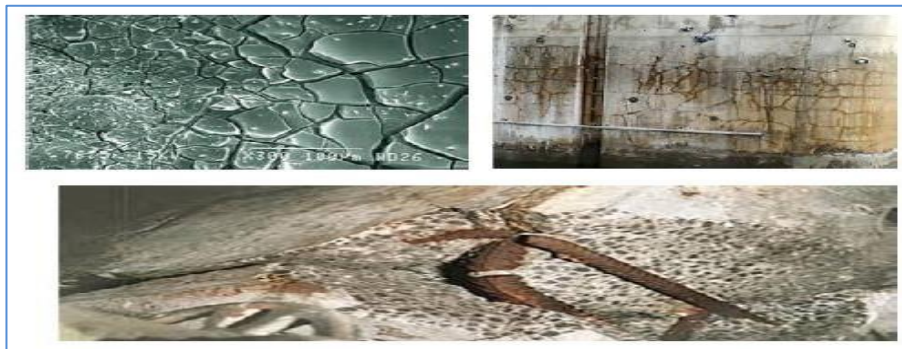
- Présence de granulats potentiellement réactifs.

La réaction se produit seulement si la teneur en réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique (pessimum) dont les limites dépendent de la composition minéralogique des constituants.

- Humidification Permanente ou régulière de la structure teneur élevée du béton en alcalis.

Dans un béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire. Dans un béton armé ou précontraint, les armatures empêchent la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'acier, de sorte que le tracé des fissures épouse celui des armatures sous-jacentes

En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures.



**Figure I.2.** réactions alcalis-granulats.

### **II.1.2.2. Attaques Sulfatiques:**

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante et peut se produire aussi bien durant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) qu'après le durcissement (ettringite secondaire).

Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure **(13)**. Toutefois, même en l'absence de source extérieure de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un

traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est la raison pour laquelle la température maximale est généralement limitée à quelque 65 °C durant la phase de durcissement.

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-SH), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage.



**Figure I.3.** attaques sulfatiques.

### **II.1.2.3. Attaques Acides:**

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.



**Figure I.4.** Attaques acides.

### **II.1.2.4. Lixiviation:**

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact

de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton

Compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs.



**Figure I.5.** lixiviation.

### **II.1.3. Dégradations Physiques:**

#### **II.1.3.1. Cycles de gel-dégel:**

En l'absence de mesures appropriées, le bétonnage en période hivernale peut donner lieu à des dégâts de gel. La formation de glace conduit en effet à la dilatation de l'eau présente dans le béton frais.

Dans un béton encore plastique, ce gonflement s'opère librement ; une fois durci, le béton ne présentera aucun dégât apparent, mais sera de mauvaise qualité. Dans un béton jeune déjà durci, le gonflement est entravé et des tensions internes apparaissent. Si le matériau n'a pas développé de résistance suffisante, les dégâts se manifesteront par un écaillage de la surface (le plus souvent en plusieurs couches). On considère généralement que le béton est apte à résister à ces tensions internes dès que sa résistance en compression dépasse 5 N/mm<sup>2</sup>. Cette résistance devrait être atteinte si l'on maintient une température ambiante supérieure à 5 °C pendant les 72 premières heures qui suivent la mise en œuvre.

Un béton durci peut, lui aussi, être endommagé par le gel : en se dilatant sous l'action du gel, l'eau présente dans les pores et les fissures crée des tensions susceptibles de provoquer ou d'aggraver des fissures. La sensibilité au gel du béton durci dépend dans une large mesure de sa structure poreuse et des dimensions des fissures. Le risque de dégâts de gel est plus

Important sur des dalles ou des plans horizontaux que sur des surfaces verticales, les pores étant davantage saturés en eau.

### **II.1.3.2. Sels de déverglaçage:**

Les sels de déverglaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique, c.-à-d. une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels répétés et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau. La nature des sels de déneigement peut également avoir une incidence sur le processus de dégradation observé

Par ailleurs, les ions chlorure des sels de déverglaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures.



**Figure I.6.** Dégradation due aux sels de déverglaçage.

Dans ce qui suit nous allons voir les différents types de pathologies que nous avons classées en deux grandes catégories à savoir Les pathologies à risque élevé et à risque moyen:

## **II.2. Les pathologies à risque élevé et risque moyen:**

### **II.2.1. Les pathologies à risque élevé:**

**II.2.1.1. La carbonatation :**

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO<sub>2</sub> émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment (11).

Les ingénieurs ont, au cours du XXe siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO<sub>2</sub> dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition.

Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recapter jusqu'à 50 à 60 % de CO<sub>2</sub> supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulat recyclé issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation(13).

**A) Les mécanismes de la carbonatation:**

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO<sub>2</sub>. Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %.



**Figure I.7.** Phénomène de la carbonatation

**B) Conséquences de la carbonatation:**

Notons que les ciments contiennent également des oxydes d'alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) qui se retrouvent sous forme de bases alcalines dans la solution interstitielle ( $\text{NaOH}$  et  $\text{KOH}$ ). Ces espèces alcalines permettent de maintenir une basicité au-delà de la valeur imposée par la portlandite (c'est-à-dire au-delà de 12,4 à 20 °C). Néanmoins, leur carbonatation est très rapide puisque les alcalins sont quasiment uniquement présents sous forme aqueuse et sont donc facilement lixiviés (on dit aussi lessivés) en présence de pluie.

Au cours du processus de carbonatation, l'élément principal de transformation est le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) dont il existe plusieurs variétés polymorphiques : calcite, vaterite et aragonite. La calcite est la variété la plus stable et correspond à la forme du calcaire qui a servi à obtenir le clinker après cuisson du cru dans le four de la cimenterie.

Du point de vue des structures en béton armé ou précontraint, la carbonatation est un phénomène délétère qui progresse de l'extérieur (parement) vers l'intérieur, à travers la zone d'enrobage des armatures, selon un processus physico-chimique qui associe la diffusion du  $\text{CO}_2$  à travers la porosité et les réactions chimiques de fixation du  $\text{CO}_2$  dans les hydrates. La neutralisation de l'alcalinité du milieu qui en découle devient problématique lorsqu'elle atteint le premier lit des armatures.

En effet, si le pH diminue trop, la couche de passivation des aciers constituée d'oxydes et d'hydroxydes ferreux devient instable. Il s'ensuit une corrosion rapide, dite généralisée, sur toute la surface de l'armature. Les produits de corrosion, qui sont expansifs, endommagent le parement (fissuration, épaufrures, etc.), forment des coulées de rouilles inesthétiques et conduisent à la réduction de la section d'acier des armatures (12).

La valeur de pH seuil en dessous de laquelle la carbonatation peut conduire à une corrosion marquée des armatures fait encore débat dans la littérature. Situé entre 9 et 11, ce seuil dépend de la nature du ciment et surtout de l'état hydrique du béton ; il faut notamment suffisamment d'eau liquide pour faciliter les échanges ioniques au niveau des micro piles qui apparaissent sur la surface de l'acier, sans pour autant bloquer la diffusion de l'oxygène corrosif en phase gazeuse.

Il est possible de réaliser un diagnostic de l'état de carbonatation du béton en prélevant depuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateur colorimétrique de pH (phénolphtaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaît incolore et

Le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone de virage est voisine de  $\text{pH} = 9$ ).

Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la phénolphtaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée.

C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH.

La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front de carbonatation comme cela est illustré où les armatures apparaissent protégées, car étant situées à l'aval du front détecté par projection de phénol -phtaléine, alors qu'en réalité le niveau de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner en précision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique (réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciage depuis la surface) et la gamma-densimétrie (méthode non destructive).

L'utilisation de plusieurs indicateurs colorés présentant des zones de virage de pH différentes pourrait également être une solution à condition que les contrastes de coloration entre les zones saine et carbonatée soient suffisamment marqués.

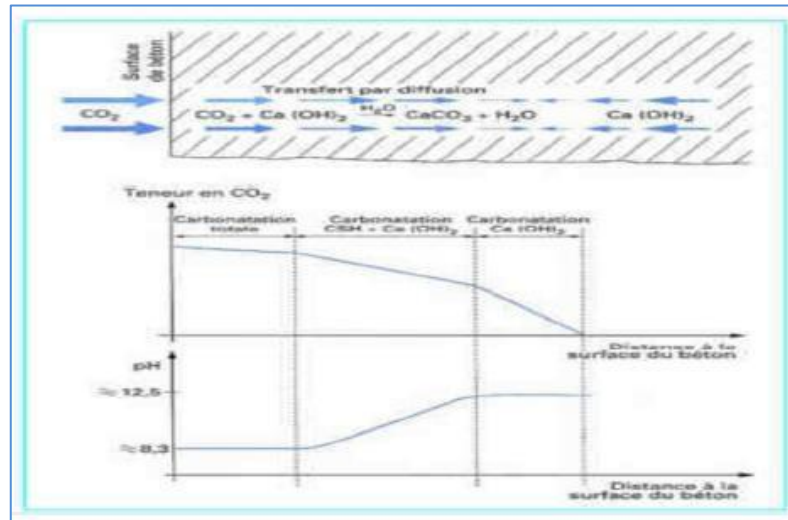
L'humidité de l'air est un facteur très important puisque la carbonatation est lente, voire absente, dans une atmosphère saturée d'eau (la diffusion du CO<sub>2</sub> en phase gazeuse est alors quasiment impossible si la porosité du béton est saturée) et dans une atmosphère trop sèche (la dissolution du CO<sub>2</sub> en phase aqueuse n'a pas lieu car elle est cinétiquement très limitée). Ce comportement conduit à une carbonatation optimale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.(13)

En revanche, notons que la corrosion sera quant à elle optimale pour une humidité relative avoisinant 90 %-95 %.

Du point de vue normatif, le risque de carbonatation est pris en compte pour formuler un béton (E/C, dosage en ciment et teneur en additions minérales) au travers de la norme NF EN 206-1.

Il est intéressant de noter que la classe d'exposition la plus préjudiciable vis-à-vis de la carbonatation (XC4) correspond à un climat avec alternance de phases sèches et humides. Cette

Situation n'est certes pas la plus favorable du seul point de vue de la carbonatation ; en revanche, eu égard au risque de corrosion, elle maximise la cinétique. Notons également l'existence de normes (6) permettant le dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe de résistance du béton et de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis de l'attaque du CO<sub>2</sub>.



**Figure I.8.** Le schéma de la carbonatation.

**C) les causes de la carbonatation:**

Le CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment avec une prédominance de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> suivant la gamme de pH.

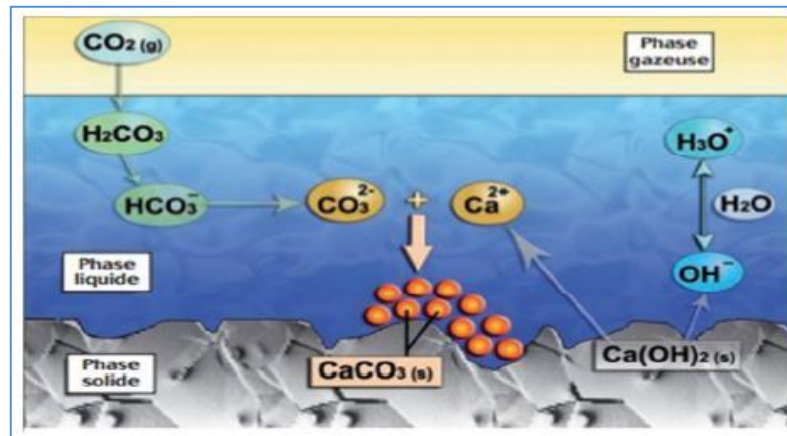
Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) est notamment affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes.

Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion

Des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible.

La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO<sub>2</sub> dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO<sub>2</sub> (0,03 %). La concentration en CO<sub>2</sub> venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse

avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration).



**Figure I.9.** Les phases de carbonatation.

#### **D) Paramètres influent sur la cinétique de la carbonatation:**

Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moins directement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front de carbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- La porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à la diffusion du  $\text{CO}_2$ .
- La teneur en hydrates carbonatables : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation.
- La microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après un an, 10 mm au bout de 4 ans et 25 mm après 25 ans.

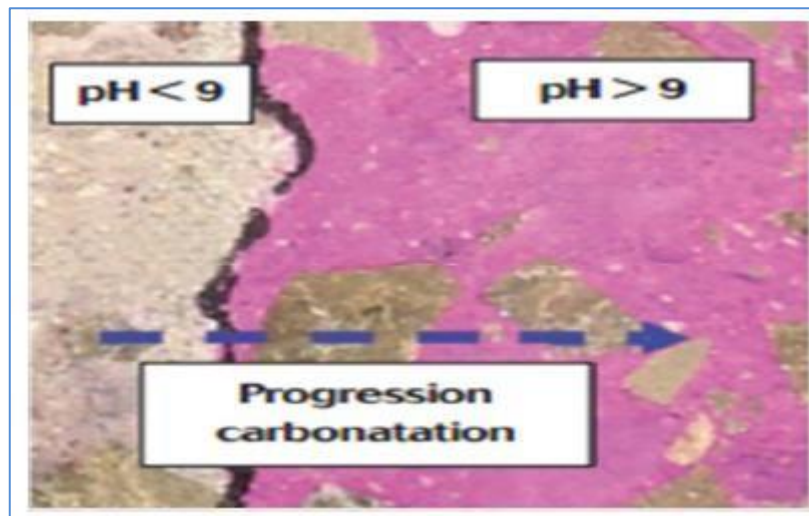
Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un surdimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton.

Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton.

La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) partiellement carbonatée.

L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du  $\text{CO}_2$  peut être à l'origine du développement de micro-organismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques.

Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté.



**Figure I.10.** Progression du front de carbonatation.

### **II.2.1.2. La corrosion:**

#### **A) Aspect physico-chimique de la corrosion:**

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ( $4\text{CaO Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ).

Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer  $\text{Fe(OH)}_2$  et de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage

**B) Phases de la corrosion:**

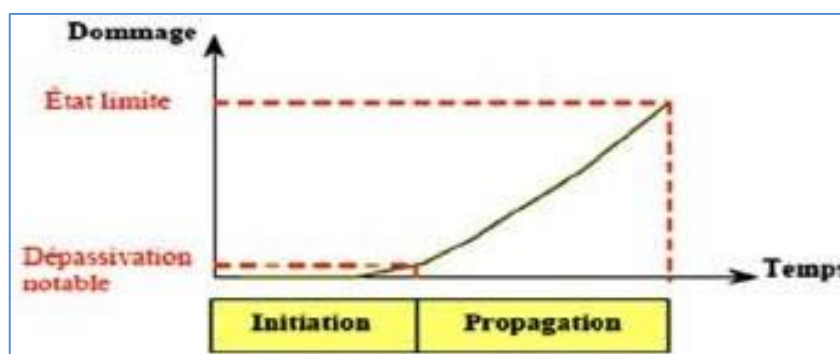
La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes (Figure 11) :

- phase d'initiation (ou d'incubation): c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou les chlorures (Cl<sup>-</sup>), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton.
- phase de propagation: cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille.

L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions.

Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement



**Figure I.11.** Corrosion bar les temps.

**C) Formes de la corrosion:**

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types :

□ corrosion généralisée: la corrosion a un aspect à peu près uniforme; ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées.

□ corrosion localisée: ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton.

□ corrosion sous contrainte: celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique. Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement.

#### **D) Facteurs influençant la corrosion des armatures:**

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurs contribuant à la corrosion est présentée par [Raharinaivoal 1998]. On présente ci-dessous les facteurs prépondérants.

- Humidité relative

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, au cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturé d'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures.

Lorsque l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée ; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide.

- Enrobage

L'enrobage de béton autour des armatures a pour rôle principal d'assurer une transmission des forces par adhérence entre le béton et l'acier. En outre l'enrobage de béton protège les aciers

de deux façons : par une protection physique, le béton constituant une barrière vis – à - vis des agents agressifs et par une protection chimique, grâce au pH élevé de la solution interstitielle du béton, lequel maintient stable la couche protectrice formée sur les aciers.

- Température

Les réactions chimiques sont accélérées avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et des sels dans l'eau.

- Teneur en chlorure

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit au-delà d'une certaine valeur seuil [12], on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes.

- Oxygène

L'oxygène dissous dans un liquide ou dans une phase aqueuse joue un rôle primordial dans la réaction, dite cathodique, de corrosion des aciers ( $O_2 + 2H_2O + e^- \rightarrow 4OH^-$ ). Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de réaction de dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène n'est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs positives.

- Agents agressifs autres que les chlorures

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures, au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton.

- Réactions de corrosion des aciers dans le béton

L'exposition des armatures à l'air permet la formation d'une couche naturelle de rouille. Vu la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre par capillarité à travers ses pores et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent se former ( $4 CaO FeO_3$

13H<sub>2</sub>O).

L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton. (12)

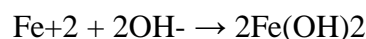
Dans la zone de contact du béton et de la couche dérouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première est une couche non influencée par les aciers; la deuxième, qui est une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du métal, assure une transition entre les propriétés mécaniques et la microstructure.

Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation. Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact.

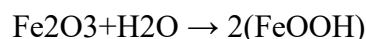
Les ions chlorures en contact avec le béton pénètrent dans l'ouvrage par l'intermédiaire de l'enrobage. La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la surface de la barre d'acier dans la zone dite cathodique. Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxydes. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées :



Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions Hydroxydes de façon à former les hydroxydes :

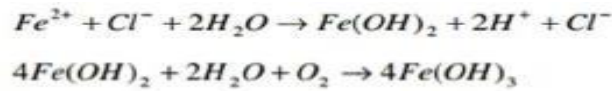


Cet hydroxyde (Fe(OH)<sub>2</sub>) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou de la rouille hydratée (Fe(OH)<sub>3</sub>) et du FeOOH, sachant que (13)

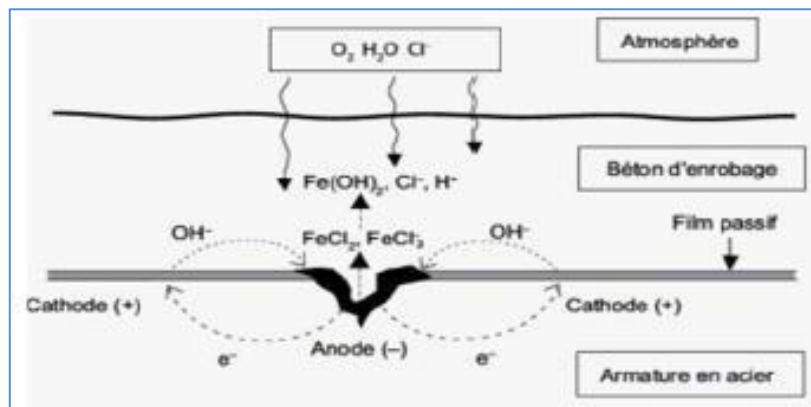


En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation. Une représentation schématique du mécanisme de corrosion induite par les chlorures.

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique, la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode. Si on ne tient pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit :



Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion :



**Figure I.12.** Les états de corrosion.

Anode= électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution.

Cathode= électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal

On note aussi que, dans les réactions liées à la corrosion, les ions chlorures ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction. On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une influence sur la résistivité électrique du béton sont l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle.



**Figure I.13.** corrosion de l'armature.

**E) Les causes de la corrosion:**

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées.

Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique hydrates de la pâte de ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique

L'autre facteur étant les chlorures, le dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. Le schéma suivant décrit.

Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé

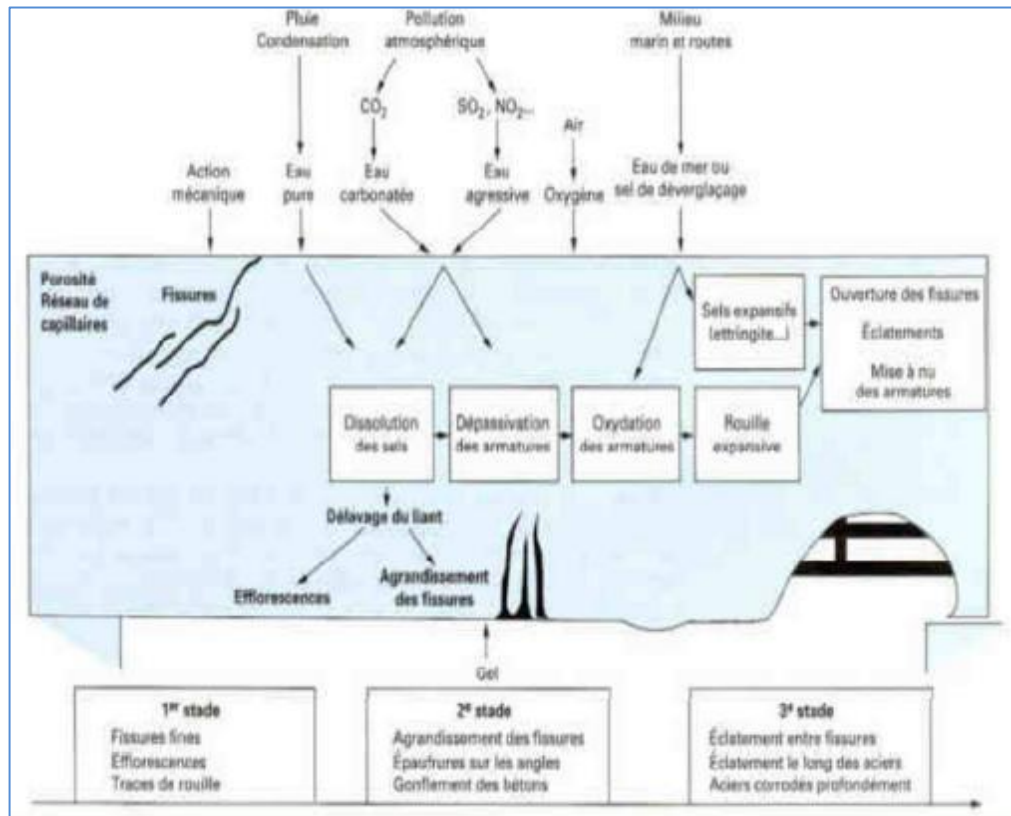


Figure I.14. Processus de corrosion.

#### F) Les conséquences de la corrosion:

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.

Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace.

Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufures, des décollements, ...

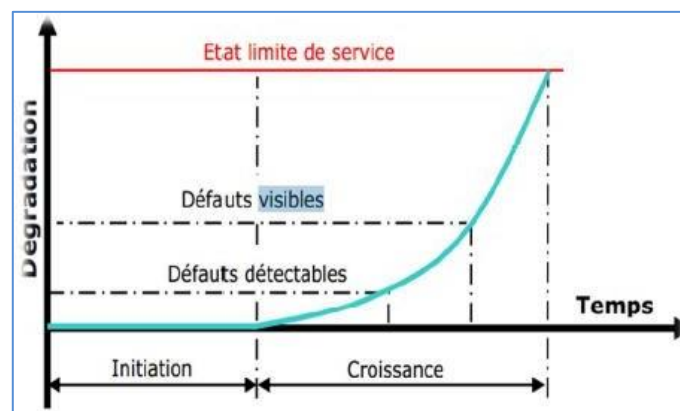


Figure I.15. Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.

### **II.2.1.3. Fissure:**

Fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc. Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur ; au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil ; au-dessus, la fissure est une lézarde.

Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique : fissure de retrait, ou de mouvement différentiel à la jonction de deux matériaux.

Les fissures sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois (fissures Pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé) ; plus graves encore sont les fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol. Est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau.

Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- a) Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.
- b) Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- c) Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.
- d) Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories :

- Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton.
- Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2mm.
- Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentour à la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique

Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.



**Figure I.16.** Fissure de béton.

#### **II.2.1.4. Lézardes:**

Les lézardes dans les briques et dans les joints de mortier sont causées par le tassement du sol sous une construction. Le sol peut être un "terrain rempli" où les vides ont été obturés sans qu'on laisse le remblayage se fouler convenablement. La glaise sous la fondation a pu sécher et rétrécir ou, peut-être, s'est déplacée sous l'effet d'une inondation. Le drainage ou l'imperméabilisation font peut-être défaut, ou la fondation a été érigée au-dessus de la ligne de gel. Le sol sous les maisons construites sur une colline se déplace quelquefois vers le bas de la pente. Le pourrissement et le séchage du bois peuvent occasionner des déplacements de terrain et les racines de gros arbres déplacer ou éventrer une fondation. Peu importe la cause, les lézardes causées par affaissement et qui ne sont pas réparées à temps se détériorent rapidement.

Des lézardes continues sur les murs extérieurs indiquent des problèmes d'affaissement:

elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d'abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans une maison neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d'un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l'époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre. (1)



**Figure I.17.** lézardes.

#### **II.2.1.5. Retrait:**

Contraction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire (bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraits ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture :

Faiçonnage des enduits, microfissuration du béton.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique (légère contraction par évaporation, dès la mise en place) ; puis intervient le retrait hydraulique, élimination d'eau de gâchage excédentaire, qui se poursuit de façon décroissante pendant longtemps.

De façon générale, un béton ou un mortier a d'autant plus de retrait que sa concentration en ciment est importante.

La mesure du retrait s'effectue sur des éprouvettes (4x4x16cm), d'une part sur la pâte pure, d'autre part sur le mélange constitué.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par

le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation.

a) Le retrait de plastiquées: en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

b) Le retrait de dessiccation: Est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en Ouvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

c) Le retrait thermiques: est lié au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques déshydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en oeuvre, Jusqu'à quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente).

d) Le retrait d'auto-dessiccation : est lié à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction. Le Chatelier (le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances

(BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires.

## **II.2.1. Les Pathologies à risque moyen:**

### **II.2.1.1. Faiençage:**

Le phénomène de faiençage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence. Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm. Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faiençage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faiençage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton.



**Figure I.18.** phénomène de faiençage.

### **II.2.1.2. Epaufure:**

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction.



**Figure I.19.** Epaufure dans construction.

### **II.2.1.3. Lichen:**

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme. Lichen est

plus fréquente dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif.



**Figure I.20.** Lichen sur la structure.

#### **II.2.1.4. Le ressuage:**

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Le ressuage est, avec la ségrégation, l'une des deux manifestations de la dégradation de l'homogénéité d'un béton frais. Dans le cas de la ségrégation, les grains présentent au cours du temps un mouvement relatif entre eux. Certains (les plus denses ou les plus volumineux) tombent alors que les autres (les fins ou ceux ayant une masse volumique réduite) remontent vers la surface.

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique.

Considérée. Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale.

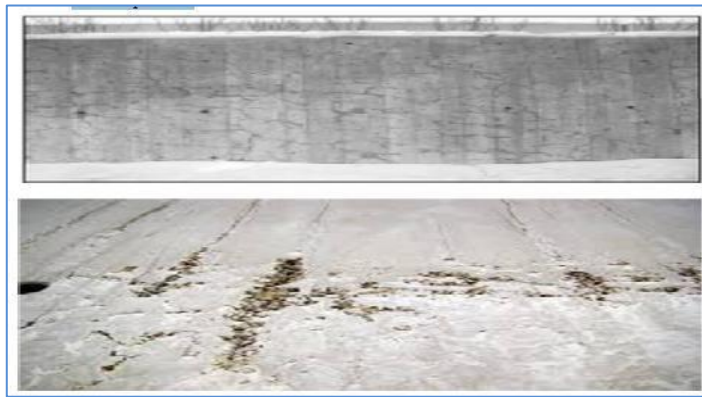
#### **A) Type de ressuage:**

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

- Ressuage visible dû à la restitution d'eau à la surface de l'élément de construction après le compactage de mortiers ou de bétons.
- Ressuage interne dû à la restitution d'eau sous l'armature ou sous les gros granulats après le compactage de mortiers ou de bétons.

Le ressuage ne doit pas forcément être négatif : la perte d'eau diminue le rapport

e/c et le béton devient plus dense du moins dans les parties inférieures. Sur les surfaces de béton inclinées ou verticales, l'élimination de l'eau de ressuage au moyen de lés de coffrage dissipant l'eau fait partie des méthodes ayant fait leurs preuves pour améliorer la qualité du béton superficiel



**Figure I.21.** Ressuage de béton.

### **B) Les raisons du ressuage des bétons:**

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place ressue. Les bétons avec une teneur en eau élevée (rapport e/c) sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapport e/c est bas. Et plus le pourcentage de fines dans le béton est élevé, plus la tendance au ressuage diminue.

Le ressuage provient de ce que le béton est composé de matériaux dont la densité diffère fortement :

- granulats avec du domaine de 2,6 à 2,7 kg/dm<sup>3</sup>
- ciment 3,0–3,2 kg/dm<sup>3</sup>
- eau 1,0 kg/dm<sup>3</sup>

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce que ces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage.

**C) Dispositif de mesure du ressuage:**

Le ressuage est mesuré de façon classique par l'observation directe d'un échantillon. En effet. On peut voir apparaître une ligne de séparation entre l'eau et la pâte dans le haut d'un contenant transparent. Le ressuage normal est caractérisé par une vitesse de déplacement constante de la surface du solide. Suivi d'une diminution graduelle de la vitesse jusqu'à l'arrêt complet du ressuage.

**Conclusion:**

On a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard.

# **Chapitre II**

## **Différentes Méthodes de diagnostic des Structures en béton Armé**

**Introduction:**

De nos jours, le béton est un des matériaux de construction les plus usuels. Ce matériau, outre ses nombreux avantages, évolue et réagit avec son environnement. En effet, au cours du temps, les ouvrages en béton armé développent de nombreuses pathologies (corrosion des aciers, gel-dégel, fluage, réactions chimiques, etc.). Sous l'action de ces agressions physico-chimiques, ce dernier se dégrade et présente alors des désordres allant de la simple fissure à la détérioration structurale grave. La majorité des infrastructures existantes ont été construites avec ce matériau et cela depuis plus d'une cinquantaine d'années. Ce patrimoine national est donc vieillissant ce qui nécessite un entretien et un suivi régulier. Cependant, la maintenance des ouvrages de ce patrimoine bâti est très onéreuse. Une démarche scientifique rigoureuse est donc nécessaire pour réduire ce budget par la mise en place d'outils visant à optimiser et fiabiliser le diagnostic structural des ouvrages.

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour une évaluation à grand rendement. En effet, le CND permet de donner des informations quantitatives sur la totalité de la surface auscultée et de limiter ainsi le nombre de prélèvements.

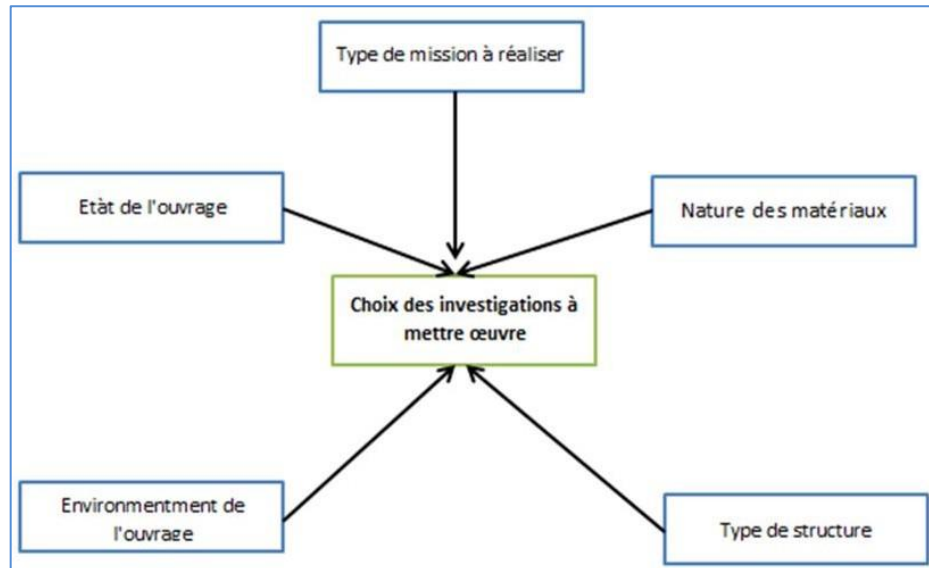
**II.1. Réalisation d'un diagnostic:**

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client a découvert quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de Désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations. L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

**II.1.1 Choix des investigations:**

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre la mission. Ces différents paramètres sont les suivants:



**Figure II.1: Schéma du choix d'investigation**

En effet, le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend :

- Du type de mission à réaliser; selon ce que souhaite le client, il est possible de réaliser différents types de missions à savoir:

- Une inspection de l'ouvrage.
- Un diagnostic.
- Un diagnostic approfondi.
- Un suivi d'ouvrage.

Chacune de ces missions met en œuvre différentes méthodes de diagnostic, de plus ou moins grande ampleur, mais aussi une interprétation des résultats plus ou moins poussée.

- De la nature des matériaux ; Le diagnostic d'un ouvrage en béton armé ne fera pas appel aux mêmes techniques d'investigation que pour un ouvrage en bois, en acier ou en pierre. De plus, chacun de ces matériaux à ses propres pathologies types.

- Du type de structure; Les moyens à mettre en œuvre seront différents selon qu'il s'agisse d'un ouvrage d'art ou bien d'un bâtiment industriel ou un bâtiment d'habitations. La géométrie et la taille de l'ouvrage rentrent aussi en compte dans le choix des investigations.

- De l'environnement de l'ouvrage; Il est important de prendre en considération l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage, car il peut être à l'origine de ces pathologies. C'est le cas notamment pour les structures en milieu chimique ou pour les structures en milieu chimique ou pour le bâtiment « La Saline » pour lequel sa structure se trouve dans un milieu, avec beaucoup d'éléments de chlorures, directement lié à l'activité se déroulant dans le

bâtiment.

- De l'état de l'ouvrage ; Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage.

### **II.1.2. Types d'investigations:**

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite.

#### **II.1.2.1. Investigation non destructives:**

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ou une partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des bâtiments de France qu'il soit utile d'effectuer des prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser. Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie. Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus.

Il existe différentes méthodes non destructives

#### **A) Relevé visuel:**

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaître les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs. Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaître les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure. Dans un second temps, il est nécessaire de répertorier les différentes pathologies présentes sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides.

- Les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds.
- Les aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

### B) Scléromètre:

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure.

Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.

Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérométrique  $I_s$  d'élément diagnostiqué est

La médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément considéré.

Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats, tels que l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton. Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée.



Figure II.2: Scléromètre

### C) L'auscultation sonique:

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

**• Le principe de la méthode:**

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue.

D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R et FACAOARU (1969).

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représentent un inconvénient majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle, quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés.

Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO et CARATIN (1984).

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide

ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. **(15)**

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse **(15)**. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

• **Mode Opérateur:**

a) Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

b) Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

- Distances minimales entre points de mesures

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

• **Étalonnage de l'appareil:**

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

• **Manières de mesure**

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

a) Mesure en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

b) Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur. L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

c) Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières.

D) Le radar

Le radar a une large gamme d'applications potentielles dans plusieurs domaines, des activités militaires et aériennes en premier temps au CND du béton. La description en détail des techniques radars a été réalisée par Daniels (Daniels 2004). Le principe de cette technique en génie civil est basé sur la réflexion et l'atténuation d'ondes électromagnétiques dans le milieu du matériau. La propagation d'ondes électromagnétiques dépend de la permittivité diélectrique, de la conductivité et de la perméabilité du matériau ausculté.

Elle peut être caractérisée par les quatre équations de Maxwell. Le système radar permet d'émettre une impulsion électromagnétique haute fréquence entre 100 et 3000 MHz à la surface du matériau qui se propage, se réfléchit en partie à chaque interface entre deux milieux électromagnétiques différents. Les échos successifs sont enregistrés dans un signal temporel.

La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps.

Dans une structure en béton armé, il existe différentes interfaces de types air/béton, béton/acier, béton/sol pour l'élément posé sur le sol, et béton/air pour l'élément en élévation.

Ces interfaces sont susceptibles de présenter des contrastes de propriétés électromagnétiques suffisamment forts pour être détectés par le radar. C'est pourquoi, la technique radar permet de localiser rapidement des cavités dans les chaussées (Steinway 1982),

détecter des armatures, des câbles précontraints, des défauts (vides, fissures, délaminages) dans le béton.

Elle permet d'estimer l'épaisseur du béton d'enrobage, la dimension d'éléments (plancher, voile, mur, etc.). Cependant, le positionnement en profondeur dépend forcément de la connaissance de la vitesse d'ondes électromagnétiques dans le matériau étudié. Les études académiques récentes se sont développées afin d'évaluer des propriétés physiques et chimiques du matériau telles que les teneurs en eau et en chlorure, notamment pour le béton d'enrobage (16).

Plusieurs synthèses ont été effectuées pour préciser les avantages ainsi que les limitations de la technique radar (16). Un avantage principal est l'auscultation totalement non destructive et rapide à grande échelle et en profondeur (dépendant de la permittivité du milieu). L'équipement portable permet une utilisation facile et une présentation immédiatement des résultats sous forme d'image radar (coupe-temps). Par contre, le traitement des données nécessite une personne qualifiée. Les caractéristiques des ondes électromagnétiques sont souvent exploitées, soit en vitesse, soit en amplitude de l'onde directe ainsi que les différents échos. Il est important de noter que la vitesse et l'amplitude dépendent de la permittivité diélectrique du matériau qui est dépendant des teneurs en eau et en chlorures des bétons. Les valeurs relatives de la partie réelle de la permittivité diélectrique (Tableau 1.1) sont définies par rapport à celle de l'air conformément à la norme ASTM D4748. Cette valeur est souvent appelée « constante diélectrique » ...

La technique radar est souvent utilisée sur des ouvrages réels, plus particulièrement pour inspecter le revêtement des tunnels, ou détecter le délaminage sur des ponts en béton armé à l'aide de système mobile et moderne, par exemple le système HERMES (High Speed electromagnetic Roadway Mapping and Evaluation System) (IAEA 2002). Ces applications sont présentées dans les normes ASTM (17). Les nouvelles applications concernent l'évaluation de la variabilité spatiale des bétons in situ pour détecter des zones de probabilité de dégradation (SENSO 2009, EvaDéOS2012). Cette technique peut être également utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres mesures CND plus locales (résistivité électrique, ultrason) pour améliorer l'évaluation des propriétés des bétons (ex. saturation, porosité, résistance mécanique).



**Figure II.3:** Le radar

### **I.1.2.2 Investigations destructives:**

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaître ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaître leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies.

#### **A) Carottage d'éléments en béton armé:**

Le recours au carottage du béton armé peut avoir plusieurs objectifs.

- Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur le sol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage.
- Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi des analyses chimiques et microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C.
- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton...)

La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour « l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton ». La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton.

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferrailage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.



**Figure II.4:** Carotte prélevée.

### **B) Prélèvements d'aciers:**

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcul d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage.

Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature. Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit.

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploitée afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section

d'acier initiale.



**Figure II.5:** Prélèvement d'aciers

### C) Test a la carbonatation:

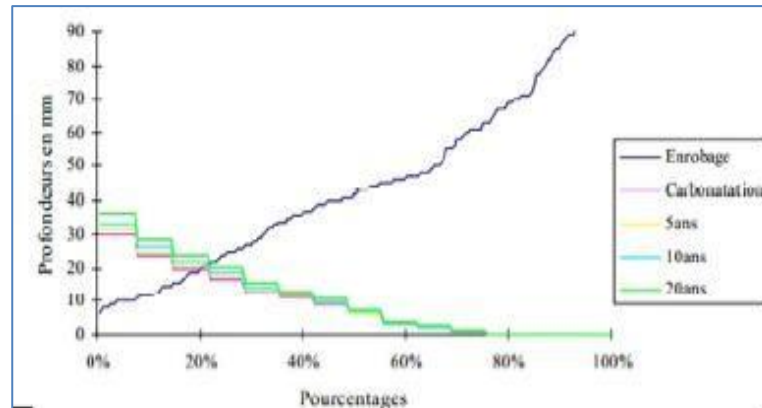
Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphtaléine.

La phénolphtaléine est un composé organique de formule  $C_{20}H_{14}O_4$ . L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique).

La couleur que prend la phénolphtaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphtaléine, si la phénolphtaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphtaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées.

Il peut s'avérer intéressant de coupler les mesures de profondeur de carbonatation avec les mesures d'enrobages données par exemple avec un pachomètre de type Ferro scan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type :



**Figure II.6:** Graphique enrobage-carbonatation

L'intersection de la courbe d'enrobage (courbe bleu foncé) avec celle de carbonatation (courbe rose) donne le pourcentage des armatures qui ne sont plus protégées.



**Figure II.7:** Carbonatation sur carotte.

## Conclusion:

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être

À cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Pathologies	les causes des Pathologies	Analyses		Décision
		Destructives	Non - Destructives	
1) Carbonatation	Le dioxyde de carbone avec les composants du ciment, de l'interaction de l'humidité et de la température	Test à la Carbonatation (phénolphtaléin)	Radar,	En voyant ces pathologies devrait immédiatement intervenir et réparer
2) La corrosion	Carbonatation dans le béton, et les chlorures		Radar,	
3) La Fissure	Les causes dues aux propriétés des matériaux,, Les causes directes externes,, Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures.		Radar, Scléromètre, l'auscultation sonique, Relevé visuel.	
4)Les Lézardes	Les causes directes externes (chocs ,tassement,...)		Relevévisuel	
5) Le Retrait	évaporation	Carottage d'élément	Relevé visuel	
6) faïençage	Humidité		Relevé visuel	Vous pouvez éviter la réparation de ces pathologies à l'heure actuelle,mais vous devez suivre avec le temps et ne pas être négligée
7) Epaufrure	Migration à grains en raison de la mauvaise confusion		Relevé visuel	
8) Lichen	humidité		Relevé visuel	
9)Le ressuage	L'excès d'eau lors de la préparation du béton		Relevé visuel	

# **Chapitre III**

**Différentes méthodes de  
renforcement et de réparation des  
structures en béton armé**

## **Introduction:**

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques.

On peut être amené donc à procéder :

- A des remises en état d'éléments structurels présentant des défauts que l'on cherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que : l'obturation de fissures qui sont dues le plus souvent au retrait et aux variations environnementales.
- Au renforcement ou à la réparation d'éléments insuffisamment résistants, les réparations sont souvent réalisées dans les zones où les sections sont trop sollicitées et défailantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs caractéristiques mécaniques de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

### **III.1 Caractéristiques des produits de renforcement:**

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder vis-à-vis d'un béton dégradé les qualités suivantes :

a) Présenter une compatibilité avec le support béton à savoir :

- Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dès la prise et au durcissement final, et de manière à éviter l'apparition de fissures ou un décollement de l'interface
- Une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.
- Une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
- Des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou supérieures à celles du béton de support un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.

b) Présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales :

- Les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont :

- Les chlorures
  - Les sulfates
  - Le gaz carbonique
  - L'oxygène
- Comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de renforcement doivent présenter une bonne tenue vis-à-vis des agents agressifs :
- La résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion. Cette caractéristique est étroitement liée, outre à l'aspect formulation du produit de renforcement, à la qualité de sa mise en œuvre, et à la mise en place.
  - La résistance aux sulfates apportés soit par l'eau de mer, soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse, ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver, dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs (ettringite) entraînant, à terme, la ruine du béton il faut tenir compte de cet élément pour la formulation du produit de renforcement fabriqué en usine ou sur chantier, en choisissant les ciments adaptés.
  - La résistance aux chlorures apportées essentiellement par l'eau de mer, et le sel de déverglaçage, les chlorures migrant dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures.
  - La résistance aux cycles de gel et dégel, est indispensable, ainsi pour de tels produits de renforcement à base de liant hydraulique, une exigence d'un entraîneur d'air s'avère nécessaire.

### **III.2 Adjonction d'armatures d'aciers:**

Il s'agit là d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés. Les armatures existantes, conservées doivent être bien soignées, afin éviter une continuité de leurs dégradations. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées.

La liaison s'effectue par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage. La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

#### **III.2.1 Mise en place des armatures complémentaires:**

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus

fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

### **III.2.2 Protection des armatures:**

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées : un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.

### **III.2.3 Réfection des bétons:**

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que : l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace, une augmentation assez importante des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement consistant de matériaux, ce qui n'est pas plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique.



**Figure III.1:** Références des bétons et protection des armatures.

### **III.3 Projection du béton:**

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défailtantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact.

Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- Une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.
- Une bonne adhérence de l'interface.

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles.

La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égales à celles des matériaux d'origine des ouvrages.

Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m.

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte.

La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité.



**Figure III.2:** Renforcement au moyen de béton projeté.

### **III.3.1 Description des deux méthodes:**

#### **III.3.1.1 Projection par voie sèche:**

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau- fines -ciment) que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaisseur, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne :

- Un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- Une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m<sup>3</sup> de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa.

### **III.3.1.2 Projection par voie mouillée:**

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm.

### **III.3.2 Avantages des deux méthodes :**

a) Par voie sèche :

- Possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm).
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergique.
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise.

b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières.

### **III.3.3 Inconvénients des deux méthodes:**

a) Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.

- Nécessité d'accélérateurs de prise.

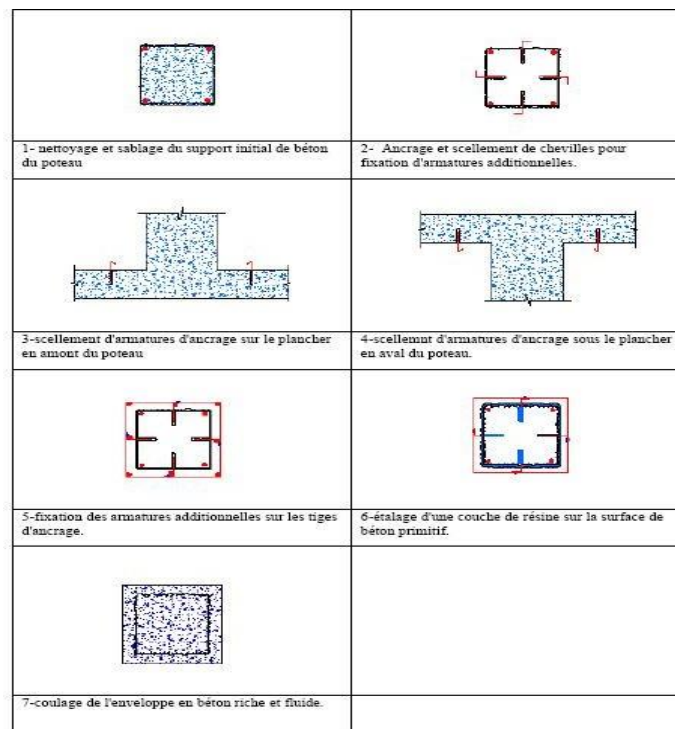
### III.4 Chemisage des sections de béton:

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifié par l'expérience, consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, autocompactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle. La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage. Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autres procédés :

Renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées.

Les éléments de renfort doivent être ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif.



**Figure III.3:** Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).

- Le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple : ressorts à

lames des camion)

### **III.5 La mise en œuvre des plats collés:**

Les plats destinés à être collés doivent être traités par sablage pour donner à la surface une rugosité supérieure. Après l'étape qui suit le sablage, les plats doivent être revêtues d'un produit de protection, soit un type de véris, soit un primaire époxy de même nature que la colle, capable d'assurer la protection temporaire de la tôle et son adhérence ultérieure à la structure (compatibilité avec les colles envisagées).

Le sablage est une opération difficile à réaliser puisqu'il est conditionné par les facteurs atmosphériques. Les tôles doivent être transportées avec soin de façon à ne pas entraîner de défauts de planéité, de rayure ou de choc.

La préparation du support exige les deux actions d'éliminer les parties dégradées et de rendre le support plan. La reprise de la planéité du support nécessite un ragréage au mortier de résine ; les produits de ragréage doivent être compatibles avec les produits d'encollage.

D'une façon générale les surfaces à ragrées ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à encoller.

La colle doit être préparée en respectant le mode d'emploi du produit défini par le fournisseur.

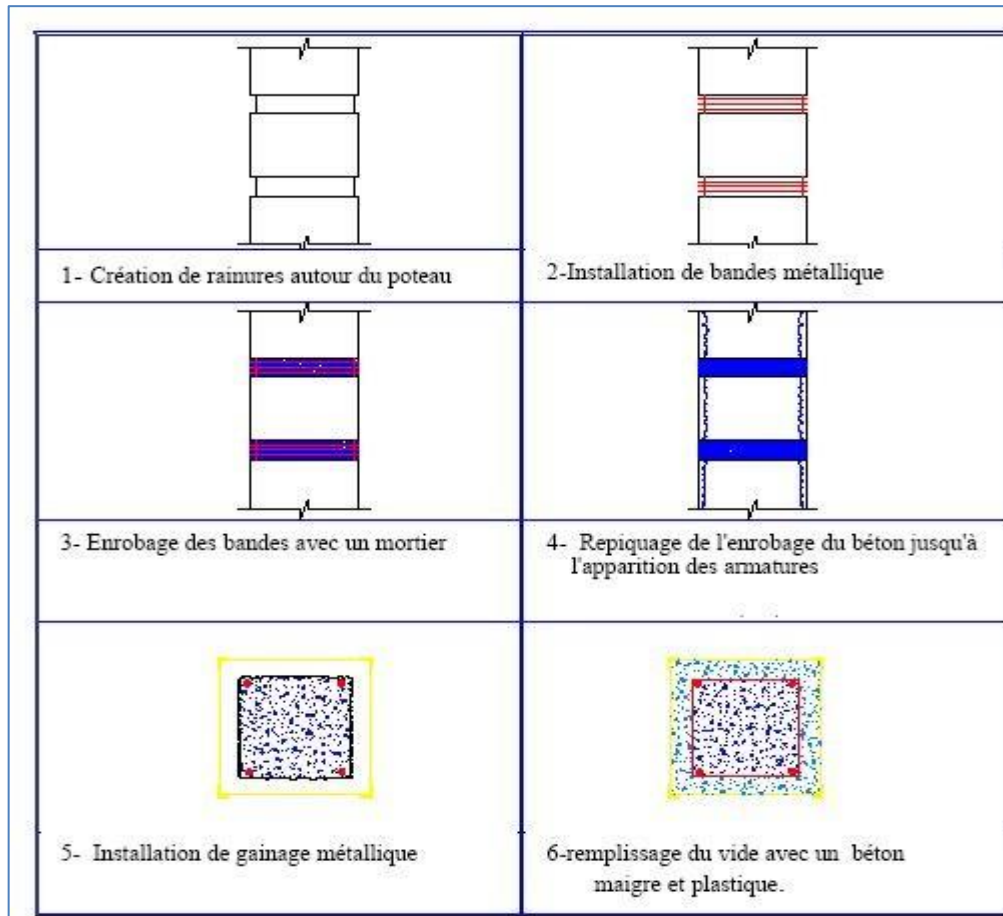
L'encollage exige une couche de colle sur le plat d'acier et sur la paroi du béton. Le meilleur outil pour étaler régulièrement la colle et assurer l'épaisseur moyenne requise est la spatule crantée. Pour un collage efficace, il est indispensable de maintenir la colle sous pression pendant la durée de prise, le temps pendant lequel l'effort de serrage est maintenu doit être fonction de la viscosité de la colle et de la largeur des plats d'acier (Serre-joint, barres filetées, les étais).

Pendant la prise de la résine de collage, il est recommandé d'éviter tout effet vibratoire, en particulier tout mouvement issu de trafic répété, ou d'effets dynamique de machines. Les plats doivent être protégés en fin des travaux contre la corrosion avec une peinture de type époxy compatible avec le primaire de protection provisoire.

Dans le cas où la structure doit satisfaire à des exigences de stabilité au feu, une protection des plats doit être prévue pour éviter que le film de colle ne dépasse une température jugé critique. Cette protection peut être réalisée par l'utilisation de produit isolant. Il est à noter que le renfort avec les platines en acier présente des inconvénients tels :

- Le découpage des platines se fait généralement en atelier.

- Les longueurs sont limitées.
- Le transport n'est pas toujours aisé.
- L'étalement des éléments structuraux est parfois nécessaire.
- La durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème.



**Figure III.4:** Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.

### **III.6 Renforcement des éléments structuraux par des matériaux composites:**

La technique de renforcement par des matériaux composites pour les éléments Structuraux porteurs est l'une des techniques efficaces pour l'accroissement de la résistance de ces derniers.

Cette technologie possède une application simple, peu exigeante en main d'œuvre, et n'est pas Dérangeante pour les occupants des ouvrages. En plus, la résistance aux substances chimiques et la corrosion sont des caractéristiques dont les matériaux composites présents donnent à cette technique une durée de vie plus longue que les matériaux traditionnels tels que l'acier.

Cette technologie de renforcement possède un prix élevé mais elle est économique à long terme. Les termes « composites amélioré », « matériaux composite renforcé de fibres » ou PRF « polymère renforcé de fibres » sont généralement destinés pour désigner les matériaux en fibres telles que la fibre d'aramide, la fibre de verre et la fibre de carbone fixée dans une matrice (résine époxy). Ces matériaux possèdent un rapport résistance-poids plus élevé par rapport aux matériaux de construction traditionnels comme l'acier, encore les composites de fibres à une résistance à la corrosion excellente.



**Figure III.5:** Composants d'un matériau composite de PRF.

Les matériaux composites sont initialement utilisés pour les industries de la défense et les industries aérospatiales. Suite à la grande demande des matériaux de construction durables et efficaces, cela a conduit une plus grande utilisation des PRF dans les constructions civiles. D'après des tentatives développement et des recherches qui ont parvenu à révéler que les matériaux composites permettraient de renforcer les structures en béton armé existantes.

### **III.6.1 Technique de renforcement:**

Un processus généralement pareil pour les étapes de la mise en place des matériaux composites, malgré la variation de l'installation du système de renforcement d'un installateur ou d'un fabricant à l'autre. Ce processus peut se résumer par :

- Examiner et réparer les surfaces effritées et les fissures de la surface de l'élément à renforcer.
- Appliquer une couche du mastic de vitrier après la préparation de la surface de l'élément en éliminant les saillies.
- Mettre en place les tissus de fibres sur la surface après une application d'une première couche d'agent d'imprégnation.
- Répéter l'étape précédente jusqu'à ce que les couches demandées de fibres soient installées.



Figure III.6: Chemisage d'un poteau par PRFC.

### III.6.1.1. Les applications des PRF en génie civil:

Le génie civil a actuellement une consommation petite de matériaux composites comparativement aux différents secteurs tels que l'industrie aérospatiale ou celle de l'automobile. Cependant, dans les prochaines années il existe une réelle perspective pour leur utilisation dans la réhabilitation des constructions industrielles et civiles.

Cette perspective a apporté les centres et les laboratoires à travers le monde d'étudier les différents aspects des éléments soit réparés ou renforcés par des « PRF ».

Généralement, les polymères renforcés de fibre « PRF » résultent des avantages efficaces dès qu'il s'agit de la réparation, la protection et le renforcement des éléments de structures en B.A. comme la poutre, poteau, mur ou dalle.

#### a) Les poutres:

Le renforcement de la poutre en béton armé vis-à-vis à la flexion en utilisant les composites se fait en relisant un collage des lamelles « PRF » sur la partie externe du support de la poutre (figure 2-17).

Une préparation du support doit être exécutée après le collage de ces lamelles de « PRF ». Cette préparation de support est très importante cela conduit à une surface adéquate dont les couches faibles sont éliminées, et cette surface adéquate a comme but l'amélioration de la liaison avec le « PRF ».

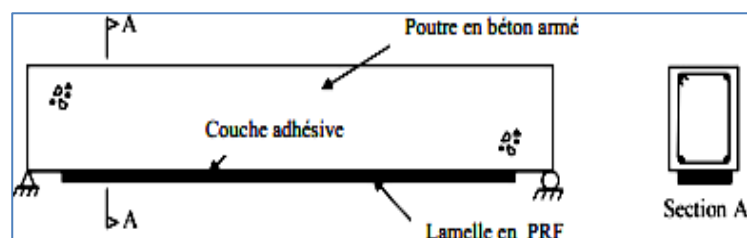


Figure III.7: Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre.

#### b) Les colonnes:

Différentes techniques ont été développées pour le renforcement des poteaux en béton

armé avec des matériaux composites « PRF ». Les techniques de renforcements par le composite « PRF » peuvent être divisées en trois catégories selon la méthode adoptée pour le construire : l'enroulement filamentaire, la stratification au contact et le chemisage par coquille préfabriquée en « PRF ».

La colonne peut avoir un chemisage ou un enveloppement complet avec une ou plusieurs couches de tissus « PRF », ou elle peut être renforcée d'une manière discontinue en employant des bandes « PRF » sous forme des anneaux discrets ou spirale continue (Figure...).



Figure III.8: Types de confinement de poteaux

Le renforcement des poteaux par des matériaux composites est efficace grâce au « PRF » qui assure une amélioration de la résistance aux déformations qui est dues aux charges axiales, suite au confinement des contraintes créées dans le béton, ce qui augmentera la contrainte de compression du béton.

La figure (36) peut donner une observation facile que le confinement des poteaux avec des polymères renforcés en fibre a nettement amélioré la ductilité et la capacité des poteaux renforcés.

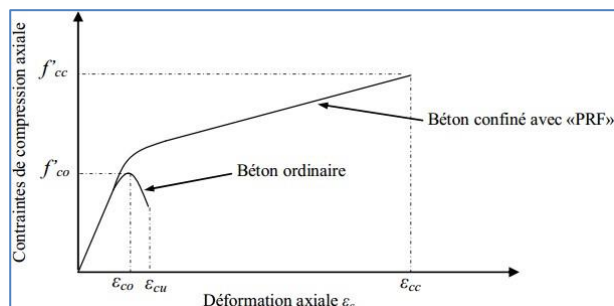


Figure III.9: Courbe contrainte-déformation pour un béton confiné avec « PRF ».

# Chapitre IV

## Etude de cas

## IV.1. Description du site

### IV.1.1 Situation géographiques

Le bassin de Berkine se présente comme étant un grand bassin intracartonique situé au nord de l'Afrique et constitue la partie occidentale d'un plus grand bassin (celui de Ghadamès) qui se prolonge vers la Libye et au sud de la Tunisie.

La partie Algérienne est limitée par :

- Les frontières Tunisienne et Libyenne à l'est,
- Le bassin d'Illizi au sud,
- Le dôme de Dahar au nord,
- Hassi Messaoud à l'ouest.

Le Groupement Sonatrach/Anadarko possède actuellement deux blocs en Algérie (bloc404, bloc208), qui sont actuellement en exploitation, la surface d'exploration est d'environ 5.5 millions d'âcres, jusqu'ici le Groupement a trouvé approximativement 2.8 milliards de barils de réserves récupérables d'huile.

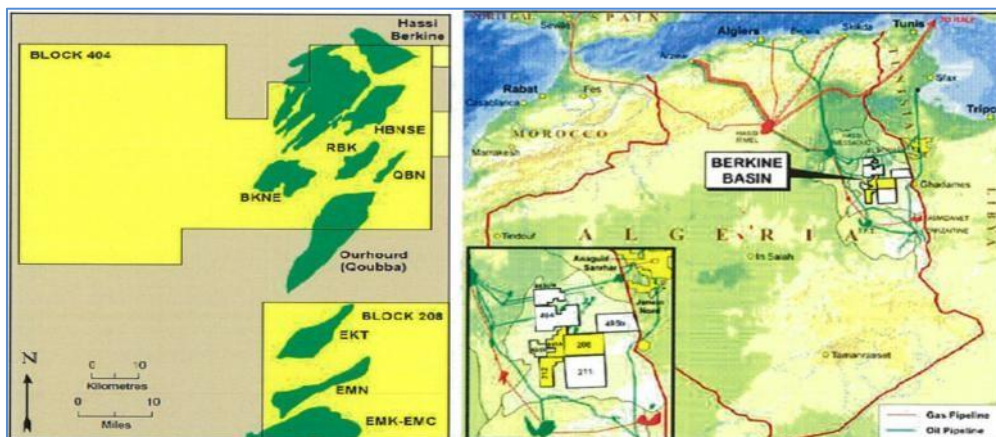


Figure IV.1: emplacement du champ.

### IV.1.2 Historique du champ:

Le champ de Hassi Berkine a été découvert en février 1994 et le groupement a été créé en 1998 en tant qu'organisme d'opération conjointe par Sonatrach, l'Entreprise Pétrolière et Gazière Nationale Algérienne, et Anadarko Petroleum Corporation qui est l'une des premières compagnies indépendantes d'exploration et de production de pétrole et de gaz dans le monde.

Le groupement Berkine est chargé de gérer l'ensemble des activités de l'association Sonatrach/Anadarko sur les blocs 404 et 208 dans le désert du Sahara algérien.

Le forage a commencé en 1993. La profondeur maximum de 3440 mètres a été atteinte le

1er janvier 1994.

L'objectif principal était les grès du Trias Argilo-Gréseux Inférieur (TAGI) qui s'étaient avérés productifs dans les puits. Le réservoir TAGI dans le puits HBN-1 consiste en deux couches de grès ayant une épaisseur totale de 23m. Trois carottes de 27m ont été coupées dans ce puits, les résultats du test et les indices trouvés dans les carottes indiquent tous que le réservoir pénètres est complètement dans la colonne d'hydrocarbures. La porosité moyenne des zones déterminées par l'analyse conventionnelle des échantillons de carotte était d'à peu près 19%. La moyenne des perméabilités de carottes était de 552 md.

Le test de puits a été effectué dans le TAGI à travers des intervalles perforés de 3238-3248m et 3255-3272m. Le débit obtenu est de 4.900 bbld et 6.3 MMCF avec une duse de 3/4" de diamètres et une pression de 1330 lbs/in<sup>2</sup>

Le Groupement Berkine (Association Sonatrach/Anadarko) a foré et complété plus de 300 puits dans les blocs 404 et 208.

Les champs dans les blocs 404 et 208 sont actuellement en production, la quantité produite dépasse les 220.000b/d d'huile (HBNS et EL MERK) et une certaine quantité de condensat (environ de 25000 bbl). Le bloc 404 inclut six champs actuellement en production, à savoir : HBN, HBNS, HBNSE, RBK.QBN, BKNE et BKE. Tous les champs, produisent à partir du TAGI (trias Argileux gréseux inférieur). La récupération de l'huile est accélérée et maximisée par l'injection de l'eau et le gaz. Tous les puits de développement (producteurs et injecteurs) sont verticaux. Seulement les grès supérieurs et moyen du TAGI contiennent de l'huile, ils possèdent une épaisseur totale à voisinante des 100m et l'épaisseur utile s'étend de 18 à 40m.

La qualité du réservoir est bonne avec des porosités de 14-18% et une perméabilité changeante de 400 à 700md.

#### **IV.1.3 Organigramme du Groupement Berkine:**

L'organigramme fonctionnel du groupement Berkine est comme suit :

Tableau IV.1: L'organigramme fonctionnel du groupement Berkine.

Siege à HASSI MESSAOUD	Siege au site HASSI BERKINE
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Direction General (Hassi Messaoud)</li> <li>➤ Direction Réservoir</li> <li>➤ Département Forage</li> <li>➤ Département HSE</li> <li>➤ Direction contrats</li> <li>➤ Direction Finance</li> <li>➤ Direction ressources Humaines</li> <li>➤ Département Moyens Généraux</li> <li>➤ Département IT &amp; T</li> <li>➤ Direction Soutient</li> <li>➤ Direction des Operations (HBNS et Elmerk)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Département technique</li> <li>➤ Division Matériels</li> <li>➤ Division Logistique</li> <li>➤ Direction Champs HBNS</li> <li>➤ Division HSE</li> <li>➤ Division Exploitation</li> <li>➤ Division Maintenance</li> <li>➤ Division EP (Engineering de Production)</li> </ul>

#### IV.1.4 Description de l'ouvrage :

Le CPF (Center Processing Facility) est une usine de production de brut (huiles) comprenant une unité d'injection d'eau (Water Flood), cette dernière est une unité de traitement des eaux qui comporte deux circuits qui sont, Le circuit d'alimentation assuré généralement par plusieurs forages albiens, et un circuit d'injection, ce dernier est muni d'une unité de traitement chimique de plusieurs produits chimiques afin d'améliorer la qualité du réservoir.

Cette unité joue deux rôles principaux qui sont :

- Soit réduire la salinité de l'huile par une eau diluée (moins saline).
- La réinjection de l'eau prévenu des puits producteur dans des puits injecteur d'eau après traitement.

L'unité de water flood est constituée d'un ensemble d'ouvrages en :

- Charpente métallique type rack leurs structure en portique supportant des pipes de différente diamètre.
- Abris pour équipement en charpente métallique.
- Des équipements tels que pompes, citernes, bacs de stockage pose sur des massifs en béton armée.

Le système de fondation adopté pour l'ensemble des ouvrages de l'unité est en semelles

isoles en béton armée, ces fondations sont posées sur un sol sableux de granulométrie moyenne.

On a constaté visuellement une dégradation importante et détérioration des fondations de l'unité Water Flood. Afin de connaître la nature des dégradations, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit une investigation nécessaire pour la prise des décisions relatives aux réparations du support des fondations.

#### IV.2 Phase de reconnaissance préliminaire:

On a fait une visite préliminaire pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées.

À travers notre interventions visuelles nous avons enregistré :

- Des infiltrations importantes d'eau au niveau de jonction des pipes, ces eaux sont évacuées directement dans le sol des fondations qui devient humide en permanence par manque de dallage de protection.
- Les rejets de cette unité sont directement déversés dans le sol de nature sableuse à limoneuse provoquant une vaste contamination des massives par ces eaux agressives (brute et produit chimique de nature diverse). Vu l'absence de pavage et de canalisation de drainage des rejets.
- Dépôt important du sel sur les fondations des pompes
- L'inspection visuelle nous a permis de constater des dégradations importantes au niveau des massifs supports est qui consistent à ce qui suit :



**Figure IV.2:** des dégradations importantes au niveau des massifs supports.

- Des microfissures.
- Des fissures horizontales et verticales sur certains massifs.

-Gonflement et éclatement du béton pour certains massifs de fondation suite à la corrosion très avancés des armatures.

Les eaux d'alimentations et d'injections sont canalisées par plusieurs pipes reposant directement sur des massifs, le pompage de ces eaux induit des vibrations très importants influençant sur la stabilité des ouvrages et contribuant à l'augmentation des charges et de des tensions sur les structures des supports.



**Figure IV.3:** Les eaux d'alimentations et d'injections.

Afin de connaître la nature des détériorations, leur étendue et leur potentialité d'évolution, une investigation et une inspection ont été réalisées en collaboration avec le laboratoire de travaux publics du LTPS sud sur la qualité du béton des supports des équipements de l'unité water flood.

### **IV.3 Campagne d'évaluation:**

Après rassemble, contrôle et vérification toutes les informations disponibles concernant la conception, la construction, l'utilisation et l'entretien de la structure Il s'avère qu'il a été effectué conformément aux normes international en vigueur. Toutes les conditions environnemental, climatique, Spécifications d'origine et Matériaux utilisés ont été prises en

compte.

Après avoir constaté que l'étude initiale était exempte d'erreurs et que, au contraire, elle était considérablement majorée, une intervention a été effectuée pour la réalisation du diagnostic et de l'évaluation détaillée de l'unité water flood.

La méthode adoptée pour une approche objective est :

- La réalisation des essais ultrasonique afin de déterminer la qualité du béton
- L'échantillonnage des eaux circulant à travers l'unité (l'unité comporte des eaux à l'état naturel exploitées à partir de l'albien, et des eaux de réinjection traitées chimiquement par des acides et des antis corrosifs et divers produits chimiques afin d'améliorer la productivité du réservoir)
- Le prélèvement de divers dépôts sur sols et béton, afin de déterminer leur agressivité chimique vis-à-vis du béton (sulfates, chlorures, Carbonates ...).

Au laboratoire les essais réalisés sur les échantillons sont :

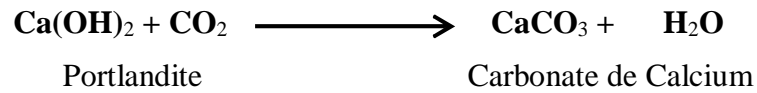
- Les sols et les dépôts : - Analyses chimique sommaires (Sulfates, Chlorures, Carbonates, Sel Sodique).
- Les eaux du Water Flood : - Analyses chimiques sommaires (Sulfates, Chlorures, Carbonates, Sel Sodique) - Conductivité électrique et mesure du PH.
- La qualité de béton est souvent influencée par les caractéristiques de ces constituant (eau de gâchage, granulats, ciment, adjuvants), mais d'autres facteurs interviennent pour influencer la durabilité des constructions en béton armé telle que l'agressivité des sols aux alentours immédiats de massifs, la porosité, la perméabilité, la composition chimique des eaux de circulation superficielles, etc.

La chimie des eaux et des sols contaminés qui sont aux alentours immédiats des fondations est un facteur clé dans la stabilité et la durabilité des infrastructures en béton plusieurs phénomènes peuvent être déclenché

### **IV.3.1 Les phénomènes:**

#### **A. Corrosions des Armatures Métalliques:**

Le phénomène peut être déclenché par deux phénomènes le premier est lié à la présence de gaz carbonique en excès cela induit la carbonatation du béton selon la réaction chimique suivante (10):



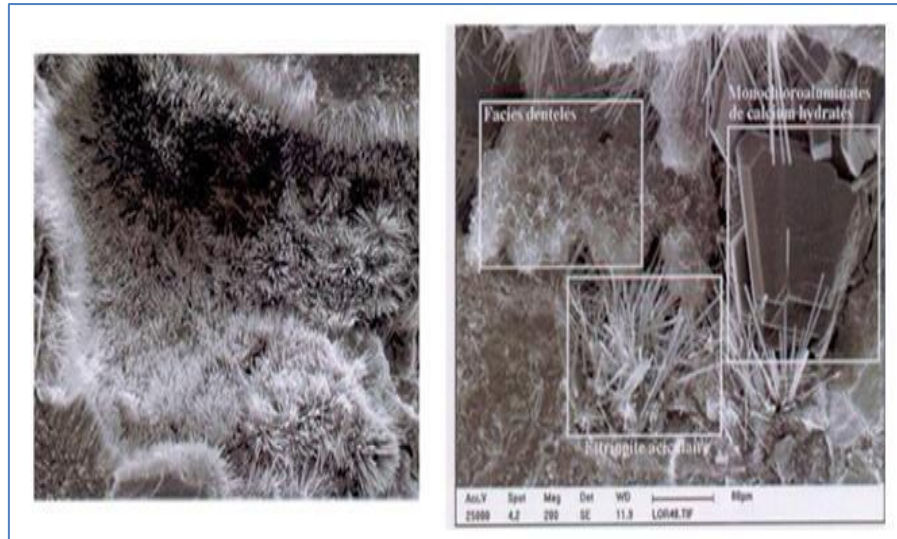
Le produit de cette réaction aura comme principal effet la baisse du PH (généralement inférieur à 9) et ainsi la dépassivation des armatures et en suite la corrosion. Le deuxième mécanisme est celui de la pénétration des ions chlorures (Cl-) dans l'enrobage ceci peut être accélérer soit par entrainement mécanique par les eaux ou soit par gradient de concentration si le béton est constamment humide, ainsi que l'état du béton (présence de fissuration ou non) et la porosité de la matrice cimentaire. L'unité Water Flood est située au centre de l'usine dans un endroit exposé aux émissions des torches (source potentiel de CO<sub>2</sub>).



**Figure IV.4:** l'état du béton.

### **B. Attaques sulfatiques:**

La présence de sulfates dans le sol, l'atmosphère, les eaux ou dans le béton lui-même provoque l'apparition d'une substance chimique nommée l'ettringite celle-ci a un aspect fibreux et sa croissance se fait sous forme d'aiguille provoquant l'expansion du béton qui se traduit à la surface par la présence de fissuration et d'éclatement superficiel facilitant ainsi la pénétration et la contribution des autres éléments agressifs et par suite l'accélération du processus de dégradation.



**Figure IV.5:** Vue par le microscope électronique à Balayage (MEB) de l'évolution des aiguillés de l'ettringite

Présence d'éclatement superficielle et d'écaillage en plus d'une fissuration importante dans un nombre important des massives (surtout ceux situés dans le parcours des eaux de percolation),



**Figure IV.6:** Gonflement et éclatement du Béton.

### C. Les Alkali-réaction:

Ces réactions sont généralement engendrées par les interactions chimiques des constituants du béton (silice) et la phase alcaline active et soluble produisant un gel Silico-Calco-Alcalin expansif, le phénomène se traduit par la présence de fissurations en réseau et orienté, la coloration des parements et la rupture des armatures. Cette pathologie a été observée dans l'unité Water Flood avec des désordres qui sont apparus à peu près 4 ans après la mise en service de celle-ci (corrosion importantes des armatures, détachement des blocs de béton, fissuration, gonflement et écaillage, présence de minéralisation et de dépôt coloré).



Figure IV.7: Les Alkali-réaction.

#### D. La Lixiviation et l'écaillage:

Le phénomène est lié à l'acidité des eaux en contact avec le béton, un PH acide provoque la dissolution de la matrice cimentaire principalement la portlandite et provoque l'augmentation de la porosité du béton, l'écaillage et engendré par la diffusion des ions chlorures. Le phénomène est observé dans l'unité water flood et se manifeste par l'aspect poreux et détérioré du béton.



Figure IV.8: La Lixiviation et l'écaillage

#### IV.3.2. Réalisations des tests ultrasoniques:

La prospection a été réalisée par un dispositif de mesure ultrasonique, le diagnostic avisé 20 ouvrages présentant les cas les plus défavorables, les technique des tests sont du type directe, semi directe, et mesure indirect en surface, les résultats sont exposé dans le tableau suivant:

Tableau IV.2: les résultats de Réalisations des tests ultrasoniques

	D (cm)	T foS)	V (m/s)	Mode d'Acquisition
<b>Référence de L'Ouvrage V8-723C</b>				
<b>Fondation A</b>				
Mesure 1	15	84,4	1777,25118	Acquisition indirecte
Mesure 2	35,35	530	666,981132	Semi Directe
<b>Fondation B</b>				
Mesure 1	12,5	62,3	2006,4205	

Mesure 2	13	121	1074,3802	Acquisition indirecte
Mesure 3	15	97	1546,3918	
<b>Fondation C</b>				
Mesure 1	22	216	1018,51852	Acquisition Indirecte
Mesure 2	18	98	1836,73469	
<b>Fondation D</b>				
Mesure 1	70	425	1647,05882	Acquisition Directe
Mesure 2	70	331,9	2109,069	
<b>Référence de L'Ouvrage V8-723B</b>				
<b>Fondation A</b>				
Mesure 1	20	121,3	1648,80462	Acquisition Indirecte
Mesure 2	32,53	256,6	1267,73188	Semi Directe
<b>Fondation B</b>				
Mesure 1	72	217,2	3314,91713	Acquisition Directe
Mesure 2	70	572,7	1222,28043	

<b>Référence de L'Ouvrage</b>				<b>V8-723A</b>
<b>Fondation A</b>				
Mesure 1	26	427,2	608,614232	Acquisition Indirecte
Mesure 2	26	567,1	458,472932	
<b>Fondation B</b>				
Mesure 1	20	231	865,800866	Acquisition Indirecte
Mesure 2	20	649,9	307,739652	
<b>Fondation C</b>				
Mesure 1	20	77,1	2594,03372	Acquisition Indirecte
Mesure 2	15	73,6	2038,04348	
Mesure 3	19	108,3	1754,38596	
<b>Référence de L'Ouvrage</b>				<b>V8-753 Buffer Vessel</b>
Mesure 1	28	176,5	1586,40227	
Mesure 2	20	335,1	596,836765	
Mesure 3	20	150,9	1325,38105	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 4	20	139,6	1432,66476	
Mesure 5	13	54,1	2402,95749	
Mesure 6	18	135,1	1332,34641	
<b>Référence de L'Ouvrage</b>				<b>V8-757 A</b>
<b>Fondation A</b>				
Mesure 1	15	204,5	733,496333	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 2	35	412,9	847,662872	Acquisition Indirecte
<b>Fondation B</b>				
Mesure 1	13	58	2241,37931	Acquisition Indirecte
Mesure 2	20	414,7	482,276344	
<b>Fondation C</b>				

Mesure 1	19	594,4	319,650067	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 2	18	348,7	516,20304	
Référence de L'Ouvrage				V8-757 C
Fondation A				
Mesure 1	30	156,	1913,26531	Acquisition Indirecte
Mesure 2	20	334,	598,265031	Acquisition Indirecte en surface
Fondation B				
Mesure 1	20	115,	1727,11572	Acquisition Indirecte
Mesure 2	18	180,	996,677741	
Référence de L'Ouvrage				V8-757 D
Fondation A				
Mesure 1	20	391,3	511,11679	Acquisition Indirecte
Fondation B				
Mesure 1	17	208,2	816,522574	Acquisition Indirecte
Mesure 2	27	260,7	1035,67319	
Fondation C				
Mesure 1	21,21	69,3	3060,60606	Semi Directe
Référence de L'Ouvrage				P8-740 B
Mesure 1	16	97,9	1634,32074	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 2	20	93	2150,53763	
Référence de L'Ouvrage				P8-742 A
Mesure 1	26	251,4	1034,20843	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 2	20	74,4	2688,17204	
Référence de L'Ouvrage				P8-777 B
Mesure 1	22	131,7	1670,4631	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 2	20	223,4	895,25514	
Référence de Pipe Rack entre V8-757B et V8-757D				
Fondation A				
Mesure 1	54	167	3233,53293	
Mesure 2	54	163,2	3308,82353	Acquisition Indirecte
Fondation B				
Mesure 1	53	429,3	1234,5679	Acquisition Directe
Mesure 2	53	325,5	1628,26421	
Fondation C				
Mesure 1	13	114,8	1132,40418	Acquisition Indirecte
Mesure 2	20	241	829,875519	
Référence de L'Ouvrage				T8-723
Mesure 1	12	68,2	1759,5307	
Mesure 2	15	173,2	866,05080	Acquisition Indirecte
Mesure 3	10	57	1754,3859	
Référence de L'Ouvrage				T8-783
Mesure 1	20	152,1	1314,9243	

Mesure 2	16	100,8	1587,3015	
Mesure 3	18	86,1	2090,5923	Acquisition Indirecte en surface
Mesure 4	25	201,1	1243,1626	
Mesure 5	16	150,4	1063,8297	
Référence de L'Ouvrage				Fondation Poutre N°358 - WF 10
Mesure 1	13	81	1604,9382	Acquisition Indirecte en surface
Référence de L'Ouvrage				Fondation Poutre N°355
Mesure 1	15	95,2	1575,6302	Acquisition Indirecte en surface
Référence de L'Ouvrage				Fondation Poutre N°354 - TN 27
Mesure 1	17	114,7	1482,1272	Acquisition Indirecte en surface
Référence de L'Ouvrage				Fondation Poutre N°352
Mesure 1	16	112,6	1420,95915	Acquisition Indirecte en surface
Référence de L'Ouvrage				T8-742
Mesure 1	16	86,4	1851,85185	
Mesure 2	18	58	3103,44828	Acquisition Indirecte
Mesure 3	14	115,3	1214,22376	

**Commentaires :** Les résultats obtenus ont permis d'effectuer une étude statistique sur les vitesses des ondes ultrasoniques dans le béton analysé, ces valeurs sont comprise entre un maxima de 3314.92 m/s et un minima de 307,74 m/s, l'écart type et de l'ordre de 739,34, la moyenne des résultats gravite autour de 1486,77 m/s. Afin de valoriser les résultats obtenus et déduire l'importance et l'ampleur des dégradations on c'est basé sur la classification des vitesses des ultrasons selon les références du CTC (voir tableau N °3).

**Tableau IV.3:** Présentation des résultats des statistiques effectués sur les mesures obtenues par ultrason.

Statistiques	Valeurs
Min	307,74
Max	3314,92
Moyenne	1486,77
Ecart Type	739,34

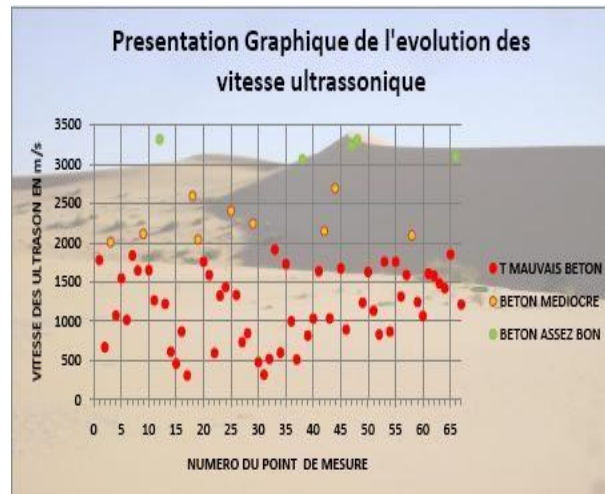


Figure IV.9: Présentation graphique des mesures ultrasoniques.

Tableau IV.4: Présentation de la classification des vitesses ultrasonique du béton

Nbr des Points	Pourcentage (%)	Intervalle de la vitesse ultrasonique (m/s)	Classification
53	79.1	Inférieur à 2000	<b>Très mauvais béton</b>
9	13.4	Entre 2000 et 3000	<b>Béton médiocre</b>
5	7.5	Entre 3000 et 3500	<b>Béton assez bon</b>
0	0	Entre 3500 et 4500	<b>Bon béton</b>
0	0	Supérieur à 4500	<b>Béton excellent</b>

Les résultats obtenus ont révélé que 79,1 % des résultats sont classés dans le béton de très mauvaise qualité, 13,4% des mesures sont qualifié de médiocre et 7.5% seulement sont d'assez bonne qualité.

### IV.3.3. Prélèvements des échantillons:

#### IV.3.3.1. Prélèvements des eaux (circuit entré et sortie):

Les eaux en contact avec les massifs des fondations ont été échantillonnées et analysées au laboratoire les résultats s'exprime comme suit:

Echantillons	cl <sup>-</sup>	So4 <sup>-2</sup>	PH	HCo3 <sup>-2</sup>
Echantillon N°1 eau albienne sans traitement chimique (circuit d'entrée)	3100	1250	7.50	222.65
Echantillon N°2 eau albienne traité chimiquement (sortie vers HBN)	29225	1500	8.85	149.45
Echantillon N°3 eau albienne traité chimiquement (circuit de sortie vers HBN)	50000	3750	6.55	88.45

**Commentaires :** Ces eaux s'écoulent à travers les sols des fondations et en contact directs avec les massifs en béton armé sans aucune protection ni drainage, la composition chimique de ces eaux est très agressive vis-à-vis du béton avec des taux de chlorures variables de 3100mg/l à des taux extrêmement importants dépassant les 25000mg/l, selon les normes, ils ne doivent pas dépasser les 1000mg/l pour les bétons armés (voir norme XP -P 18 303 Aout 1999 pour les eaux de gâchage), le taux de sulfates à son tour est élevé et permet de classer ces eaux dans les milieux agressifs de type A2 et A3 d'agressivité moyenne à forte (voir la norme P 18-011 juin 1992 sur la classification des environnements agressifs) Le PH des solutions analysées permet de les classer dans la classe A1 (faiblement agressive).

Aux termes des résultats obtenus nous pouvons dire que l'eau analysée présente un taux d'agressivité très important surtout les taux des chlorures et les sulfates.

#### IV.3.3.2 prélèvements des sols (aux alentours des fondations):

Vu la nécessité d'avoir une idée sur la constitution des sols de fondation nous ont procédé à la prise d'échantillons de sol situé aux alentours immédiats des fondations les résultats sont exprimés comme suit:

Echantillons	Insolubles (%)	SO <sub>4</sub> <sup>''2</sup> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	NaCl mg/l	Cl <sup>''</sup> mg/l
Echantillon 1	67.81	0.47	7	4.65	2.834
Echantillon 2	86.74	0.25	8	0.686	0.418
Echantillon 3	88	0.39	5	0.299	0.182

Les échantillons de sol analysés présentent des taux divers de sulfates ce qui permet de les classer suivant la norme P 18-011 page 6 dans la classe A1 à A2 (sol de faible à moyenne agressivité), le taux de chlorures est variable et atteint un pourcentage important dans l'échantillon 1 (prélevé à proximité du V8-757A) si nous prenons comme référence leur pourcentage dans un béton armé voire norme P 18-011 page 13 avec des résultats qui dépassent les 2%. La British Standards Institute (BSI) a classé la gravité de l'attaque au sulfate par le béton par les concentrations de sulfates en solution et dans les sols comme suit: négligeable à moins de 0,015%, modéré à 0,015 à 0,100%, sévère à 0,100 à 0,200% et très sévère à plus de 0,200%.

#### IV.3.3.3 prélèvements des dépôts (à la surface des massifs):

Des dépôts trouvés à la surface du sol et sur les fondations ont été échantillonnés afin de déterminer les teneurs en éléments agressifs, les résultats sont représentés comme suit : Echantillon A (prélevé à proximité du V8-757 A): Dépôt de couleur blanchâtre solide à aspect cumulatif (aspect stalagmitique) trouvé à la surface des sols de fondation à proximité de

l'ouvrage référencié Echantillon B (prélevé a proximité du V8-723 F): Dépôt de couleur blanchâtre laminaire fin trouvé à la surface de la fondation de l'ouvrage référencié

Echantillons	Insolubles (%)	SO <sub>4</sub> <sup>''2</sup> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Cl <sup>''</sup> mg/l
Echantillon A	31.22	0.68	9	2.834
Echantillon B	7.65	0.87	3	2.834

Les dépôts analysés semblent contenir des teneurs importantes en chlorures dépassant le seuil autorisé, la teneur en sulfates est modérée.

**Tableau IV.5:** Définition des classes d'agressivité chimique .

#### Agressivité des eaux

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN		
		XA1	XA2	XA3
CO <sub>2</sub> agressif (mg/l)	NF EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	>100 Jusqu'à saturation
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	NF EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	NF EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 Jusqu'à saturation
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 50 et ≤ 100
pH	NF T 90-008	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
TAC (mé/l)	NF EN ISO 9963-1 et NF EN ISO 9963-2	≤ 1,0 et ≥ 0,4	< 0,4 et ≥ 0,1	< 0,1

#### Agressivité des sols

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN		
		XA1	XA2	XA3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg de sol séché à 105 °C ± 5 °C)	NF EN 196-2	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Degré d'acidité	Annexe A	> 200	-	-

#### Agressivité des gaz

Agent agressif	Norme d'essai	Classe d'agressivité selon NF EN 206/CN		
		XA1	XA2	XA3
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	NF EN 14794	≥ 0,15 et ≤ 0,5	> 0,5 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200
H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )	NF EN ISO 19739	< 0,10	≥ 0,1 et ≤ 10	> 10 et ≤ 200

### IV.4 Expression des résultats et détermination des facteurs engendrant le phénomène:

A partir des résultats obtenu on a pu déduire les causes qui ont engendré la série des dégradations affectant le béton des fondations de l'unité Water Flood (complexe pétrolier

Berkine) , les résultats des auscultations par ultrason ont révélés l'importance des dégâts causé par la pénétration et la circulation des eaux agressives dans le béton exceptionnellement les chlorures et les sulfates qui ont engendré des dégradations interne et externe du béton traduite par la présence de gonflements et fissurations ,corrosions et dépassivation des armatures et détachement du béton.

Toute ces observations ont été confirmés par les analyses chimiques sur les eaux, les sols et les dépôts sur les massives de fondations. La combinaison de tous ces facteurs avec les rejets gaziers par émissions du CO<sub>2</sub> ont favorisé l'instauration d'un environnement très agressive vis-à-vis du béton

A la base de ces conclusions nous proposons une Classification des ouvrages selon les modalités de réparation et de confortement :

a) Élément nécessitant une reprise total ou création de substituant

b) Les ouvrages nécessitant une réparation partielle par remplacement du béton détérioré et ajout de chemisage supplémentaire ainsi que des armatures métalliques ancré dans des trous forés, le scellement s'effectué par l'application d'une résine spécifique (Gamme Sika Ancrofix et SikaDur)

c) les ouvrages nécessitant le colmatage des fissures superficielles (après nettoyage) par l'application des résines de colmatage selon le System Sika Injection (conformément à la spécification EN 1504-10)

d) Des ouvrages nécessitant d'être protéger contre la progression des chlorures et des gaz à l'intérieur des pores du béton par l'application d'une gamme de résine d'imperméabilisation du type MasterSeal 550 FX, Therseal FX 100, SikaFloor et Cure Hard 24, Sika Gard et des résines spécifiques contre la corrosion des armatures du type SikaFerro Gard 903, MasterSeal 136, ProtectoSil CIT.

## **IV.5 Techniques de réparation:**

### **IV .5.1. Eléments à reprendre:**

La dégradation du béton de la fondation est très préjudiciable ceci ne lui permet pas la reprise des charges qui lui sont affectées et par conséquent cela nécessite ça démolition son évacuation à la décharge et ensuite ça reconstruction.

**IV.5.1.1. Procédure de construction:**

## A) Excavation :

L'excavation sera réalisée manuellement il faudrait faire attention à ne pas endommager les équipements adjacents, ou bien les installations souterraines.

## B) Démolition ou son évacuation de la fondation dégradée :

Les fondations dont la dégradation est très avancée seront démolies totalement, ou évacuées à la décharge.

C) Coulage de béton de propreté dosé à 150kg de ciment / Im<sup>3</sup> de béton mis en œuvre.

- La mise en place de coffrage : Le coffrage doit être propre, en bon état et dépourvu de toute impureté.

- La mise en place des armatures : Les barres d'armatures devront être non corrodées et dépourvues de toute trace d'huile, de grasse ou impureté.

- Coulage de béton : Avant le coulage de béton, il faudrait vérifier l'implantation, les dimensions de la fondation ainsi que la qualité des matériaux mises en œuvre.

Le dosage du béton est selon les normes (Voir norme P 18-011 page 7) 400kg de ciment type CRS (résistant aux sulfates et chlorures) / Im<sup>3</sup> de béton mis en œuvre. Pour la reprise de bétonnage, il y'a lieu d'utiliser une résine époxydique type Sikadur- Reprise bétonnage.

Si la température atmosphérique est supérieure ou égale à 300C par temps chauds, on utilise un adjuvant retardateur de prise époxydique type Sika Viscocrete Temp012, car ce dernier améliore la stabilité, limite la ségrégation et confère une longue. Rhéologie aux bétons. Le curage de béton doit être pris en compte.

A) Application de deux ou trois couches de peinture bitumineuse type Flint-coat pour tous les bétons enterrés afin d'assurer une bonne protection et meilleure imperméabilisation.

B) Nettoyage de la nouvelle fondation pour qu'elle soit saine, cohésive, et débarrassée de toute partie non adhérente.

C) Remise en état initial (remblaiement & nettoyage du site).

**IV.5.2. Éléments à renforcer avec chemisage:**

La dégradation du béton de la fondation n'est pas très préjudiciable ceci lui permet la reprise des charges qui lui sont affectées et par conséquent cela nécessite un renforcement partiel par remplacement du béton détérioré et ajout de chemisage supplémentaire ainsi que des

armatures métalliques ancrées dans des trous forés.

- Exemple de redimensionner (M8 - 723 SKID KIT FOR HIPERFILTERS) :

Afin d'assurer la stabilité de la structure, nous serons obligés de redimensionner les poteaux en fonction du résultat du béton donné par le scléromètre lors de notre intervention.

#### - Vérification à la compression simple:

On doit vérifier la condition suivante :

$$\frac{N_u}{B} \leq 0.6 \times f_{c28} \quad \text{Avec } B : \text{section du béton.}$$

$N_u$  : L'effort normal ultime.

$f_{c28}$  : force de compression de béton.

$B$  : Surface de poteau.

Données fournies d'Axsia Serck Baker :

- Poids opérationnel 350.75 kN
- résultat du scléromètre 17.5 Mpa
- surface initiale du poteau 0.09 m<sup>2</sup>

$$B \geq \frac{N_u}{0.6 \times f_{c28}} \rightarrow B \geq \frac{350.750 \times 10^{-3}}{0.6 \times 17.5} = 0.0334 \text{ m}^2$$

On a:  $B = 0.09 \text{ m}^2$

$B = 0.09 \text{ m}^2 > 0.0334 \text{ m}^2$

<b>Condition vérifiée.</b>
----------------------------

#### IV.5.2.1 Procédure de réparation:

##### A) Excavation :

L'excavation sera réalisée manuellement ou à l'aide de moyen mécanique, seulement il faudrait faire attention à ne pas endommager les fondations par les godets des engins (Retro chargeur ou Pelleteuse), les équipements adjacents, ou bien les installations souterraines.

##### B) Piquage du béton dégradé :

Piquage du béton endommagé jusqu'à l'apparition des armatures, et nettoyage à vif des surfaces de reprise pour y faire saillir les graviers, mouillir longuement et abondamment les surfaces afin de saturer d'eau le béton et enfin éliminer l'eau en excès à l'air comprimé avant le coulage du béton.

**C) Mise en place des armatures :**

L'utilisation de brosse métallique pour nettoyer les aciers corrodés, pour une meilleure protection des armatures on utilise des résines adéquates telle que, Sika Ferro Gard 903, Masterseal 136, ProtectoSil CIT, puis la perforation des semelles pour le scellement de nouvelles armatures verticales, pour cela on utilise des colles époxydiques structural telle que, Sika AnchorFix-2, Sika dur- 30 pour le scellement et ancrage de nouvelles armatures au béton existant.

A) La mise en place de coffrage: Le coffrage doit être propre, en bon état et dépourvu de toute impureté.

B) Coulage de béton: Avant le coulage de béton, il faudrait vérifier l'implantation, les dimensions de la fondation ainsi que la qualité des armatures mises en œuvre.

Le dosage du béton est selon les normes (Voir norme P 18-011 page 7) 400kg de ciment type CRS (résistant aux sulfates et chlorures) ou HTS / Im3 de béton mis en œuvre. Pour la reprise de bétonnage, il y'a lieu d'utiliser une résine époxydique type Sikadur- Reprise bétonnage, ou une résine d'accrochage type Sikaflex, car ce dernier améliore fortement l'adhérence entre béton frais et durci, augmente la résistance à la traction, limite le risque de fissuration, Et améliore l'imperméabilisation.

C) Application de deux ou trois couches de peinture bitumineuse type Flint-coat pour tous les bétons enterrés afin d'assurer une bonne protection et meilleur imperméabilisation.

D) Nettoyage de la fondation pour qu'elle soit saine, cohésive, et débarrassée de toute partie non adhérente.

E) Remise en état initial (remblaiement & nettoyage du site).

**IV.5.3 Eléments à colmater:**

Cette procédure couvre la réfection des fissures par application d'une résine adéquate.

**IV.5.3.1. Procédure de réparation:****A) Excavation:**

L'excavation sera réalisée manuellement ou à l'aide de moyen mécanique, seulement il faudrait faire attention à ne pas endommager les fondations par les godets des engins (Retro chargeur ou Pelleteuse), les équipements adjacents, ou bien les installations souterraines.

**B) Préparation des fissures:**

Avant de procéder au colmatage des fissures superficielles ou microfissures, il faudrait tout d'abord nettoyer soigneusement les fissures ainsi que les surfaces qui l'entourent de tous les poussières, débris, chutes de béton, exempt de traces d'huile, de graisse et eau stagnante à l'aide de l'air comprimé ou autre moyen adéquat pour permettre une bonne adhérence entre la résine et le béton durci.

Cette opération doit être exécutée selon la fiche technique des produits Sika ou autres adoptés pour ce type de réparation.

C) Méthode de réparation La méthode de réparation par injection d'une résine époxydique spéciale à l'intérieur des fissures ou microfissures telle que, Sikadur-52 Injection, Sika dur-31 CF, Sika dur-32 LP.

- Mélanger complètement les deux composants, la résine et le durcisseur, pendant 3 à 5 minutes de préférence avec un agitateur électrique ou pneumatique à faible vitesse de rotation (< 250 tours/min), en évitant d'introduire plus d'air,
- Nettoyer le matériel avant polymérisation de la résine.
- Mettre en place les cavaliers d'injection tous les 30 à 50 cm,
- Cacheter les fissures avec Sikadur-30 Colle.
- Injecter le Sikadur-52 Injection à l'aide d'un pot à pression dans le premier cavalier.
- Lorsque le Sikadur-52 Injection ressort par le deuxième cavalier, obturer le premier et injecter dans le deuxième cavalier.
- Continuer ainsi jusqu'au dernier cavalier.
- Laisser polymériser 24 heures au minimum à 200C.
- Conditions d'utilisation :

La technique d'injection étant délicate, ce produit doit être mis en œuvre par des personnes ou entreprises spécialisées, afin d'obtenir une bonne qualité de soudage des fissures.

Les résines époxydiques sont des sensibilisateurs pour la peau et les muqueuses, en conséquence, le port de gants de caoutchouc et de lunettes est obligatoire lors de l'utilisation. La température optimale d'application est comprise entre 100C et 300C.

La température du support doit être supérieure à 100C et inférieure à 300C. La largeur maximum des fissures doit être de 5mm.

Remise en état initial (remblaiement & nettoyage du site).

#### **IV.5.4. Eléments non endommagés nécessitant une protection :**

Ces fondations sont en bon état et nécessitent une protection contre la progression des chlorures, sulfates, carbonates, et des gaz à l'intérieur des pores du béton par l'application d'une gamme de produits d'étanchéité et d'imperméabilisation pour assurer une durée de vie supplémentaire au béton.

##### **IV.5.4.1. Procédure de réparation:**

A) Excavation :

L'excavation sera réalisée manuellement ou à l'aide de moyen mécanique, seulement il faudrait faire attention à ne pas endommager les fondations par les godets des engins (Retro chargeur ou Pelleteuse), les équipements adjacents, ou bien les installations souterraines.

B) Nettoyage de la fondation pour qu'elle soit saine, cohésive et débarrassée de toute partie non adhérente.

C) Application des résines spécifiques d'imperméabilisation et de protection telle que, MasterSeal 550 FX, TherSeal FX 100, Sika Gard, SikaTop-107 Protection sur les faces de la fondation et pour réduire la porosité du béton et augmenter ça résistivité et donc, le risque de pénétration.

D) Application des résines spécifiques de protection des armatures contre la corrosion telle que, SikaFerro Gard 903, MasterSeal 136, ProtectoSil CIT sur les faces de la fondation.

E) Remise en état initial (remblaiement & nettoyage du site).

# *Conclusion*

## **Conclusion**

Les structures en béton armé sont souvent affaiblies par les pathologies qui les affectent durant leur vie, ceci est dû à l'environnement qui n'a pas été pris en considération. La pathologie qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées.

A partir des résultats obtenu on a pu déduire les causes qui ont engendré la série des dégradations affectant le béton des fondations de l'unité Water Flood, les résultats des auscultations par ultrason ont révélés l'importance des dégâts causé par la pénétration et la circulation des eaux agressives dans le béton exceptionnellement les chlorures et les sulfates qui ont engendré des dégradations interne et externe du béton traduite par la présence de gonflements et fissurations ,corrosions et dépassivation des armatures et détachement du béton.

## **Recommandations**

Afin d'assurer la durabilité du béton de l'unité Water Flood il est recommandé de :

- ✓ S'assurer de la propreté des éléments à réparer soit par chemisage soit par colmatage afin d'éviter la contamination par des matériaux fins et indésirables.
- ✓ Respecter les consignes citées dans le chapitre 6 du document concernant les modalités de réparation.
- ✓ Durant la mise en œuvre il est nécessaire de réduire les effets des vibrations induites par les équipements avoisinant au maximum.
- ✓ Il est recommandé de substitué le sol de fondation situé à proximité des fondations afin d'éviter une éventuelle contamination.
- ✓ Il est fortement recommandé de réaliser un drain Principal et des canalisations de drainage secondaire à l'intérieur de l'unité Water Flood ainsi qu'un pavage adéquat afin d'éviter les infiltrations sous les fondations.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- (1) ABDE-ELGHANI M., 2009. Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA. Thèse doctorat université Des frères Mentouri-Constantine.
- (2) American Concrete Institute ACI. 2002. “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures.” ACI 440.2R-02, Farmington Hills, Mich.
- (3) American Concrete Institute ACI. 2008. “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures.” ACI 440.2R-08, Farmington Hills, Mich.
- (4) ASTM D4748, ASTM D6087, ASTM D6429-99, ASTM D6432-99
- (5) Avis Technique 3/10-669, Sika CarboDur, SikaWrap,  
<http://www.cstb.fr/pdf/atec/GS03-D/AD100669.pdf>
- (6) Brown, P.W. and Taylor, H.F.W. (1999) The role of ettringite in external sulfate attack. In: J. Skalny and J. Marchand (eds),
- (7) Cours durabilité et pathologie du béton Tarik DJEDDID universite Hamma LAKHDAR El Oued.
- (8) Fédération internationale du Béton FIB, 2001. “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.” Bulletin No. 14, Technical Rep., Lausanne, Switzerland.
- (9) Guidelines Review for CFRP Confinement of Plain and Reinforced Concrete Square Columns. Life Sci J, 2013, 778-790.
- (10) Laurens 2001, Klysz 2004, Sbartai 2005, Ihamouten 2011
- (11) Material science of concrete—sulfate attack mechanisms. American Ceramic Society, Westerville, OH, 73—98.
- (12) Mehta, P.K. (1983) Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete — another look. Cement and Concrete Research, 13, 401—406.
- (13) Norme XP -P 18, Norme P 18-011 , Eurocode 2 & RPA 99 (Art 7.4.1)
- (14) STRRES, Guide FABEM 1, *Reprise des bétons dégradés*, 2008.
- (15) STRRES, Guide FABEM 4, *Protection des bétons*, 2007, STRRES, Guide FABEM 7 mise en ligne prévue en 2011 & STRRES, Guide FABEM 5, *Béton projeté*, 2008