UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des sciences et de technologie

Département de génie de la matière

Filière génie civil

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de

Master en génie civil

Option : Construction et Matériaux

THEME

Evaluation du béton armé dégradé par la corrosion

Région Médéa

Préparé par :

BOUSSOUR Ali

MELOUANE Mohamed

Encadré par :

Promoteur:

Mr. ZEMIR.I

Co-promoteur:

Melle. HADJA.K

2O14/2015


بسم الله الرحمن الرحيم



Remerciment

D’abord, nous remercions vivement notre Bon DIEU pour

L’achèvement de ce mémoire.

Nos Vifs remerciements s’adressent à :

Mr : ZEMIR Ismail, notre promoteur qui nous a orientés

Et dirigé ce travail avec toutes ses Compétences

Et ses précieux conseils.

A Melle : HADJA Kawthar, Mr : GUENDOUZ Mohamed qui nous a suivies pendant toute notre travail.

Et nous a donné un sconse à notre vie professionnelle

Mr : KHAROUBI ingénieur de CTC centre

DE MEDEA

Les membres jurys qui nous ferons l’honneur de juger notre travail.

Enfin, à tous ceux qui ont assisté à participer de prés ou loin

À l’aboutissement de ce mémoire, trouve ici l’expression

De toute notre considération.

Alilou et Mohamed

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères

A mes sœurs

A mes neveux : **Féras et Rayan**

A mes nièces : **Romaissa, Maram,** et **Aridj**

A toute la famille : **BOUSSOUR,** et **SLIMANI.**

Je remercie mon amie et binôme **Mohamed** qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

A tout mes Amis. Sans oublier les étudiants de Médéa.

A toute la promotion de G.C 2015.

Ali.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères

A mes sœurs

A toute la famille : **Melouane et Larbi**

Je remercie mon amie et binôme **ALILOU** qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

A tout mes Amis. Sans oublier les étudiants de Médéa.

A toute la promotion de G.C 2015.

Mohamed.

ملخص:

تم اكتشاف مبدأ الخرسانة المسلحة في أواخر القرن التاسع عشرا. ومنذ ذالك الحين, واستخدامه لديه ديمقراطية و الآن تستخدم على نطاق واسع, سواء الجسور و المباني أو الهياكل الأخرى, وتستخدم هذه المواد المركبة لتحسين نوعية حياة الناس.
في إطار السياسة الحالية,كجزء من التنمية المستدامة وإصلاح الهياكل القائمة فمن الضروري أن تكون هياكل الخرسانة المسلحة قادرة على استيعاب قوات تطبق عليها طوال حياتها. و مع ذلك تحصل تغيرات بسبب مرور الوقت و أيضا البيئة التي تتعرض لها. لإعادة تأهيل بنية الخرسانة المسلحة, من المهم إجراء تشخيص. هذه الخطوة تحدد مختلف أمراض الحاضر و سبب اتساعها, وبفضل هذا فمن الممكن أن تقترح طريقة مناسبة للإصلاح و الحماية ضد الهجمات المستقبلية.

Résumé :

Le principe du béton armé fut découvert à la fin du XIXème siècle. Depuis, son utilisation s'est démocratisée et il est aujourd'hui utilisé à grande échelle. Que ce soit des ponts, des bâtiments ou autres édifices, ce matériau composite est utilisé pour améliorer le cadre de vie des personnes.
Dans le cadre de la politique actuelle, s'inscrivant dans le développement durable, la réparation des ouvrages existants prend tout son sens. Il est nécessaire que le s structures en béton armé soient capables de reprendre les efforts qui leur sont appliqués tout au long de leur vie.
Cependant les ouvrages subissent les altérations dues au temps qui passe mais aussi à l'environnement auquel ils sont exposés. Afin de réhabiliter un ouvrage en béton armé, il est important d'effectuer un diagnostic.
Cette étape permet d'identifier les différentes pathologies présentes, leur ampleur ainsi que leur cause. Grace à cela, il est possible de proposer une méthode de réparation adéquate ainsi qu'une protection contre les attaques futures.

Abstract:

The principle of reinforced concrete was discovered at the end of the nineteenth century. Since then, its use has been democratized and it is now widely used. Whatsoever for bridges, building or other construction, this composite material is used to improve the people's life.
With the current policy, promotes sustainable development, rehabilitation of existing structures makes sense. Concrete structure shall be designed so that they are resistant to all the actions that will apply throughout their lifetime. However structures undergo modifications due to changes in material properties over time, but also because of the environment in which they are exposed. To rehabilitate a reinforced concrete structure, it's important to make a diagnosis. This step allows the identification of its various damages, their magnitude and their cause. Thanks to this, it's possible to propose an adequate method of repair and protection against future attacks.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Liste des tableaux :

Tableau I-1 : Composition du Granulat……..5
Tableau I-2 : Probabilité de corrosion en fonction de la valeur de la résistivité……...34
Tableau II-1 : les résultats sur l'auscultation sonique des bétons……48
Tableau III-1 : Ouvrages à usage d'habitation dégradés dans la région de Médéa……..57
Tableau III-2 : Ouvrages à usage d'équipement dégradés dans la région de Médéa……62
Tableau III-3: Ouvrages d'arts dégradés dans la région de Médéa……..68

- Liste des figures :

Figure I-1 : Composition du Béton…….4
Figure I-2 : Préparation du Béton……...4
Figure I-3 : Fabrication du ciment……..5
Figure I-4 : L'armature du Béton……....6
Figure I-5 : Le Béton armé……..7
Figure I-6 : Phénomène de corrosion……....10
Figure I-7 : Exemple de corrosion uniforme (généralisé) ……10
Figure I-8 : Exemple de corrosion galvanisé……...11
Figure I-9 : Exemple de corrosion par piqûres……..…..12
Figure I-10 : Eclats en formation……..…13
Figure I-11 : Poutre support de réservoir……..14
Figure I-12 : Poteau porteur sous garage, Poteau support de ligne électrifiée…….14
Figure I-13 : Pont préfabriqué en béton armé……...15
Figure I-14 : Pile de pont…….15
Figure I-15 : Château……16
Figure I-16 : Silo……...16
Figure I-17 : Paroi d'aéroréfrigérant……17
Figure I-18: Cheminée……..17
Figure I-19 : Poutre de tablier……...18
Figure I-20 : Quai en zone de marnage……18
Figure I-21 : Tuyau en béton armé……19
Figure I-22 : Corrosion des armatures……..19

Figure I-23 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton. [11] ……20
Figure I-24 : Processus de corrosion des armatures…….....20
Figure I-25 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite…….25
Figure I-26 : Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure…….....27
Figure I-27: Modèle de K.Tuutti……...28
Figure I-28 : Attaque de l'acier par les ions chlorure……29
Figure I-29 : Béton soumis à l'alternance de périodes sèches et humides – Traces de rouille……30
Figure I-30 : évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E /C……...…33
Figure I-31 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation…….34
Figure II-1 : Détection des armatures au radar…….....42
Figure II-2 : Schéma de principe d'une mesure Radar…….....43
Figure II-3 : Résultats par mesure radar, potentiel et visuel de la corrosion d'une dalle……..44
Figure II-4 : Mesures de potentiel……45
Figure II-5 : Roue électrode……..45
Figure II-6: Mesure du potentiel de corrosion……..46
Figure II-7 : Mesure de vitesse de corrosion……47
Figure II-8: Mesure par transparence……48
Figure II-9: Scléromètre……49
Figure II-10 : graphique enrobage-carbonatation……50
Figure II-11 : courbe Vt [10] ……...51
Figure II-12 : Carbonatation sur carotte……51
Figure II-13 : Prélèvements par carottage……53
Figure II-14: Prélèvement d'aciers……...54
Figure III-1: Armatures corrodée, L'enrobage des armatures endommagé…….....58
Figure III-2 : Armatures corrodée, L'enrobage des armatures endommagé……58
Figure III-3: Armatures corrodées……59
Figure III-4: Armatures corrodées……59
Figure III-5: La zone le plus touché (dégradé) ……...……60
Figure III-6 : présence de la corrosion des armatures au dessous de balcon ……...60
Figure III-7: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages à usage d'habitation……61

Figure III-8: Enrobage des aciers détérioré……...63
Figure III-9: Enrobage des aciers détérioré……...63
Figure III-10 : Armatures de la poutre complètement corrodées……..64
Figure III-11: Détérioration de l'enrobage……64
Figure III-12: Détérioration de l'enrobage……65
Figure III-13: Corrosion des armatures……65
Figure III-14: Corrosion des armatures……66
Figure III-15: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages à usage d'équipement……67
Figure III-16 : Ouvrage d'art- pont OUED CHAIR……69
Figure III-17 : Ouvrage d'art- pont OUED BOUKMOURI……69
Figure III-18 : Ouvrage d'art- pont OUED EL MALAH……70
Figure III-19 : Ouvrage d'art- pont OUED ZABOUDJ……70
Figure III-20: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'art……71
Figure III-21: La stagnation des eaux usées dans les caves……..72
Figure III-22 : Etat des vides sanitaires……72
Figure III-23: Espacement entre les deux nappes d'armature lors du ferraillage du voile non respecté……..73
Figure III-24 : Perte de laitance de ciment suite à une mauvaise mise en œuvre du coffrage de voile……...74
Figure III-25 : Perte de laitance de ciment suite à une mauvaise mise en œuvre du coffrage de poteau……....75
Figure IV-1 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé……78
Figure IV-2 : Dégagement des armatures……79
Figure IV-3 : Projection de béton……80
Figure IV-4: Projection par voie humide……..81
Figure IV-5: Projection par voie sèche……81
Figure IV-6 : Reconstitution de l'enrobage……..84
Figure IV-7 : piquer les parties éclatées……85
Figure IV-8 : Nettoyage des surfaces……...85
Figure IV-9 : Protection des armatures……86
Figure V-10 : Action d'un produit hydrofuge……...88
Figure IV-11 : Application d'inhibiteur……90
Figure IV-12 : Application d'inhibiteur ……...90

Figure IV-13 : Application de la finition …….93
Figure IV-14 : Traitement en cours……...97
Figure IV-15 : Application de la pâte sur le treillis…….....98
Figure IV-16 : Mise en place du treillis anodique……..…..99
Figure V-1 : présentation de l'ouvrage……...101
Figure V-2 : présentation de l'ouvrage……...102
Figure V-3 : Caractéristique géométrique du bâtiment……..102
Figure V-4 : vue générale du bâtiment…….…..103
Figure V-5 : La partie dégradée de l'escalier ……103
Figure V-6 : présence de la corrosion des armatures dans les escaliers…….....104
Figure V-7 : éclatement du béton…….…..105
Figure V-8 : corrosion des armatures des escaliers…..……...……106
Figure V-9 : éclatement de béton d'enrobage…….……..…...107
Figure V-10 : présence de fissuration dans les escaliers …….……..…..107
Figure V-11 : Solution de phénolphtaléine……..…..109
Figure V-12 : Test de la carbonatation…….…...109

SOMMAIRE

DEDICACE

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DES ILLUSTRATIONS, TABLEAUX ET GRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La problématique ……...3

Introduction…….……3

I.1.Généralité sur le béton arme…….……..3

I.1.1. Historique……..3

I.1.2. Le béton…….……..4

I.1.3. L'acier…….……6

I.1.4. Définition du béton armé…….…….....7

I.1.5. Les pathologies du béton armé : causes et conséquences…….……8

I.1.5.1. Les causes physiques de dégradation …….……...8

I.1.5.2. Les causes chimiques de dégradation …….……..8

I.1.5.3. Les autres causes de dégradation du béton…….....……9

I.2. Généralité sur la corrosion……10

I.2.1. Définition……...……10

I.2.2. les type de corrosion …….……10

I.2.3.Les ouvrages concernés par la corrosion des armatures ……..……13

I.3. La corrosion des aciers dans le béton …….……...19

I.3.1. Présentation générale…….…….……19

I.3.2. Processus de la corrosion …….…….……20

I.3.3.Principales causes de corrosion …….……...22

I.3.3.1. Rôle du béton …….……..22

I.3.3.2. Etat de l'acier dans le béton ……..…….....23

I.3.3.3. La dépassivation des armatures……....…….....23

I.3.3.4. Amorçage et propagation de la corrosion ……28

I.3.4.Différents types de transport des agents agressifs dans le béton……..30
I.3.4.1.L'absorption capillaire…….…….…….……30
I.3.4.2.La pénétration par perméation …….…….…….30
I.3.4.3.La migration des ions sous l'influence d'un champ électrique…….....31
I.3.5. Facteur influents de la corrosion ……..…….…….……...31
I.3.6. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures...…….35
I.3.6.1. L'aspect du parement de l'ouvrage…….……....35
I.3.6.2. La sécurité vis-à-vis des usagers ……36
I.3.6.3. La stabilité de l'ouvrage ……..…….……...36

CHAPITRE II

CARACTERISATION, DIAGNOSTIC

II.1. Introduction, objectifs du diagnostic…….…….……...37
II.1.1. Place du diagnostic…….37
II.1.2. Diagnostic de la corrosion des armatures……..37
II.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion ……38
II.2. Les principales étapes d'un diagnostic……..38
II.2.1. Visite préliminaire ……38
II.2.2. Collecte des documents……..39
II.2.3. Préparation de l'intervention……..40
II.2.4. Inspection détaillée ……...40
II.2.4.1. Préparation de l'inspection……...40
II.2.4.2. Inspection……40
II.2.5. Essai en laboratoire ……40
II.2.6. Traitement des résultats……..41
II.2.7. Commentaires et avis de réparation……41
II.2.8. Investigation in situ……....41
II.2.8.1. Mesures relatives aux armatures…….....41
II.2.8.1.1. Mesure de l'enrobage des armatures…….....41
II.2.8.1.2. Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion : mesures de potentiel…….…….……45
II.2.8.1.3. L'auscultation sonique …….……47
II.2.8.1.4. Scléromètre…….…….……..49
II.2.8.2. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement…….....49

II.2.8.2.1. Détermination de la profondeur de carbonatation……49
II.2.8.2.2. Mesures de résistivité……...51
II.2.8.2.3.Mesures de perméabilité……52
II.2.8.2.4. Cohésion superficielle……...52
II.2.9. Analyses et essais de laboratoire ……..……..52
II.2.9.1. Carottage d'éléments en béton armé ……...52
II.2.9.2. Prélèvements d'aciers ……54
II.2.10. Rapport de diagnostic……...54
Conclusion ……..55

CHAPITRE III

ETUDES STATISTIQUES DES CAS DE CORROSION DANS LA REGION DE MEDEA

III.1. Introduction……..……..……..……..……..56
III.2. Codification……..……..……..……..……..56
III.3. Données et résultats obtenus……..……..……..……....57
III.3.1. Les facteurs d'influence sur les ouvrages à usage d'habitation……57
III.3.2. Les facteurs d'influences sur les ouvrages d'équipement……61
III.3.3. Les facteurs d'influences sur les ouvrages d'art (Les Ponts) ……...67
III.4. Les désordres induits par les différents facteurs……..……71
Conclusion……..……..……..……..……..……77

CHAPITRE IV

REPARATION ET PROTECTION

IV.1. Réparation d'un ouvrage en béton armé……..……..……78
IV.1.1. Le ragréage……..……..……..……..……....78
IV.1.2. Le béton projeté……..……..……..……..80
IV.1.2.1. Technique de projection……..……..……..80
IV.1.2.2. Choix et Principe de projection……..……..……81
IV.1.3. Tissus de fibres de carbone……..……..……..……....82
IV.2. Protection des ouvrages en béton arme……..……..……....83
VI.2.1. Reconstitution de l'enrobage……..……..……...83
IV.2.1.1. Principes et définitions……..……..……83
IV.2.1.2. Elimination des zones dégradées……..……..……..84
IV.2.1.3. Remplacement des armatures……..……..……...86

IV.2.1.4. Protection des armatures……...86
IV.2.1.5. Etape de la réfection des bétons……...86
IV.2.2. Imprégnation……87
IV.2.2.1. Principes et définitions……87
IV.2.2.2. Classification des produits hydrofuges……..88
IV.2.2.3. Procédure de choix et d'application……..88
IV.2.2.4. Diagnostic……88
IV.2.2.5. Choix du produit et essai préliminaires……89
IV.2.2.6. Procédure d'application……89
IV.2.3. Inhibiteur de corrosion……...89
IV.2.3.1. Principes et définitions……89
IV.2.3.2. Etat de l'art……..91
IV.2.3.3. Domaine et limites d'emploi……91
IV.2.3.4. Procédure d'application……92
IV.2.4. Le revêtement imperméabilisant……92
IV.2.4.1. Principes. Définitions. Etat de l'art……..92
IV.2.4.2. Les peinture……93
IV.2.4.3. Les lasures……...94
IV.2.4.4. Les revêtements minces……... 94
IV.2.4.5. Les enduits de façade……... 94
IV.2.5. La déchloruration……...94
IV.2.5.1. Définition……94
IV.2.5.2.Principes……..95
IV.2.5.3. Techniques de déchloruration……...95
IV.2.6. La ré-alcalinisation……96
IV.2.6.1. Principes. Définitions……..96
IV.2.6.2. Techniques de ré-alcalinisation……...97
IV.2.7. La protection cathodique……....98
IV.2.7.1. Principes. Définitions……..98
IV.2.7.2. Techniques de La protection cathodique……...99
Conclusion……100

CHAPITRE V

EXEMPLE D'ETUDE ET REPARATION D'UN CAS PATHOLOGIQUE

Introduction……101
V.1.Description de l'ouvrage……...101
V.2.Caractéristique géométrique de l'ouvrage……..102
V.3.Description des désordres observés sur le balcon……...103
V.3.1.L'épaufrure……104
V.3.2.Corrosion des aciers d'armature……..105
V.3.3.Détérioration du béton d'enrobage……...106
V.3.4.Fissuration multidirectionnelle du béton……107
V.4.Elimination des désordres……108
V.4.1.Analyse des désordres……108
V.4.1.1.Le phénomène de carbonatation (Le test phénolphtaléine) ……...108
V.4.1.2.Test de contrôle……....109
V.5. Réparation des désordres……...110
Conclusion……111

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine.

Bien conçu et mis en œuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone etc. La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et formation de rouille, dont le volume, aux moins deux supérieur à celui du fer initial, entraînera des fissurations du béton qui accélèreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de protection ou de réparation. Celles-ci agissent directement au niveau de l'acier (revêtements organiques ou métalliques des armatures, inhibiteurs de corrosion, protection cathodique) ou au niveau du béton, soit en empêchant la pénétration d'éléments agressifs (revêtement du béton par des peintures spéciales), soit en réhabilitant la qualité du béton (changement des parements, déchloruration, ré-alcalinisation).

Des études faites à travers le monde montrent que la corrosion des armatures est responsable de la dégradation de 75% des ouvrages en béton armé et absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des

ouvrages de génie civil; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris très au sérieux. Que de nombreux ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures exigent de nouvelles interventions peu de temps seulement après qu'ils aient été réparés pour la même raison a attiré notre attention et nous a amené à penser que la corrosion qui fait tant de mal à nos ouvrages en béton armé n'est pas traitée avec tout le sérieux qui doit lui être dû. Cela peut résulter du fait que beaucoup d'ingénieurs et de techniciens ne procèdent pas au préalable à des investigations sérieuses pour évaluer l'ampleur des dégâts dans la structure avant d'engager des travaux de réparation, soit par leur méconnaissance du phénomène de la corrosion et de la démarche à suivre pour résoudre les problèmes de corrosion, soit alors qu'ils ne se fient uniquement qu'à l'apparition des dégradations visuelles sur l'ouvrage telles que : les tâches de rouille, les infiltrations d'eau, l'éclatement du béton, les fissures...Les conséquences qui en découlent sont : la non détection des dégradations cachées qui vont se propager avec le temps, le risque de baser les travaux sur un concept erroné, la mauvaise évaluation du coût des réparations.

Pour cela, notre travail de recherche réalisé au cours de la préparation de ce mémoire est présenté en cinq parties :

La première partie est consacré à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et des définitions sur le béton armé et ses constituants et généralités sur la corrosion et leurs processus et finalement on parle aussi à des désordres affectant le béton armé et sa durabilité.

La deuxième partie décrit le diagnostic d'une structure existante en béton armé, les étapes d'un diagnostic in situ et en laboratoire et finalement un rapport de diagnostic.

La troisième partie concerne l'étude statistique des cas de corrosion des structures existantes en béton armé dans la région de Médéa.

La quatrième partie décrit les techniques de réparations des désordres et finalement la protection des structures en béton armé.

La cinquième partie concerne un exemple d'étude et réparation d'un cas pathologique.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

La problématique

Aujourd'hui, le parc structurel en acier et en béton armé représente la grande majorité des ouvrages d'art et des bâtiments. La corrosion des aciers dans le béton est une des premières conséquences liées aux problèmes environnementaux à l'origine de la pathologie du béton.

De plus en plus, les maîtres d'ouvrage doivent répondre à une demande de la part des utilisateurs en matière de sécurité. La préoccupation des maîtres d'ouvrage est donc la connaissance de l'état des ouvrages de leur parc ainsi que de leur suivi afin de permettre leur maintenance et leur pérennité dans le temps. Le but est non seulement d'évaluer d'un point de vue non destructif les ouvrages mais également de prévoir les évolutions afin, soit de permettre une amélioration, soit d'en valider l'état pour plus de sérénité. Tous les dispositifs déjà mis en œuvre sont limités d'une part par l'accès au cœur du matériau, d'autre part par la technicité employée. Les dispositifs à mettre en place dépendent non seulement du matériau à étudier mais également de la pathologie de celui-ci.

C'est pourquoi l'étude des différentes pathologies du béton et de l'acier va permettre de déterminer les dommages causés, de les qualifier et de les quantifier afin d'obtenir un diagnostic propre à chaque pathologie.

Introduction

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion. Afin de bien comprendre le phénomène de corrosion des aciers dans le béton, on définira le matériau béton et la corrosion, et on décrira les mécanismes de corrosion des aciers dans le béton.

I.1. Généralité sur le béton armé

I.1.1. Historique

L'apparition des premiers bétons se situe à la fin du premier quart du XIX^{ème} siècle lorsque la chaux hydraulique, liant utilisé jusqu'alors, est remplacée par le ciment Portland.

C'est vers 1870 que l'on introduit des barres d'acier dans le béton afin de compenser sa faible résistance à la traction, donnant ainsi naissance au béton armé. Ce pendant, ce n'est que vers 1900 que le béton armé remplace peu à peu les structures métalliques dans la construction d'ouvrage de génie civil. Les premières théories des calculs statiques apparaissent 30 ans plus tard et les progrès réalisés au XX^{ème} siècle ont fait du béton armé, le principal matériau de construction utilisé aujourd'hui.

I.1.2. Le Béton

Le béton est un matériau obtenu après malaxage de ciment, d'eau, de granulats (sables, graviers, cailloux...) et éventuellement d'adjuvants dans des proportions bien déterminées et en fonction des caractéristiques voulues. L'ensemble doit être homogène et la pâte résultant des réactions entre le ciment et l'eau est l'élément actif du béton.

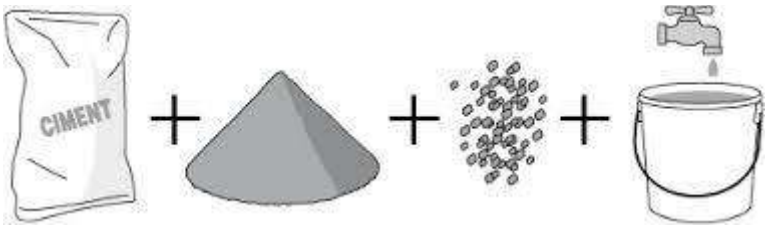


Figure I-1 : Composition du Béton

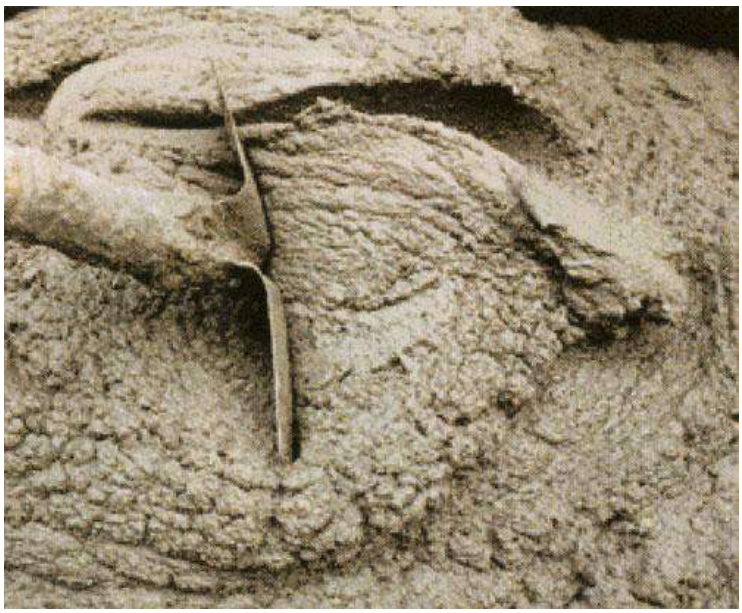


Figure I-2 : Préparation du Béton

Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse (5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination vers 1450°c d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%, est composé de :

- Silicate tricalcique : 3Ca0. Si 0_2 ou C_3S (60-65%)
- Silicate bicalcique : 2Ca0.Si 0_2 ou C_2S (20-25%)
- Aluminate tricalcique : 3Ca0.Al_20_3 ou C_3A (5-10%)
- Ferro-aluminate tétra calcique: 4Ca0.Al_20_3.Al_20_3, Fe_20_3 ou C_4AF (5-10%). [1]

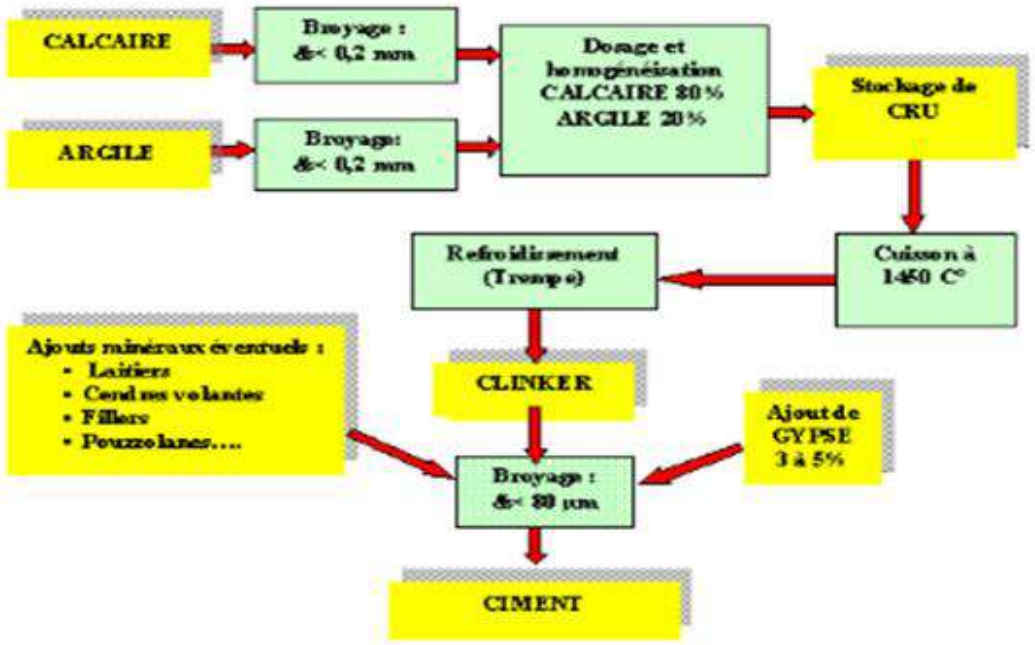


Figure I-3 : Fabrication du ciment [1]

L'eau est avec le ciment l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à la fois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction d'hydratation du ciment et par la suite à la résistance mécanique du béton.

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés ($CaC0_3$, $MgC0_3$, $CaMg\ (CO_3)_2$) ou siliceuses (S_i0_2) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique. [1]

Tableau I-1 : Composition du Granulat

Composé	% en poids
CaO	50
SiO_2	13
Al_2O_3	3
MgO	6
Oxydes de fer	28
Fer libre	Jusqu'à 20
CaO libre	Jusqu'à 10

I.1.3. L'acier

Le béton résiste bien à la compression mais possède une faible résistance à la traction. C'est pourquoi, pour lui conférer une bonne résistance à la traction, on dispose dans la partie tendue des armatures. Les armatures pour béton armé sont généralement des assemblages de barres en acier à caractéristiques de forme, de résistance et de section bien déterminées. On distingue :

- Les ronds lisses ou ronds à béton ;
- Les aciers, haute d'adhérence, qui possèdent des nervures tout le long de la barre, améliorant l'adhérence béton-acier ;
- Les aciers crénelés ;
- Les treillis soudés.



Figure I-4 : L'armature du Béton

Les minerais de base de l'acier sont des oxydes dont :

- L'oxyde magnétique ou magnétite : Fe_30_4
- L'oxyde ferrique anhydre : Fe_20_3
- L'oxyde ferrique hydrate : $2Fe_20_3$, $3H_20$

Les principales étapes conduisant à l'obtention de l'acier sont :

a. Elaboration de la fonte à partir des oxydes. En brûlant les oxydes en présence des carbures, on obtient :
b. l'élimination des oxydes
c. la fonte qui contient entre 2 et 5% de carbone
d. la scorie qui est le résidu du haut fourneau. [3]

La fonte est ensuite affinée pour obtenir soit du fer pur (élimination totale du carbone) soit de l'acier (fer ± 1% de carbone)

La fonte qui sort du haut fourneau contient moins de 94% de fer, 2 à 5% de carbone et le reste sous forme d'autres éléments tels que : silicium, manganèse, phosphore, soufre. [3]

L'adhérence entre l'acier et le béton est nécessaire. Celle-ci est fonction de la forme des armatures, de leur surface, de la rugosité de l'acier et de la résistance du béton. La qualité d'armatures et leur disposition, dictées par la répartition des contraintes, résultent de calculs qui font appel aux lois de comportement des matériaux. Les spécifications concernant les barres sont détaillées dans les normes AFNOR NF A35015 et NF A35016. [1]

Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est bien plus résistant qu'un acier ordinaire mais son coût très élevé fait que, l'acier ordinaire, capable de durer assez long temps pour satisfaire une durée de service déterminée, est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé (BA). [3]

I.1.4. Définition du béton armé

Le béton armé est un matériau composite, constitué de béton et d'acier. Le béton et l'acier sont associés en fonction de leurs qualités et de leurs coûts respectifs. Le béton résiste bien à la compression et mal a la traction. Il est moulable et permet la réalisation de formes complexes. Facile à mettre en œuvre et peu coûteux, le béton résiste assez bien au feu et aux intempéries. Il nécessite peu d'entretien. L'acier, très coûteux, résiste bien a la traction et à la compression. Le béton armé permet de réaliser des constructions monolithiques qui résistent bien aux effets dynamiques et en particulier aux séismes. Le béton armé est parfois trop lourd pour être choisi parmi les matériaux de construction. [4]

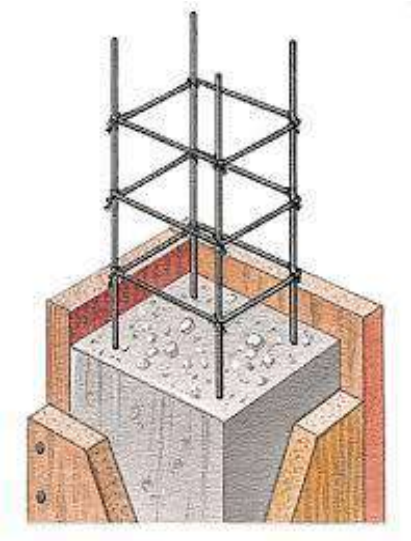


Figure I-5 : Le Béton armé

I.1.5. Les pathologies du béton armé : causes et conséquences

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. [5]

I.1.5.1. Les causes physiques de dégradation

- **Abrasion**

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

- **Erosion**

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.

- **Cavitation**

Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

- **Chocs**

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.

- **Surcharges**

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

- **Le feu**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

- **Cycle gel/ dégel**

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. [22]

I.1.5.2. Les causes chimiques de dégradation

- **Alcali-réaction ou cancer du béton**

Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide .Des gels gonflants apparaissent en développant des micro-faïençages et un éclatement du béton. [6]

- **Réactions sulfatiques**

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'éttringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations. [6]

- **Corrosion**

Attaque des matériaux par les agents chimiques. Sur les métaux, la corrosion est une oxydation. [3]

I.1.5.3. Les autres causes de dégradation des bétons

Nous avons vu que les bétons se dégradaient à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

a. Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface. [7]

b. Mauvaise qualité des bétons employés

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

c. Vibration trop importante

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton. [7]

d. Absence de cure du béton

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface. [8]

e. Cycle humidité / sécheresse

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrasion des aciers.

I.2. Généralité sur la corrosion

I.2.1. Définition

Le terme corrosion vient du latin "corroder" qui signifie ronger, attaquer. La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico- chimiques entre le matériau et son environnent entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriété mécaniques, électriques, optiques, ex thétiques, etc.) EVANS puis WAGNER et TRAUD sont les premiers à avoir défini la corrosion, en présence d'une phase liquide, comme un processus électrochimique. [3]



Figure I-6 : Phénomène de corrosion

I.2.2. Les types de corrosion

Il existe plusieurs types de corrosions :

- **La corrosion uniforme**

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée sur les métaux exposés aux milieux acides.



Figure I-7 : Exemple de corrosion uniforme (généralisé)

- **La corrosion galvanique ou corrosion bimétallique**

Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif, subit une corrosion accélérée provoquée par l'autre métal.



Figure I-8 : Exemple de corrosion galvanisé

- **La corrosion caverneuse**

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

- **La corrosion par piqûres**

Elle est produite par certains anions, notamment les halogénures, et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.



Figure I-9 : Exemple de corrosion par piqûres

- **La corrosion sous contrainte**

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

Dans la plupart des cas (corrosion galvanique, caverneuse, par piqûres, etc.), c'est la formation d'une pile de corrosion qui est à l'origine de la corrosion.

Une pile de corrosion est une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit de manière simplifiée par deux réactions électrochimiques élémentaires simultanées.

Dans la zone anodique, l'acier se dissous :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad (1)$$

Les ions ferreux Fe^{2+} passent dans la solution et peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferriques Fe^{3+}. Dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réaction de l'oxygène dissous dans l'eau (2a) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (2b) :

$$O_2 + 2H_2O \rightarrow 4e^{-} + 4OH^{-} \qquad (2a)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (2b)$$

Les ions hydroxyde OH^- formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions ferreux Fe^{2+} et précipiter en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque les concertations en ions ferreux et hydroxyde le permettent :

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \qquad (3)$$

Les réactions chimiques ci-dessus se produisent parce qu'avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée puisqu'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 CaO, Fe_20_3, $13H_20$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxyde de fer [$Fe(OH)_2$] et de calcium ($Ca(OH)_2$].

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un PH élevé, de l'ordre de 13.

L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits, qui le protègent par passivation. Plus exactement, sous la rouille, une armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium.

Une telle protection disparaît si des agents agressifs s'infiltrent dans le béton et provoquent de nouvelles réactions chimiques qui diminuent le pH du béton. [11]

I.2.3. Les ouvrages concernés par la corrosion des armatures

- **Bâtiment**

Acrotères, et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments verticaux et terrasses, en milieu industriel et maritime. Ce sont bien sur les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisantes.



Figure I-10 : Eclats en formation

- **Bâtiments industriels**

Poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industriels, car supportant par fois les dalles de planchers. Certaines sont parfois dans des états assez surprenants.



Figure I-11 : Poutre support de réservoir

- **Parking**

Poutres et dalles, en milieu ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglasage).el faut savoir que nombre de dalles sont précontraintes, accroissant ainsi le danger de la corrosion.

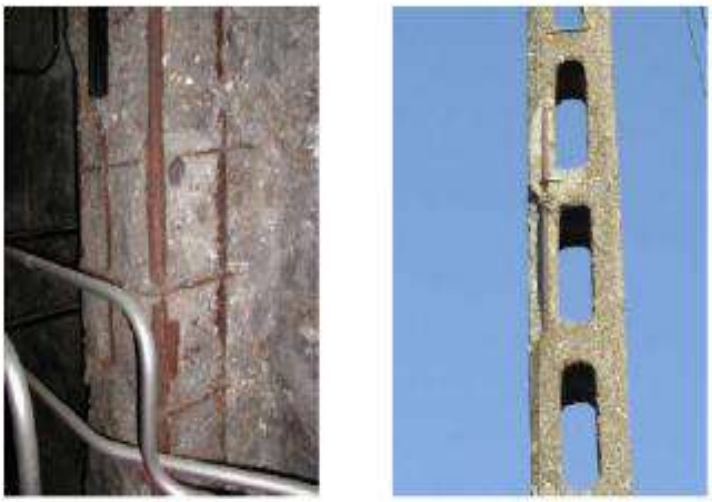


Figure I-12 : Poteau porteur sous garage, Poteau support de ligne électrifiée

- **Composants de structures préfabriquées**

Il ne semble pas des problèmes importants soient à signaler dans cette rubriques, du fait probablement que le béton sont mieux soignés, et mieux mis en œuvre. Toutefois, les poteaux de lignes électriques par exemple semblent être un Object de préoccupation. Il existe également une importante pathologie touchant divers éléments de construction, due à l'utilisation dans les années 60-80 d'accélérateur de prise à base de chlorures de calcium. Cela concerne des panneaux de façade, des acrotères, jardinières, etc.



Figure I-13 : Pont préfabriqué en béton armé

- **Ponts et ouvrages d'art**

Dans cette catégorie d'ouvrages, il apparait que les zones les plus sensible soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier (ou l'influence des sels se déverglaçage est importante.



Figure I-14 : Pile de pont dégradé

- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens)**

Le principal problème de ces structures est lié au problème de fuites d'eau, qui sont dus soit à la présence de fissures (d'origines diverses : thermique, mécanique,…..) ou de défaut d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment), sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.



Figure I-15 : Château

- **Silos**

Les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments….) sont soumis à des fortes contraintes, notamment pendant les périodes chargements. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.

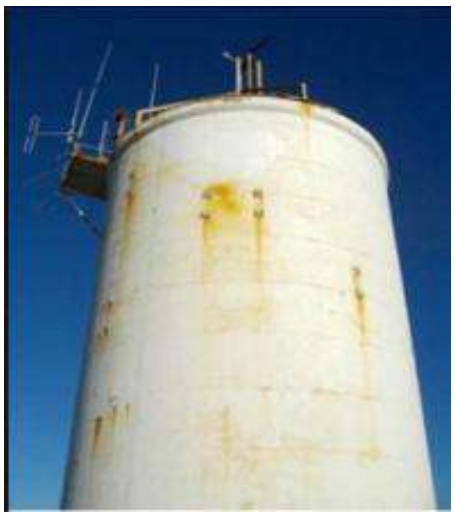


Figure I-16 : Silo dégradé

- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire**

Ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entrainées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.

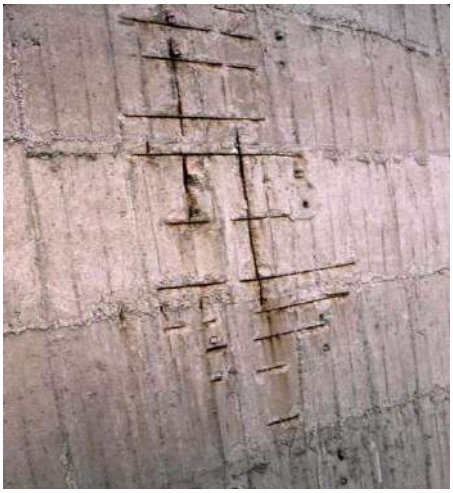


Figure I-17 : Paroi d'aéroréfrigérant dégradé

- **Cheminées**

Les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique). Le fut souffre donc de phénomènes dus à la neutralisation de l'alcalinité du béton, d'une part, et d'attaque sulfurique d'autre part (par formation de gypse). Cette attaque est parfois très profonde, et souvent irrégulière en fonction de la hauteur.



Figure I-18: Cheminée dégradé

- **Structures portuaires**

Celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence.



Figure I-19 : Poutre de tablier dégradé



Figure I-20 : Quai en zone de marnage dégradé

- **Canalisations en béton armé et précontraint**

La plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (carbonatation, présence de chlorures).



Figure I-21 : Tuyau en béton armé dégradé

I.3. LA CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON

I.3.1. Présentation générale

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.



Figure I-22 : Corrosion des armatures

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

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif. [11]

I.3.2. Processus de la corrosion

Les processus fondamentaux de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés sur les figures 23 et 24.

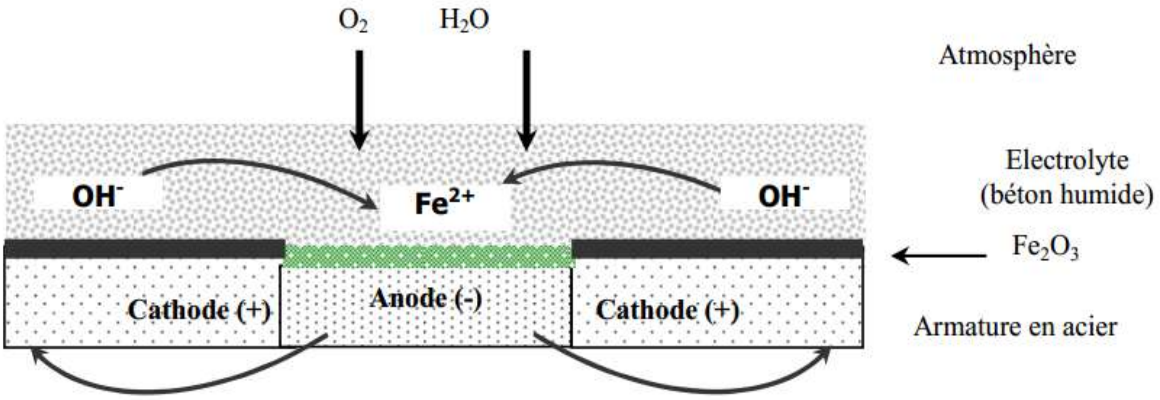


Figure I-23 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton. [11]

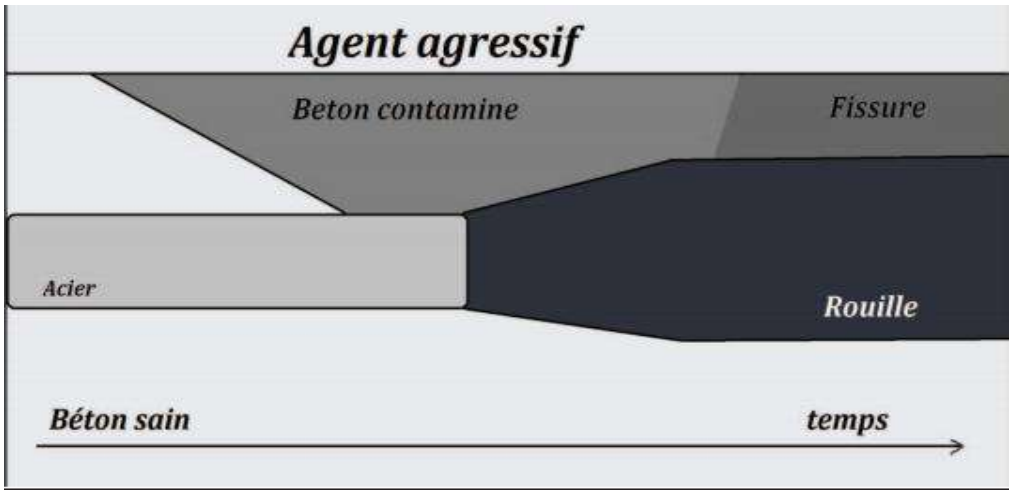


Figure I-24 : Processus de corrosion des armatures. [11]

Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents agressifs. L'agent agressif pénètre dans l'entourage puis déclenche la formation de rouille. Celle-ci se développe et peut fissurer l'enrobage.

L'oxygène qui peut diffuser dans le béton via le réseau poreux, se dissout dans la solution interstitielle et finit par atteindre la surface de l'acier. Sur cette surface, dans la zone catholique, l'oxygène est réduit en ion hydroxyde (OH^-) selon la réaction électronique (2a).

C'est, dans la plupart des cas, la réaction cathodique associée à la corrosion des aciers dans le béton. Cependant, dans le cas d'un béton carbonaté ayant un pH moins élevé (8-9), l'eau peut être réduite en dihydrogène selon la réaction (4) :

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \qquad (4)$$

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

La réaction anodique correspondante est la dissolution de l'acier conformément à la réaction (1). Celle-ci entraîne une diminution de la section de l'acier qui peut finir par rompre.

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

Dans la solution interstitielle du béton, normalement riche en oxygène et possédant un pH élevé, les ions Fe^{2+} peuvent rester sous la forme $Fe(0H)_2$ ou être oxydés en ions Fe^{3+}, qui hydrolysés se trouvent alors sous la forme $Fe(0H)_3$, formant ainsi un mince film passif à la surface de l'acier, ce qui va retarder la dissolution du fer. Dans ce cas, l'acier est bien protégé et il n'y aura pas de dommages détectables dus à la corrosion.

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

La corrosion devient préjudiciable lorsque la vitesse de corrosion de l'acier est très élevée et que les produits de corrosion, ne pouvant être évacués de la zone de corrosion,

s'accumulent à la surface de l'acier. C'est le cas si la solution interstitielle est riche en oxygène et en espèces agressives, et si l'enrobage de béton n'est pas assez humide. Une partie des ions Fe^{2+} dissous peuvent alors s'oxyder et être transformés en oxydes ferriques hydratés (Fe_20_3, H_20) qui se déposent ensuite, avec des oxydes et hydroxydes ferreux, à l'interface acier béton. Le volume des produits de corrosion étant 2 à 6 fois supérieur à celui du métal, une contrainte d'expansion se crée à cette interface plus acier est corrodé, plus cette contrainte est importante, et lorsque celle-ci devient plus importante que la résistance à la traction de l'enrobage, des fissures apparaissent. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait les processus de corrosion. Un processus corrosion ? Fissures ? Pénétration d'espèces agressives ? Plus de corrosion ? Plus de fissures ? Plus d'espèces agressives ... s'instaure.

Selon TUUTI, l'évolution de la corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux étapes :

- Au départ, l'acier est stabilisé par la couche de passivation qui empêche la formation de rouille supplémentaire. Puis, durant la phase d'amorçage (incubation), les espèces néfastes vis-à-vis de la corrosion pénètrent dans le béton et l'acier se dépassive alors progressivement. Cette dépassivation peut être engendrée par de nombreux facteurs dont la carbonatation et la pénétration des ions chlorure.
- Les oxydes et hydroxydes produits par des réactions d'oxydation à la surface du métal s'accumulent. La formation de ces produits d'oxydation va alors entraîner un gonflement qui finira par provoquer la fissuration de l'enrobage de béton.

En pratique, il doit être fait en sorte que la période d'amorçage (incubation) soit la plus longue possible. Pour cela, il faut prévoir des épaisseurs d'enrobage suffisantes et choisir une formulation de béton permettant de diminuer sa perméabilité à l'eau et aux gaz. [3]

I.3.3. Principales causes de corrosion

La corrosion de l'acier dans le béton ne peut se produire que lorsque certaines conditions physico-chimiques sont réunies. L'existence de conditions particulières conduit au démarrage d'un processus électrochimique qui tend à dissoudre localement le fer métallique afin de former des produits plus stables (oxydes, oxyhydroxydes...).

I.3.3.1. Rôle du béton

Le béton protège l'acier de la corrosion du fait d'une part de la forte alcalinité (pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13) de sa solution interstitielle et d'autre part, de son rôle de barrière contre la pénétration d'agents agressifs. Pour comprendre l'influence du milieu sur la corrosion des armatures, il est nécessaire de connaître la composition de la solution

interstitielle au voisinage de l'acier dont dépendent les processus électrochimiques dépendent. Le béton enrobant l'acier est un matériau poreux constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse.

La phase solide est constituée de granulats et de la pâte de ciment. Les granulats inactifs en général sur la corrosion des armatures peuvent, par leur présence, ralentir la pénétration d'agents agressifs [26]. Toutefois la présence de liquides dans leurs pores peut influer sur la cinétique de corrosion. La pâte de ciment poreuse, composée de silicates de calcium hydraté C-S-H (50 à 70% du volume), de portlandite Ca(OH)2 et ettringite joue un rôle important parce que la pénétration des agents agressifs se fait par les pores.

La phase liquide, d'après les travaux de Powers et al, se présente sous quatre formes : l'eau liée chimiquement, l'eau adsorbée à la surface des C-S-H, l'eau interfeuillet et l'eau contenue dans les pores capillaires [27]. La solution des pores est thermodynamiquement en équilibre avec la phase solide et fortement chargée en ions. Lorsque des agents extérieurs pénètrent, la solution change et a des effets sur la matrice cimentaire.

La phase gazeuse est contenue dans la porosité. C'est l'air contenu dans la porosité connectée qui favorise la pénétration des agents agressifs vers les aciers. Cette pénétration s'accompagne de l'acidité de la solution et de la dépassivation de l'acier.

I.3.3.2. Etat de l'acier dans le béton

L'acier est un alliage passivable c'est-à-dire capable de former une couche protectrice, dense, étanche et isolante électriquement, qui s'oppose au passage de ses ions métalliques vers l'électrolyte. Cette passivation est fonction du pouvoir oxydant de l'électrolyte et de la morphologie de la couche formée.

Les propriétés oxydantes de la solution entraînent une réaction entre la barre de fer et la solution électrolytique qui conduit à la croissance initiale d'adsorbats hydroxylés en surface du métal. Ensuite, il se forme une couche oxydée continue non poreuse qui constitue une phase homogène nouvelle. L'acier se trouve en principe à l'état d'oxydes, de sulfates et de carbonates. L'acier est recouvert d'une couche passive, une couche d'oxydes, qui le protègent des agressions extérieures. Dès lors que le milieu environnant change, la stabilité de l'ensemble béton/acier est « modifiée ». La couche passive disparaît et la corrosion peut s'amorcer.

I.3.3.3. La dépassivation des armatures

Si un acier est préalablement recouvert de produits passivants (cas du béton sain), cette protection est altérée le plus souvent par l'introduction de deux agents pouvant se présenter

simultanément : le dioxyde de carbone $C0_2$ (carbonatation) et l'ion chlorure Cl^- (chloruration) en excès au niveau des armatures. Il se produit alors une dépassivation.

Les deux phénomènes de carbonatation et de chloruration interagissent entre eux puisque la carbonatation, en changeant la structure du réseau poreux, peut affecter la diffusion des chlorures au sein du béton. En effet, après carbonatation, il a été observé une réduction de la porosité totale et une redistribution de la taille des pores, rendant plus difficile la pénétration des chlorures.

Le mécanisme de dépassivation comprend les étapes suivantes :

- la couche passivante est détruite localement là où la teneur en chlorure ou en dioxyde de carbone est très forte ;
- de la rouille se forme là où la passivation a disparu ;
- la rouille se transforme en des oxydes (ou hydroxydes) poreux si la teneur en oxygène est assez élevée. [11]

Lorsque le pH du béton est inférieur à environ 9, les teneurs critiques en chlorures et en carbonates provoquant la dépassivation de l'acier sont très faibles et correspondent à des eaux naturelles, potables. C'est pourquoi, en pratique, ce PH est souvent considéré comme étant la valeur critique de dépassivation des aciers.

- **Dépassivation par carbonatation du béton**

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone de l'air et certains constituants du béton tel que le ciment. Le dioxyde de carbone gazeux pénètre par diffusion dans le réseau poreux du béton et réagit avec la portlandite $Ca(OH)_2$ pour former des carbonates tel que le calcite $CaCO_3$, ce qui provoque un abaissement du pH a 9 environ, suivant la réaction suivante en milieu aqueux :

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (5)$$

En présence de bases alcalines, telles que Na0H ou K0H, la solubilité de la chaux est relativement faible et la réaction peut se ralentir. Cependant ces bases alcalines se carbonatent elles aussi

$$CO_2 + 2XOH \rightarrow X_2CO_3 + H_2O \qquad (6)$$

Avec X= Na ou K

La carbonatation des bases alcalines augmente la solubilité de la chaux qui peut alors se carbonater en plus grande quantité :

$$X_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2XOH \qquad (7)$$

Avec X = Na ou K

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes.

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80%, 60% étant considéré comme la valeur la plus critique. Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO_2, alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de CO_2 est considérablement ralentie.

De très fortes teneurs, dans un béton, en cendres volantes (>30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement sa vitesse de carbonatation.

La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau.

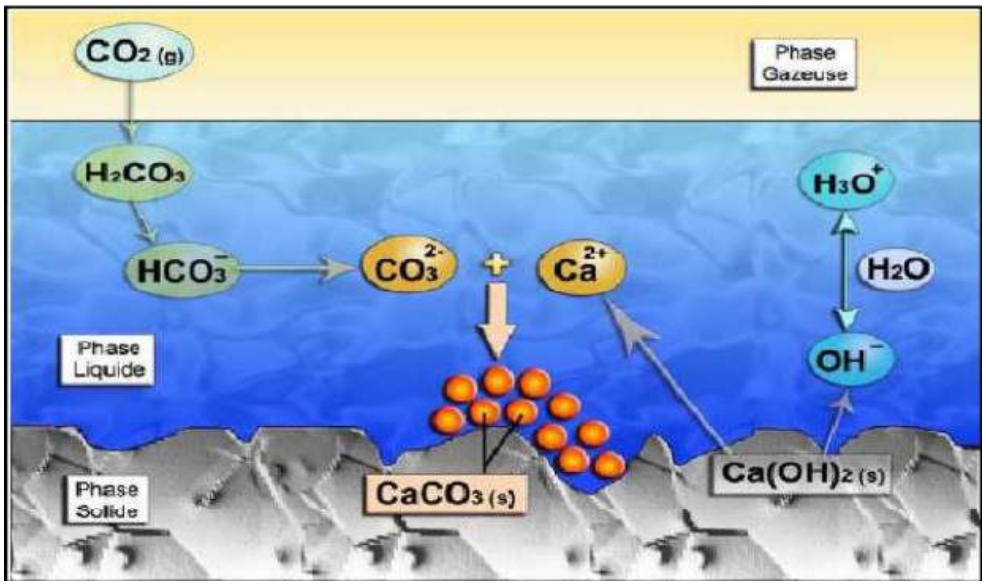


Figure I-25 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite [41]

- **Dépassivation par l'attaque des chlorures**

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé.

Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve

fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique.

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

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

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

La concentration en hydroxydes dans la solution interstitielle agit de façon significative sur la proportion des chlorures liés : plus la concentration en hydroxydes est élevée, moins il y aura de chlorures dans la solution. Une élévation de température, quant à elle, diminue la capacité de chlorures à se lier. Typiquement, 40 à 50% des chlorures totaux sont liés.
Seuls les chlorures libres participent à la corrosion des armatures.

Les chlorures ayant atteint l'armature attaquent l'acier initialement passivé, en certains points localisés. Le film passif est alors détruit localement et laisse apparaître des zones anodiques où l'acier est dissout. Le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques. La surface des zones cathodiques étant bien plus importante que celle des zones anodiques, la dissolution de l'acier croit en profondeur plutôt qu'en surface de l'acier formant ainsi des piqûres ou des cavernes. Le mécanisme de ce type de corrosion est complexe car la composition de la solution à l'intérieur de la piqûre est modifiée par rapport à celle de la solution interstitielle qui l'entoure.

Au sein de la piqûre, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique.

$$Fe^{2+} + Cl^- + H_2O \rightarrow FeOH^+ + H^+Cl^- \qquad (8)$$

$$H^+Cl^- \rightarrow H^+ + Cl^- \qquad (9)$$

Ces réactions acidifient la solution dans la piqûre, abaissant fortement le pH entre 3,8 et 5. Les ions chlorures régénérés continuent d'être actifs pendant tout le processus de corrosion qui est ainsi autocatalyse.

Les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton se combinent alors avec les ions ferreux Fe^{2+} ayant diffusé hors de la piqûre tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure.

Tant que la solution à l'intérieur de la piqûre est acide, la dissolution de l'acier reste active et les piqûres croissent en profondeur. Ce mécanisme est schématisé (Figure I-26) par le modèle de PAGE et al. Les piqûres continuent de croître si la concentration locale en ions chlorure est suffisante (la concentration des chlorures doit augmenter tandis que celle des ions hydroxyde doit diminuer). Si ce n'est pas le cas, la repassivation de l'acier est possible.

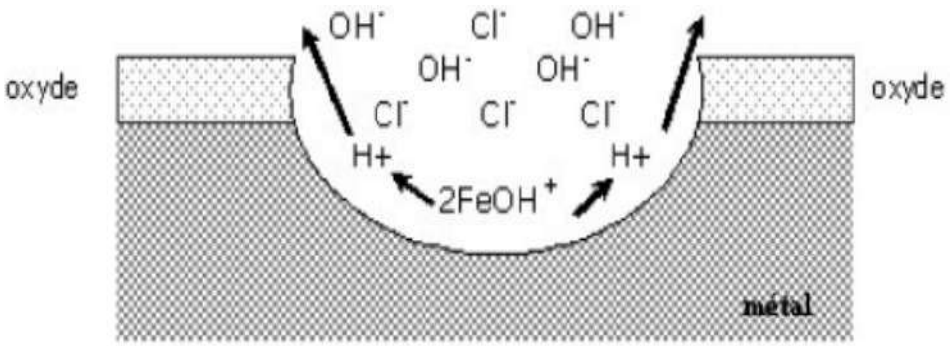


Figure I-26 : Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure [40]

Ainsi, une trop faible concentration en ions chlorure dans la solution interstitielle ne détruira pas le film passif. Il existe donc une teneur critique en ions chlorure ou un rapport en concentration chlorures/hydroxydes noté $[Cl^-]$ / $[OH^-]$. Dès que le rapport $[Cl^-]$ / $[OH^-]$ dépasse le seuil critique égal à 1, la solution est instable : elle devient plus acide. Cette instabilité correspond à la formation de produits de corrosion qui, en présence d'oxygène ne protègent pas l'acier. Mais lorsque ce rapport est inférieur à 1, les chlorures n'ont pas d'effet sur cette solution qui reste donc stable.

Sur le plan pratique, les paramètres qui peuvent influer sur cette teneur critique en chlorure sont : le dosage en ciment (et le rapport Eau/Ciment), la valeur du pH, la nature du ciment (fixation de chlorure, etc.) et celle des additifs éventuels (cendres, etc.), la température moyenne, la teneur en oxygène et l'humidité du béton. L'état d'enrouillement initial des armatures a également un effet sur la valeur de la teneur critique en chlorure.

Le seuil critique est considéré atteint s'il y a 0,2 à 0,4% d'ions chlorure par rapport à la masse du ciment.

Il est à noter que la teneur en chlorure qui amorce une corrosion n'est pas reliée à la vitesse de corrosion des armatures, une fois dépassivées.

I.3.3.4. Amorçage et propagation de la corrosion

La corrosion des armatures dans le béton est décrite par le modèle phénoménologique de Tuutti [25]. Il considère que la corrosion des armatures est divisée en deux phases : une phase d'incubation et une phase de propagation. (Figure I-27)

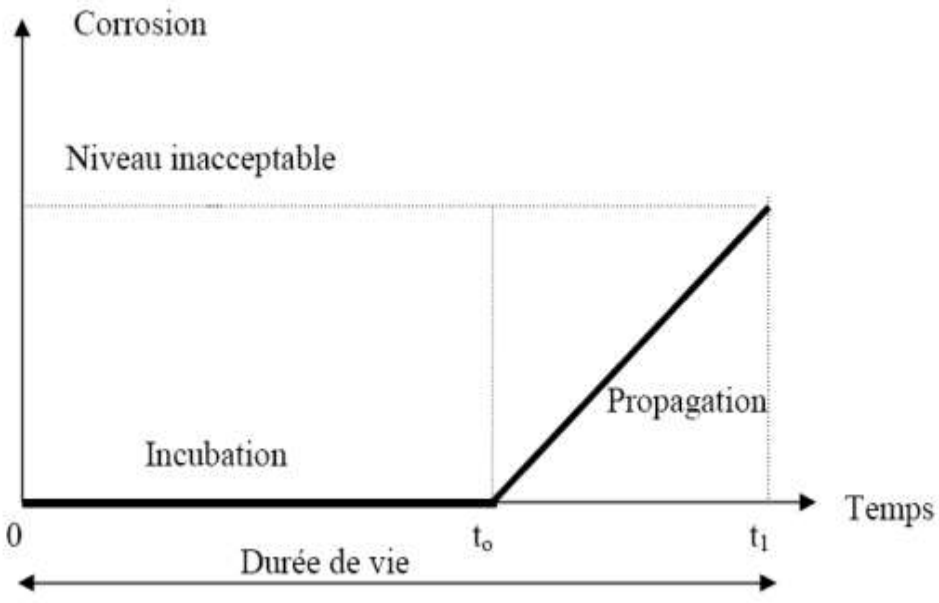


Figure I-27: Modèle de K.Tuutti [25]

La phase d'incubation correspond à une période pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage jusqu'à l'armature.

Quand les agents agressifs atteignent le niveau critique qui va provoquer la dépassivation de l'acier, la corrosion s'amorce puis se développe à une vitesse qui dépend de la température, de la présence d'oxygène et de la conductibilité électrique du béton [38].

Le temps t_0 correspond au passage de la phase d'incubation à la phase de propagation.

- **Corrosion généralisée**

Dans le cas de la corrosion de l'armature par carbonatation du béton, on considère que l'amorçage de la corrosion commence dès que le front de carbonatation atteint les armatures à t_0, correspondant au commencement du processus de dépassivation. Pour accélérer ou retarder l'amorçage, il faut intervenir sur l'épaisseur du béton d'enrobage. En comparant les profondeurs de pénétration des agents agressifs et l'épaisseur du béton d'enrobage, on peut estimer si la corrosion est amorcée.

Dès lors que l'amorçage de la corrosion a eu lieu, si les conditions environnementales ne sont pas modifiées, la propagation ne peut pas être interrompue.

- **Corrosion localisée par piqûres**

➢ **Les ions chlorures Cl :**

pénètrent dans le béton et provoquent, à partir d'une certaine concentration dans la solution des pores, au niveau des armatures, la destruction locale du film de passivation et l'initiation d'une corrosion localisée. Les ions chlorures s'introduisent dans la couche passive en remplaçant l'oxygène et en augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique. Ils sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier laissant subsister quelques imperfections dans la couche passive qui facilite l'incorporation des ions chlore. La dégradation de la couche passive est un phénomène local conduisant à une corrosion par piqûre. Des études menées par le Building Research Establishment ont établi des teneurs en chlorures critiques ou valeur limite. La valeur limite de la teneur en chlorures de 0,4% par masse de ciment est utilisée pour la prédiction de vie des bétons [28]. On ne considère que la quantité de chlorures libres nécessaires pour détruire la couche de passivation dépend de la quantité de portlandite présente. Toutefois il s'avère que le dépassement des seuils critiques définis ne constitue pas toujours une condition suffisante pour amorcer la corrosion. La qualité de l'interface entre l'armature et le béton peut également être déterminante [29]

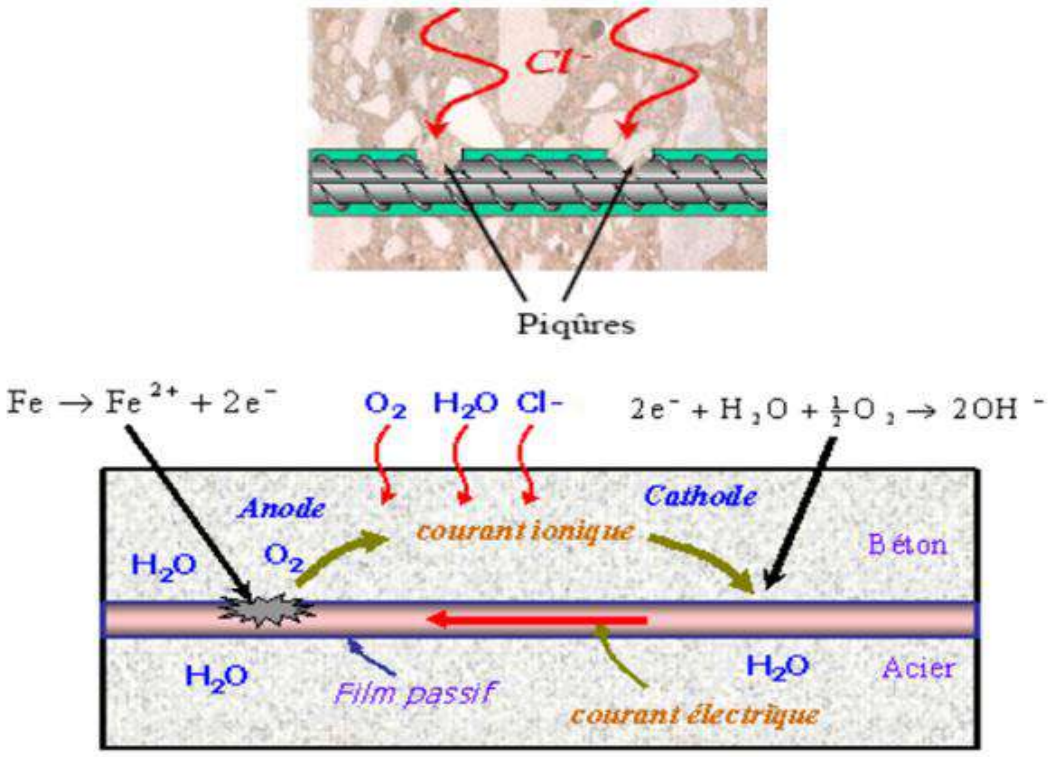


Figure I-28 : Attaque de l'acier par les ions chlorure [29]

I.3.4. Différents types de transport des agents agressifs dans le béton

Le béton est un matériau poreux et un milieu d'échanges permanent avec l'environnement : gaz, eau liquide contenant des gaz dissous (oxygène, gaz carbonique) ou des sels.

Plusieurs mécanismes fondamentaux décrivent les mouvements au sein de la microstructure du béton : l'absorption capillaire, la pénétration par perméation, le phénomène de diffusion, mais aussi la migration d'ions sous l'influence d'un champ électrique.

I.3.4.1. L'absorption capillaire

L'origine de ce phénomène est la tension superficielle entre l'eau interstitielle et les cristaux de la pâte de ciment durcie. Il se rencontre essentiellement lorsqu'on est en présence de béton non saturé soumis au contact de l'eau. Lorsque les bétons en milieu marin ou en zone de marnage sont soumis à des alternances de périodes sèches et humides, la pénétration des chlorures est accélérée.

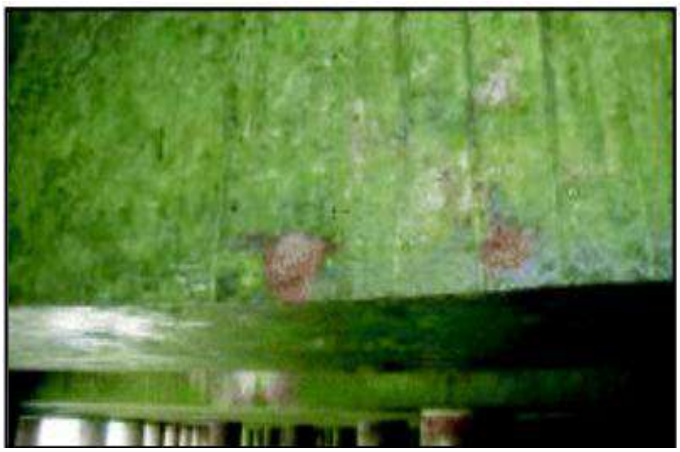


Figure I-29 : Béton soumis à l'alternance de périodes sèches et humides -Traces de rouille

I.3.4.2. La pénétration par perméation

Ce phénomène est induit par des flux de liquides ou de gaz (la perméabilité) sous gradient de pression.

- **Le processus de diffusion**

Ce processus est essentiel dans la propagation de la corrosion. La diffusion des ions dissous concerne principalement les ions chlorures. Elle est causée par un gradient de concentration en ions chlorures dans la solution interstitielle et ne peut avoir lieu que si le béton présente une phase liquide continue. De plus, la diffusion n'est possible que pour un béton parfaitement saturé et dont la capacité de liaison en chlorures est

épuisée. Le transport des ions se fait des régions de forte concentration vers les régions à concentration plus faible.

I.3.4.3. La migration des ions sous l'influence d'un champ électrique

Le déplacement d'ions sous l'influence d'un champ électrique est utilisé pour ré alcaliniser ou déchlorurer le béton. La vitesse de déplacement des ions dépend de l'intensité du champ électrique.

Elle est aussi utilisée pour mesurer le coefficient de diffusion des chlorures dans le béton, paramètre qui constitue un indicateur de durabilité.

I.3.5. Facteurs influents de la corrosion

La tenue, face à la corrosion des armatures dans le béton est fonction des paramètres concernant l'acier et le béton ainsi que des propriétés existantes à leur interface. Cela est déterminé par la composition de la solution interstitielle du béton et des caractéristiques métallurgiques de l'acier. Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent affecter directement le processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosive.

Lorsqu'ils atteignent les armatures, les ions chlorure et le dioxyde de carbone sont tenus pour responsables de la plupart des cas de corrosion des structures en béton armé. La température et l'humidité, tout comme les autres facteurs pouvant détériorer le béton, jouent aussi un rôle important dans la corrosion des armatures.

La corrosion de l'acier n'est donc pas dépendante d'un unique paramètre mais de plusieurs dont les interactions concourent ou non à la corrosion.

- **Influence de l'enrobage**

L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature. Parfois, la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures. [6]

- **Influence de la température**

D'après Liu et Weyers, une augmentation de la température accroît la vitesse de corrosion [30]. Ce phénomène peut s'expliquer d'une part par le fait que les processus anodiques (oxydations des composants de l'acier) et cathodiques (réduction des protons en milieu acide) sont activés thermiquement. Il en résulte un courant d'échange c'est-à-dire une vitesse de corrosion augmentant avec la température. Une élévation de 10 à 20°C multiplie par deux la vitesse de corrosion en situation de corrosion active.

Le changement de température dans le béton entraîne le changement d'autres paramètres. Cornell et Schwertmann ont expliqué dans leurs études que la température avait une influence directe sur la nature des oxydes formés dans le béton [31]. L'effet total de la température sur le taux de corrosion dans le béton est très complexe et contrôlé par l'interaction de plusieurs autres facteurs. L'élévation de température augmente la vitesse de la réaction mais peut également agir sur un autre facteur de corrosion. Par exemple, l'abaissement de solubilité de l'oxygène dans l'eau, lorsque la température augmente, est un cas où la corrosion se ralentit par manque d'oxygène.

D'autre part, en milieu aéré, une élévation de température facilite la diffusion de l'oxygène dans la solution augmentant le courant d'échange.

Le modèle développé montre une relation entre le courant de corrosion et la température de la forme suivante :

$$i_1 = i_2 . e^{2283}(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})$$

Lorsque l'on plonge une éprouvette en béton armé dans un bain à différentes températures, on constate que le courant circulant dans le système électrode/ électrolyte change.

La densité de courant de corrosion passe de 1µA/cm2 à 5µA/cm2 lorsque la température s'élève de 5°C à 40°C.

- **Influence de la composition du béton**

Tout ce qui conditionne la solution interstitielle et la porosité du béton est un facteur pouvant affecter ou non la corrosion. Le type et la teneur en liant, les additions minérales et le rapport E/C (Eau/ciment) déterminent la performance d'un béton. Le choix de la formulation du béton et de la nature de ses principaux constituants constitue une approche pour augmenter la résistance à la corrosion du béton. Toutes modifications de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité ont généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Le rapport E/C a une très grande influence sur la porosité du béton : plus il est important, plus la porosité est grande, facilitant ainsi la pénétration des espèces agressives en particulier le CO_2 puis la corrosion de l'acier. L'influence du rapport E/C est bien plus importante que le type de liant utilisé.

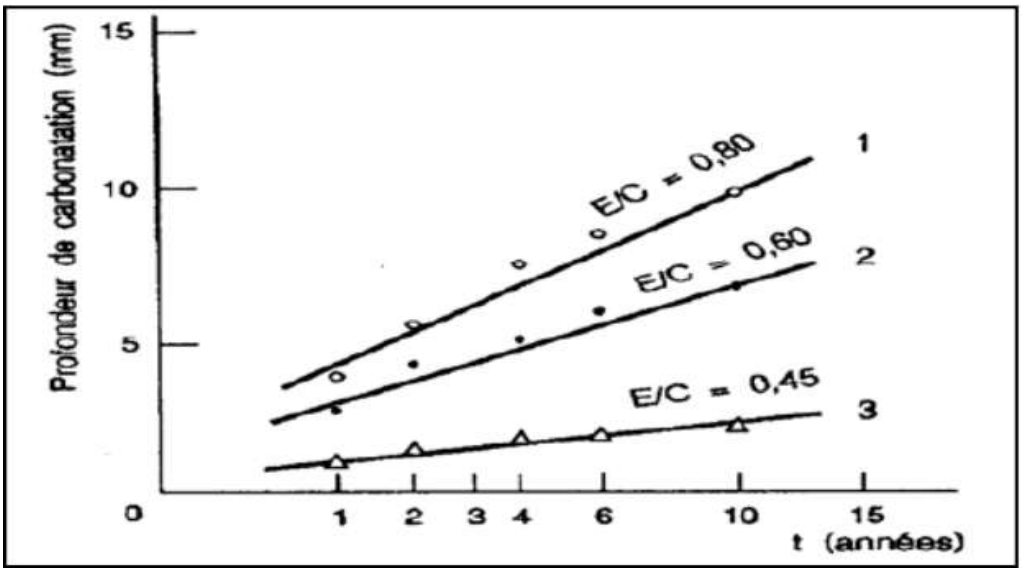


Figure I-30 : évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E /C [39]

Quant aux ajouts minéraux, en faibles quantités, ce sont les cendres volantes et les fumées de silice qui ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton. L'augmentation de la compacité provoquée par les ajouts minéraux, utilisés en quantité suffisante, peut de plus annuler largement les effets néfastes de la diminution du PH interne et de la moins grande quantité d'aluminate tricalcique (C_3A) qui découlent de l'utilisation de ces ajouts. [3]

- **Influence de l'humidité**

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

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton augmente et la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion. Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton n'augmente mais en contrepartie la diffusion de l'oxygène vers les armatures se fait de plus en plus difficilement. L'humidité relative la plus favorable à l'apparition de la corrosion est de 60 à 80%.

La corrosion des aciers, dans le cas des structures ou des parties de structures immergées, ne constitue généralement pas un problème majeur puisque l'oxygène ne parvient que très difficilement à atteindre les armatures. [11]

La figure I-31 montre l'évolution de la corrosion d'un acier en fonction de l'humidité relative pour une atmosphère polluée par 0.01% de CO_2. On constate ici que la corrosion devient importante dès que l'humidité relative atteint 60%.

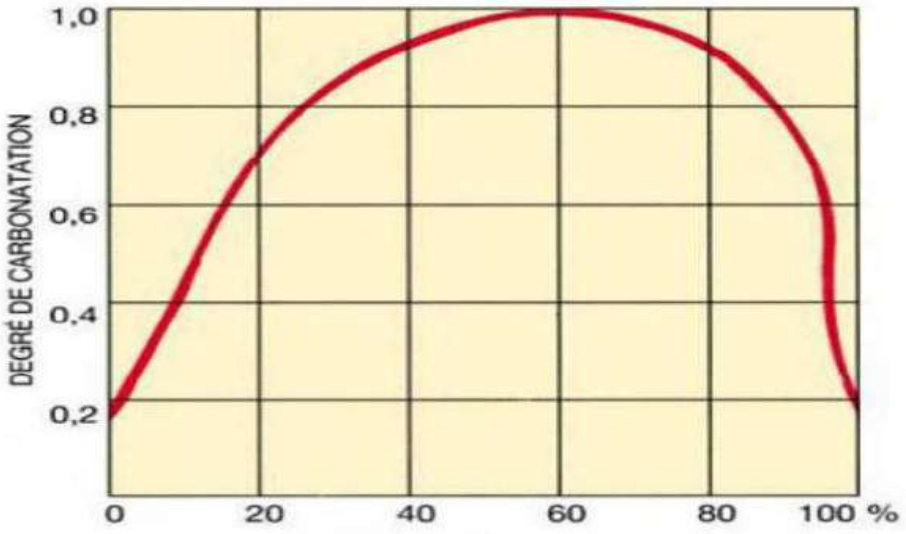


Figure I-31 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [11]

- **Influence de la résistivité du béton**

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

La valeur de la résistivité du béton se situe le plus souvent entre 10^3 et 10^7 ohm/centimètres.

Le tableau I-2 présente la corrélation établie entre la résistivité mesurée du béton et la probabilité de corrosion des armatures.

Tableau I-2 : Probabilité de corrosion en fonction de la valeur de la résistivité [39]

Résistivité du béton (RVL. cm)	Probabilité de corrosion
< 5	Corrosion quasi-certaine
5 – 12	Corrosion probable
> 12	Corrosion improbable

- **Effet de l'oxygène**

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

Plus la teneur en oxygène n'est importante, plus la vitesse de dissolution de l'acier augmente. [3]

- **La concentration en chlorures**

Les ions chlorures conditionnent la solubilité des produits de corrosion et l'existence de dépôts [32]. Leur présence dans le béton armé a une influence sur la corrosion puisque leur présence induit un risque de localisation de la corrosion, notamment par piqûre [33], augmentant le courant de corrosion.

D'une part, une concentration critique est nécessaire pour que la dépassivation des aciers débute, ce taux limite est fonction du ratio entre les ions chlorures et les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle. D'autre part, lorsque la concentration en ions chlorure augmente, la conductivité du béton augmente, favorisant le passage des ions chlorures vers l'armature.

En milieu chloruré, lorsque la dissolution du métal se poursuit sous le dépôt, l'excès d'ions Fe2+ou Fe3+ produits conduit à la diffusion inverse des anions Cl pour respecter la neutralité des charges. Les cations métalliques s'hydrolysent selon la réaction :

$$Fe^{2+} + 2H_2O \rightarrow F_e(OH)_2 + 2H^+ \qquad (10)$$

Il se forme ainsi un hydroxyde qui protège l'armature.

On note, pour des éprouvettes identiques placées dans des solutions électrolytiques contenant des quantités des ions chlorures différentes, des courants de corrosion différents.

- **Autres agents agressifs**

Des sels, contenus dans l'eau pénétrant le béton, peuvent contribuer à la formation de produits de corrosion sur l'acier. Ainsi, les ions sulfate agissent qualitativement comme les sels solubles tels les perchlorates, les acétates, les halogénures autres que les chlorures peuvent aussi être corrosifs pour les armatures. [6]

I.3.6. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures

I.3.6.1. L'aspect du parement de l'ouvrage

Les efflorescences et les tâches de rouille qui sont la conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage du béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Parfois, ce point est considéré comme étant de peu d'importance par le gestionnaire des ouvrages mais par contre ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire car des éclats de béton peuvent se produire. [24]

I.3.6.2. La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage ou l'exploitent. Leur prévention et leur élimination doivent par conséquent être traitées avec grand soin. [24]

I.3.6.3. La stabilité de l'ouvrage

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissant et les efforts tranchants une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite de béton. Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion des armatures ne modifie pas significativement la tenue au moment fléchissant ou aux efforts tranchants.

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage. Ce document ne traite que du matériau et laisse de côté les problèmes de structures. [24]

Chapitre II : Caractérisation, Diagnostic

II.1. Introduction, Objectifs du diagnostic

II.1.1. Place du diagnostic

Un diagnostic préalable de l'ouvrage constitue la base nécessaire pour le choix d'une stratégie de réparation adéquate, et pour permettre une évaluation plus précise des coûts.

Le processus conduisant à une action de réparation et de protection des ouvrages en béton peut se définir en six étapes. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus.

La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation » peut être déclenchée par une opération de surveillance (cas des ouvrages d'art par exemple), une opération d'entretien, ou à la suite d'un évènement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé.

La deuxième étape est le « diagnostic » proprement dit, ou recherche d'une pathologie à partir des symptômes. Il est demandé dans le cadre :

- D’une étude spécifique ;
- De travaux de réfection ou de rénovation, de renforcement ;
- D’une inspection régulière mettant en évidence des désordres ;
- D’une expertise ;
- Ou d'une démarche préventive... [2]

II.1.2. Diagnostic de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufrures, tâches de rouille. Dans certaines circonstances, toutefois, une délamination dans le lit des armatures peut se produire sans signes apparents de corrosion.

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendent à la fois de la position des armatures (enrobage et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif : chlorures, sulfates).

Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au-delà de la dégradation visible.

La plupart des méthodes d'investigation sont donc orientées vers la détermination de caractéristiques liées à ces paramètres.

II.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont :

- l'identification de l'origine (carbonatation, chlorure externes ou internes, autres) ;
- l'évaluation de l'étendue dans l'espace ;
- la prédiction de l'évolution probable dans le temps ou dans l'espace ;
- l'estimation des conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ou des personnes ;
- la définition des suites à donner et entre autre le principe des solutions de réparation. [2]

Les considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiment, monuments historiques du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations.

II.2. Les principales étapes d'un diagnostic

La procédure à suivre s'intègre dans une démarche globale qui peut mener jusqu'à des travaux de réparation.

La découverte des désordres sur une structure entraîne généralement :

- la mise en œuvre de mesures de sauvegarde si nécessaires (purges, filet de protection...) ;
- la réalisation d'une visite préliminaire et de certaines autres opérations dans le but d'établir un pré-diagnostic ;
- la mise au point d'un programme d'investigation ;
- le lancement des opérations liées au diagnostic...

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste du laboratoire (pour les problèmes liés au gonflement du béton, etc.).

II.2.1. Visite préliminaire

La visite préliminaire a 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 aux parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigation. Elle comprend :

- la collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferraillage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies. [11]

On utilisera les moyens d'accès les plus adaptés : il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, Alcali-réaction dont le but est de déterminer le niveau de dégradation, pourront être envisagés à cette étape afin d'orienter le programme d'analyse futur.

Lors d'une visite préliminaire, l'ingénieur doit se poser les questions suivantes :

- pourquoi les armatures se sont-elles corrodées ?
- quelle est l'incidence de la corrosion sur la sécurité de la structure ?
- les armatures se corrodent-elles également aux zones ne présentant pas de dégâts visibles ?
- quelle stratégie de réparation adopter et selon quelle urgence ?
- Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :
- d'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres ;
- d'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les suggestions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc. ;
- d'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garantie est nécessaire ;
- et de faire évaluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée.)

Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage. [11]

II.2.2. Collecte des documents

Un maximum d'informations concernant la structure doivent être récoltés, à savoir:

- Date de construction afin de connaître le code selon lequel la structure a été calculée et les dispositions constructives de l'époque;
- L'histoire de la structure ;
- Les plans de coffrage et de ferraillage ;
- Les rapports d'éventuelles études antérieures;
- L'orientation de la structure; [11]

II.2.3. Préparation de l'intervention

A partir de la visite sur site et de l'étude des documents collectés on peut déterminer précisément le nombre et le type de mesures à réaliser pour répondre au mieux à la demande du client. Avant l'intervention il faut déjà avoir déterminé quelles informations sont importantes pour réaliser la mission, quelles sont à priori les dégradations que l'on veut mettre en évidence.[11]

II.2.4. Inspection détaillée

L'inspection visuelle de la totalité de la structure est mise en œuvre afin de détecter tous les signes de détérioration, et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres. Elle comprend les deux phrases suivantes :

II.2.4.1. Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc.

Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.).

II.2.4.2. Inspection

L'inspection proprement dite comprend le relevé, éventuellement sur plan, de tous les désordres visibles, et de tous renseignements utiles quant à l'aspect du parement :

- la présence d'anciens revêtements ou de produit d'imprégnation
- l'apparence de la surface du béton, stalactites, efflorescences, traces de rouille ;
- la présence de fissures (ouverture, réseau) ;
- la détérioration de la peau du béton ;
- les armatures apparentes et les épaufrures ;
- la déformation de la structure ;
- la détection de zones sonnant creuse ;
- les traces d'humidité. [11]

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide de défauts.

II.2.5. Essai en laboratoire

Si des échantillons ont été prélevés dans les zones représentatives des états de dégradation, ceux-ci sont envoyés en laboratoire pour analyse chimique ou microstructurale afin de qualifier le béton. Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure elles sont écrasées afin de connaître la résistance à la compression du béton. [5]

II.2.6. Traitement des résultats

L'ensemble des résultats d'analyse et des relevés des défauts sont récapitulés dans des tableaux ou sur des plans dans le rapport de diagnostic. Si l'inspection de la structure était complète, il faudrait pour chaque type de désordres effectuer un linéaire en vue d'une éventuelle réparation. [5]

II.2.7. Commentaires et avis de réparation

A partir de tous les éléments dont il dispose, l'ingénieur chargé d'affaires doit indiquer dans son rapport :

- L'origine probable des désordres, leur étendue, et leur probable évolution;
- Si la structure garantit toujours la sécurité des personnes et des bien qu'elle abrite (bâtiments) ou qu'elle ne menace pas de s'écrouler;
- Les zones à traiter en priorité ;
- Des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage, maintien, renforcement ou suivi, conseil sur des éventuels compléments d'étude;
- Des recommandations relatives aux éventuelles méthodes de réparation les mieux adaptées ;

Il est à rappeler que le rapport de diagnostic doit être compréhensible pour un non initié. [7]

II.2.8. Investigation in situ

Une investigation type se compose d'une série de tests différents suivie d'une phase d'analyse permettant le choix de la stratégie optimale de réparation. La réalisation du même genre de tests est également un moyen de contrôle de qualité pour les ouvrages récents.

Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants :

- l'importance de la structure ;
- la nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes ;
- les délais et les coûts ;
- l'accessibilité ;
- l'environnement, etc. [7]

II.2.8.1. Mesures relatives aux armatures

II.2.8.1.1. Mesure de l'enrobage des armatures (l'analyse du ferraillage)

L'enrobage des armatures est un facteur déterminant dans les phénomènes de corrosion. La technique de mesure de l'enrobage fait appel à de nombreux appareils disponibles sur le marché, basé sur des principes magnétiques ou réflectométriques (radar géophysique).

Toutefois, les précisions et sensibilités varient fortement d'une technique à l'autre, notamment en fonction de la densité du ferraillage. Ces techniques, dont les performances sont fonction de leur principe de base, permettent d'accéder aux informations suivantes :

- enrobage (profondeur) ;
- estimation du diamètre des armatures ;
- présence d'armatures adjacentes ;
- reconnaissance du profil de l'acier. [2]

L'objectif de ces mesures est de localiser géographiquement les armatures faiblement enrobées (en relation avec les dispositions réglementaires d'une part et les spécifications particulières d'autre part), d'estimer les surfaces concernées et enfin d'apporter des éléments quantitatifs pour une modélisation de l'évolution possible des phénomènes (en relation avec la profondeur de carbonatation ou de pénétration des chlorures.



Figure II-1 : Détection des armatures au radar [34]

- **Méthode magnétique (Radar géophysique)**

Le radar est un système générant des ondes électromagnétiques dans une gamme d'hyperfréquences (de l'ordre de quelques MHz à quelques GHz) [34]. Les échos sont enregistrés sous forme de traces temporelles.

Ce système est constitué d'une antenne d'émission, d'une antenne de réception, d'un système électronique gérant l'émission et la réception des signaux et d'une unité d'acquisition et de traitement.

Le principe est la transmission d'une impulsion électromagnétique de courte durée à la structure au moyen d'une antenne émettrice (figure II-2).

Cette impulsion électromagnétique de courte durée se propage et se réfléchit sur toute interface présentant un contraste d'impédance électromagnétique [34].

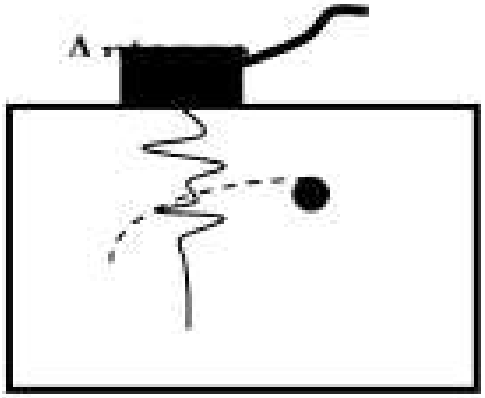


Figure II-2 : Schéma de principe d'une mesure Radar [34]

Le radar est utilisé pour mesurer des épaisseurs, détecter des vides par exemple sous une dalle, un radier, ou à l'extrados d'une galerie en éléments préfabriquées, localiser les armatures et les fissures dans le béton armé ou pour caractériser les matériaux.

L'application de cette méthode nécessite néanmoins un accès direct à la surface de l'ouvrage à ausculter. L'utilisation du radar dans l'évaluation de la corrosion des armatures a démontré qu'il détectait les dommages causés par la corrosion, traduisant ainsi un stade avancé de la corrosion. Des essais ont été réalisés sur des dalles de stationnement souterrain d'un hôtel construit depuis plus de trente ans [35] (figure II-3). Le radar a permis d'évaluer le taux d'humidité et la délamination.

L'exemple suivant est extrait de [Dous, 2002]**.**

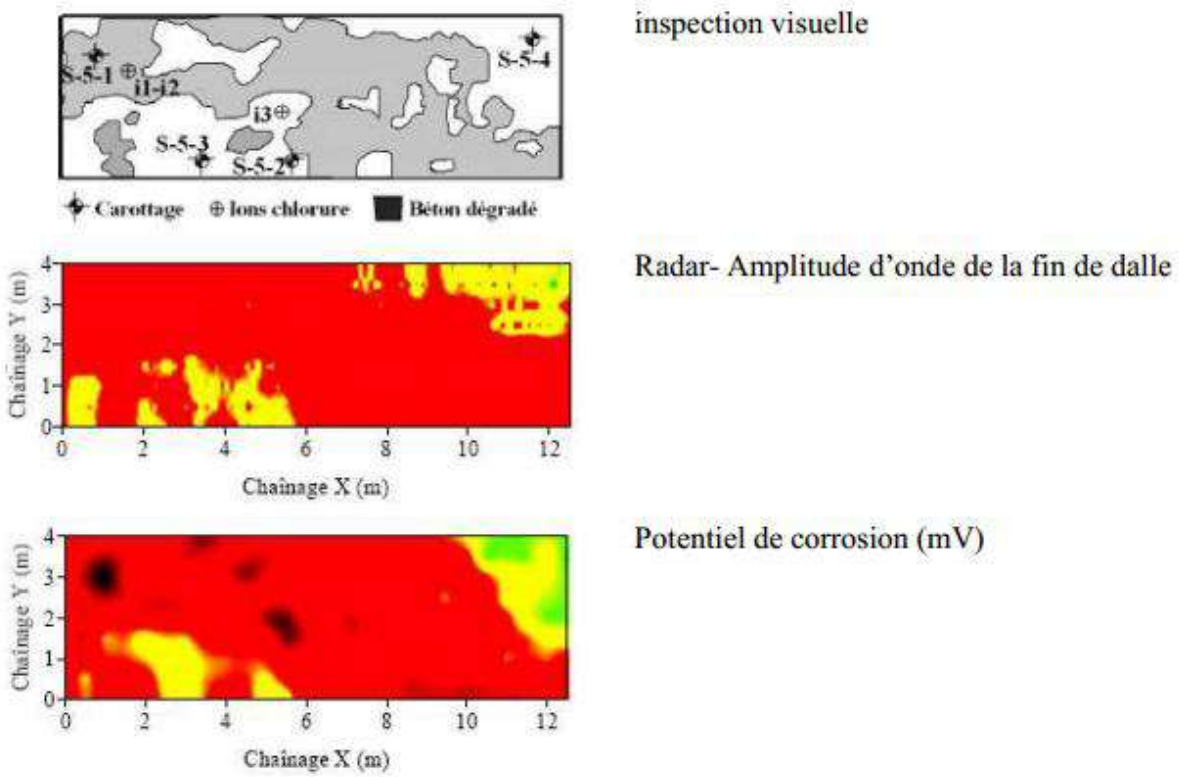


Figure II-3 : Résultats par mesure radar, potentiel et visuel de la corrosion d'une dalle [35]

Les résultats ont permis de démontrer qu'il y avait des similitudes entre le radar, le potentiel de corrosion et le sondage au marteau. Cela indique essentiellement la probabilité de l'activité de corrosion. Le radar peut donc prévenir des conditions favorisant l'initiation de la corrosion.

D'autres applications de la technique radar ont été développées comme la caractérisation de certaines propriétés physiques des bétons telles que la teneur en eau et en chlorures, des propriétés électromagnétiques comme la permittivité et la conductivité [36].

- **Autres méthodes**

Il existe d'autres méthodes d'estimation de l'enrobage de béton autour des armatures. Elles sont plus récentes et souvent en cours de développement.

Une première méthode pour caractériser l'épaisseur d'enrobage est la radiographie (ou la radioscopie) qui permet de détecter des armatures sous des enrobages épais. Elle permet de localiser les armatures, détecter les vides et les ruptures franches d'acier de fort diamètre.

Une deuxième méthode qui est encore au stade du laboratoire est celle de l'écho de l'impact provoqué par un marteau spécial placé à la surface du béton et renvoyé vers cette surface par des discontinuités (face arrière du béton, armatures, etc.) Elle devrait permettre de localiser les armatures et de détecter les vides.

La troisième méthode est la détection des rayons infrarouges émis à travers le béton par les armatures qui sont préalablement « chauffées ». Elle est peu exploitée, son objet est de localiser les armatures.

II.2.8.1.2. Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion : mesures de potentiel

Parmi les méthodes électrochimiques pouvant être appliquées à la détection du risque de corrosion des armatures dans le béton, les mesures de potentiel sont les plus utilisées et les plus connues, du fait de leur simplicité et de leur caractère non destructif. Cette méthode permet une évaluation des risques de dépassivation des armatures.



Figure II-4 : Mesures de potentiel [3]



Figure II-5 : Roue électrode [3]

Dès le contact de l'armature avec le béton, il s'établit à l'interface acier-béton, une différence de potentiel dépendant à la fois des réactions dites anodiques (oxydations: transformation du métal en oxydes) et des réactions dites cathodiques (réduction de l'oxygène). Ce potentiel est complexe et sa valeur dépend de l'état de corrosion des aciers (le potentiel tend vers des valeurs négatives dès qu'il y a amorce de corrosion), mais aussi de la teneur en eau du béton, de la teneur en éléments agressifs, de la profondeur de carbonatation, de la compacité du béton, etc... Il ne peut être relié à ces facteurs par aucune loi, ni aucune formule mathématique, et la valeur absolue de ce potentiel n'aura donc que peu de signification. Néanmoins, les mesures effectuées sur des surfaces représentatives permettent d'établir une cartographie des probabilités de corrosion et de localiser les zones à risque maximum. [3]

Les mesures de potentiel sont surtout utilisées en phase diagnostic (elles permettent la localisation des prélèvements ou de tests complémentaires), mais également pendant les opérations de réparation (localisation précise des zones à réparer). En surveillance continue, elles permettent également la détection d'un phénomène, bien avant qu'un désordre ne soit

visible en surface, et ainsi de mieux planifier les réparations (mesures préventives). Elles ne permettent pas de déterminer la position des armatures (on utilisera pour cela des méthodes magnétiques ou de réflectométrie radar), ni leur vitesse de corrosion (perte d'épaisseur).

Elles ne s'appliquent pas :

- aux éléments enterrés ou immergés, à moins d'adapter la méthodologie à ces cas particuliers (par exemple, mettre hors sol, par affouillement, l'élément de structure, le temps de la dépolarisation pouvant demander plusieurs jours),
- au béton revêtu d'un produit électriquement isolant : celui-ci devra être retiré au droit des points de mesure,
- aux armatures actives du béton précontraint, car la présence de la gaine en matière plastique ou métallique, ne permet pas de récupérer le signal correspondant aux câbles. Dans le cas de fils adhérents, par contre, la méthode est applicable.

La méthode nécessite la mise à nu d'une armature, sa connexion à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance, dont l'autre borne est reliée à une électrode de référence placée sur le parement.

La jonction entre le béton et l'électrode doit être humide, et si ce n'est pas le cas, cette humidité doit être assurée (pulvérisation d'eau légèrement alcaline, coton imbibé, etc...).

L'électrode de référence est une électrode dont le potentiel est constant, et défini par une suite d'équilibres électrochimiques.

Le tracé des cartographies, et l'étude des gradients de potentiel associés au développement des méthodes informatiques (stockage des données) permettent maintenant des interprétations plus fiables et plus précises, et ont conduit au développement de ce type de mesures. Le matériel peut comprendre une ou plusieurs électrodes, ou des roues électrodes. [3]



Figure II-6: Mesure du potentiel de corrosion [3]

II.2.8.1.3. L'auscultation sonique

L'auscultation sonique permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre deux points. Une partie de l'auscultateur, le transducteur, produit des ultrasons. Grâce aux propriétés piézoélectriques des matériaux, l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore. L'appareil mesure le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur qui la convertit en signal électrique. [12]



Figure II-7 : Mesure de vitesse de corrosion [12]

Connaissant la distance de l'émetteur au récepteur, il est possible de connaitre la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Ce procédé permet de caractériser l'homogénéité physique du béton ainsi que son état d'altération. En effet, cette méthode de diagnostic permet entre autres de localiser des défauts, des vides ou autres malfaçons dans le béton. Le principe est que les lames d'air emprisonnées dans le matériau transmettent très peu l'énergie des ultrasons, ainsi, la vitesse mesurée sur l'ensemble de l'élément sera plus faible que pour un béton homogène.

Il existe principalement deux types de mesures à effectuer sur site :

- Les mesures en transparence : cette méthode consiste à déterminer le temps de propagation des ondes sonores longitudinales à travers un élément. Pour procéder à ce type de mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter.
- Les mesures de surface : cette méthode s'effectue principalement lorsqu'une seule des faces de l'élément est accessible lors des investigations. Elle peut aussi être utilisée pour déterminer la profondeur d'une fissure ou bien la présence de

couches multiples dans un même élément. Pour réaliser cette mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à ausculter. L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure. Il est à noter qu'il existe une règle a été conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées. [12]

- Le tableau suivant donne les résultats d'essais obtenus sur l'auscultation sonique des bétons :

Tableau II-1 : les résultats sur l'auscultation sonique des bétons [12]

Vitesse de propagation du son	**Qualité estimée du béton**
V > 4000 m/s	le béton est de bonne qualité et homogène
3500 < V < 4000 m/s	le béton est de qualité moyenne
3000 < V < 3500 m/s	le béton est de qualité médiocre
V < 3000 m/s	le béton est de mauvaise qualité



Figure II-8: Mesure par transparence [12]

II.2.8.1.4. Scléromètre

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraine 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 Is de l'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 influer 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. [11]



Figure II-9: Scléromètre [11]

II.2.8.2. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement

II.2.8.2.1. Détermination de la profondeur de 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 protonnée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique). [10]

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 fraiche 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. [10]

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 Ferroscan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type :

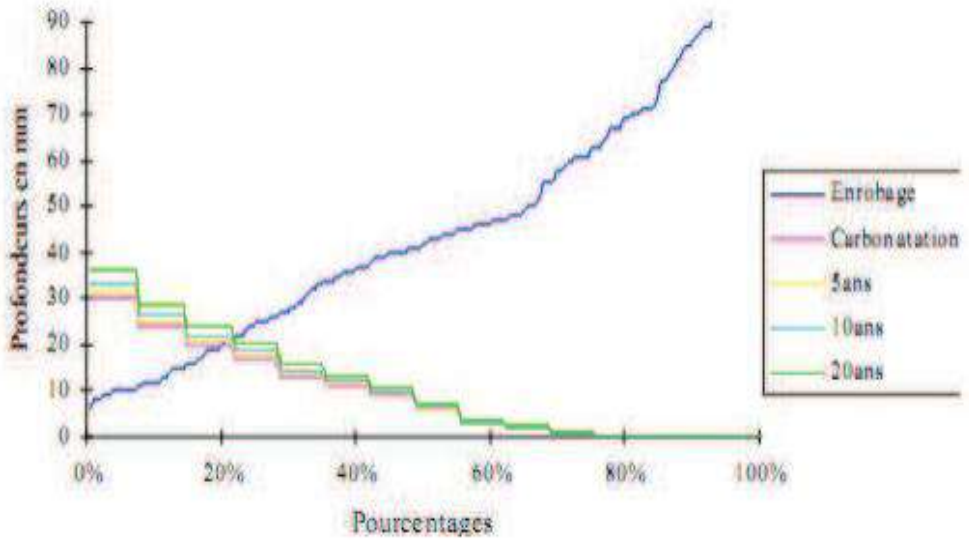


Figure II-10 : graphique enrobage-carbonatation [10]

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.

Il est aussi possible de faire des prévisions sur les évolutions pour les années à venir (courbes jaune, bleu clair et verte). En effet, l'évolution de la carbonatation suit une évolution en fonction du temps du type aVt, avec « a » un facteur propre à chaque béton. En connaissant l'âge du bâtiment ainsi que la profondeur de carbonatation à l'instant t, il est facile de déterminer le facteur « a ». [10]

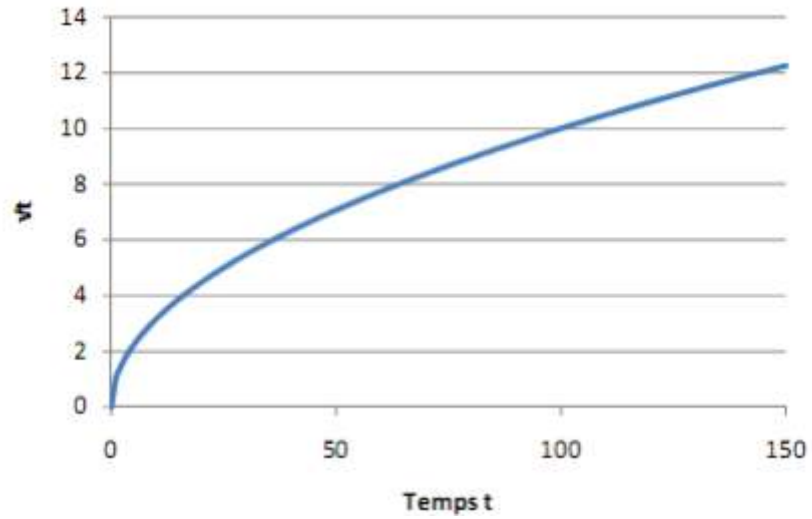


Figure II-11 : courbe Vt [10]



Figure II-12 : Carbonatation sur carotte [10]

II.2.8.2.2. Mesures de résistivité (porosité)

La corrosion étant un phénomène électrochimique, et le béton étant un conducteur, la résistivité électrique de ce dernier constitue un paramètre significatif de l'intensité des échanges. Celle-ci dépend toutefois d'un certain nombre de paramètres : teneur en eau du béton, composition chimique de la solution interstitielle (présence de sels), etc.

Les mesures de résistivité sur site ont été utilisées en parallèle avec les mesures de potentiel pour affiner le diagnostic de la corrosion. En effet, la vitesse de corrosion est contrôlée par la facilité avec laquelle les ions en solution passent au travers du béton, d'une zone anodique à une zone cathodique. Ainsi, de larges gradients de potentiel associés à de faibles résistivités seront caractéristiques de fortes vitesses de corrosion.

Les mesures peuvent être influencées par la présence d'armatures à proximité du point de mesure, par l'effet d'échelle, ou par la présence d'une couche de surface ayant une

résistivité différente de celle du cœur du béton. Par ailleurs, le principe même de la mesure (méthode de WENNER à 4 électrodes), possède ses limites. [36]

II.2.8.2.3. Mesures de perméabilité

Les propriétés physiques du béton dont sa perméabilité influencent la durée de la période d'amorçage de la corrosion. Une mesure de perméabilité à partir de la surface est particulièrement intéressante.

Toutefois, ce type de mesures in-situ est influencé par la teneur en eau du béton qui limite son application.

- Perméabilité à l'air : sa détermination consiste en la mise en pression d'une enceinte, et la mesure de la décroissance de la pression.
- Perméabilité à l'eau : dans ce cas, l'essai consiste en la mise en pression d'eau d'une enceinte et la mesure du débit d'eau par avancement d'un piston destiné à la pression. [2]

La localisation des zones de mesure de perméabilité doit être parfaitement définie pour éviter les défauts de surface du béton (nids d'abeilles, fissures, etc.) qui la perturbent.

En l'absence de normes ou de spécification, ces mesures restent comparatives

II.2.8.2.4. Cohésion superficielle

Cette détermination a son intérêt afin par exemple de définir la nature du revêtement ultérieur à mettre en place, dans le cas notamment d'enduit friable ou en présence d'autre revêtement.

Elle se détermine à partir d'essais d'adhérence sur les pastilles collées sur la surface du béton (de section carrée 5 x 5 cm^2 circulaire de diamètre 5 cm). La traction est effectivement à l'aide d'un appareil spécifique. Plusieurs mesures sont nécessaires dans une zone (3 cm minimum). Les valeurs sont rapportées en Mpa. A titre indicatif, l'application d'un revêtement sur un support béton nécessite un minimum de 0,5 Mpa. [2]

II.2.9. Analyses et essais de laboratoire

II.2.9.1. Carottage d'éléments en béton armé

Les prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation par carottage

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.

❖ Les caractéristiques chimiques du béton d'enrobage sont déterminées sur les prélèvements :

- analyse chimique globale : Elle comprend l'analyse de la fraction soluble du résidu insoluble. Elle a pour objet de déterminer les caractéristiques du béton, le dosage en ciment, l'absence d'anomalie ;
- dosage des chlorures totaux et des chlorures libres (solubles dans l'eau). Les teneurs en chlorures s'expriment par rapport au béton ou par rapport au dosage en ciment. Ce dernier peut être connu ou évalué en laboratoire à partir de la mesure de la silice soluble du ciment préalablement identifiée (dans le dossier chantier ou par examen microscopique). L'interprétation des résultats doit tenir compte non seulement des valeurs absolues mesurées, mais aussi de l'allure des profils de concentration ;
- dosage des sulfates ;
- autres déterminations particulières (par exemple, les sulfures). [9]

❖ Les caractéristiques minéralogiques du béton sont déterminées par :

- microscope optique (lumière transmise ou réfléchie) pour la détermination de la nature du ciment, microscopie électronique MEB avec microanalyse élémentaire ;
- diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines. [9]

❖ Les caractéristiques physiques du béton d'enrobage sont surtout liées à leur résistance à la pénétration (transfert des fluides) :

- porosité à l'eau (éventuellement au mercure) ;
- perméabilité ;
- diffusivité des corps tels que les chlorures ;
- adsorption capillaire ;
- résistance mécanique et éventuellement d'autres caractéristiques. [9]



Figure II-13 : Prélèvements par carottage [9]

II.2.9.2. Prélèvements d'aciers

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcule d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaitre 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. [13]

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 exploité afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.



Figure II-14: Prélèvement d'aciers [13]

II.2.10. Rapport de diagnostic

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible même par un profane, un non initié.

Il comprend :

- l'identification de la structure, le nom du demandeur ;
- l'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date ;

- une brève description de la structure ;
- le rappel des objectifs de l'étude ;
- la liste des documents consultés ;
- Les résultats de l'inspection détaillée ;
- les résultats des essais in- situ et de laboratoire ;
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable et leur incidence sur la sécurité ;
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude ;
- une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer ;
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.

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 protections adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Chapitre III : Etudes statistiques des cas de corrosion dans la région de Médéa

III.1. Introduction

La région de Médéa qui se situ au nord algérien, a connu ces dernières années des problèmes de dégradation par la corrosion qui ont touché des constructions de différentes natures: habitation, équipement et ouvrages d'art. Ce travail se base sur des informations concernant les ouvrages dégradés de la région, recueillies au niveau des agences locale du contrôle technique de la construction (CTC). Ces dernières ont été nécessaires afin de reconnaître la nature des désordres, de décrire leur localisation et d'analyse leur évolution pour enfin arriver aux facteurs caractérisant les problèmes touchant la région. L'enquête s'est portée sur le maximum d'information concernant des exemples d'ouvrages dégradés par la corrosion de la région de Médéa : âge, plan, nature des matériaux (ciment, dosage,…) et la nature de l'environnement.

L'objectif de ce travail est modeste mais précis, c'est d'arriver à rassembler les facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages par la corrosion en béton armé de la région étudiée, et faire apparaitre leurs fréquences.

Pour chaque type d'ouvrage, les fréquences des différents facteurs d'influence sur la dégradation sont données sous forme d'histogramme selon les rapports de surveillance visuelle des ouvrages.

Ces rapports de diagnostic ont pour objectif de permettre aux gestionnaires d'acquérir les éléments de connaissances et des méthodes pour essentiellement :

- Avoir une idée sur les désordres constatés
- Avoir une meilleure compréhension des causes du disfonctionnement des structures.
- Identifier les moyens d'essais et d'investigation,
- Choisir et mettre en œuvre les techniques de réparation les plus adaptées aux plans technique et économique.

III.2. Codification

Pour faciliter la présentation et la lecture des histogrammes, les données seront codifiées par des numéros comme suit :

Code 1 : Les facteurs liés à la nature des matériaux.

Code 2 : Les facteurs liés à la mise en œuvre.

Code 3 : Les facteurs liés à la conception.

Code 4 : Les facteurs liés à l'environnement.

Code 5 : Les facteurs liés aux conditions d'exploitation.

Code 6 : Les facteurs liés au manque d'entretien.

III.3. Données et résultats obtenus

III.3.1. Les facteurs d'influence sur les ouvrages à usage d'habitation

La dégradation des ouvrages à usage d'habitation a connu la même croissance que celle de la réalisation. Jusqu'à maintenant un nombre de logements de différents sites de la région ont réclamé des symptômes de dégradation, après une période de leur réalisation. Le tableau III-1, représente des exemples de logements dégradés par la corrosion dans la région de Médéa.

Tableau III-1 : Ouvrages à usage d'habitation dégradés dans la région de Médéa

Désignation de l'ouvrage	**Description de l'ouvrage**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la dégradation**
logements du quartier ENASRE à Ouzera (photo III-1,2)	Structure auto-stable en (R+2) à usage d'habitation	-L'enrobage des armatures endommagé. -Corrosion des armatures	-Mauvaise mise en œuvre. -infiltration d'eau. -Absence d'entretien -Mauvaise qualité du béton
200 logements à Ksar el Boukhari (photo III-3,4)	Structure auto-stable R+5 à usage d'habitation	-Corrosion des armatures	-Problème d'assainissement -Défaut de conception (étanchéité) -Mauvaise qualité du béton
Un logement du quartier REMALI à Médéa (Photo III-5,6)	Structure auto-stable R+1 à usage d'habitation	-Certaines armatures des dalles pleines sont complètements corrodées.	-Mauvaise qualité du béton -Infiltration d'eau -Absence d'entretien -Mauvaise mise en œuvre

Les images suivantes représentent un reportage photographique qui nous donne une idée sur les désordres rencontrés lors de nos visites aux sites précisés dans (Tableau III-1).



Figure III-1: Armatures corrodée, L'enrobage des armatures endommagé.
Logements du quartier ENASRE à Ouzera



Figure III-2 : Armatures corrodée, L'enrobage des armatures endommagé
Logements du quartier ENASRE à Ouzera



Figure III-3: Armatures corrodées

200 logements à Ksar el Boukhari



Figure III-4: Armatures corrodées

200 logements à Ksar el Boukhari



Figure III-5: La zone le plus touché (dégradé)

Une maison du quartier REMALI à Médéa



Figure III-6 : présence de la corrosion des armatures au dessous de balcon

Une maison du quartier REMALI à Médéa

Interprétation des résultats

L'histogramme ci-dessous met en évidence la prépondérance de trois facteurs, les autres interviennent mais assez peu :

- Les facteurs liés à la nature des matériaux (30 %).
- Dans 25 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre ;
- Dans 18 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien ;

- Les facteurs liés à l'environnement (15 %) ;
- Dans 10 % des cas, les facteurs d'influence sont liés aux défauts de conception ;
- Les facteurs liés à l'exploitation (2 %).

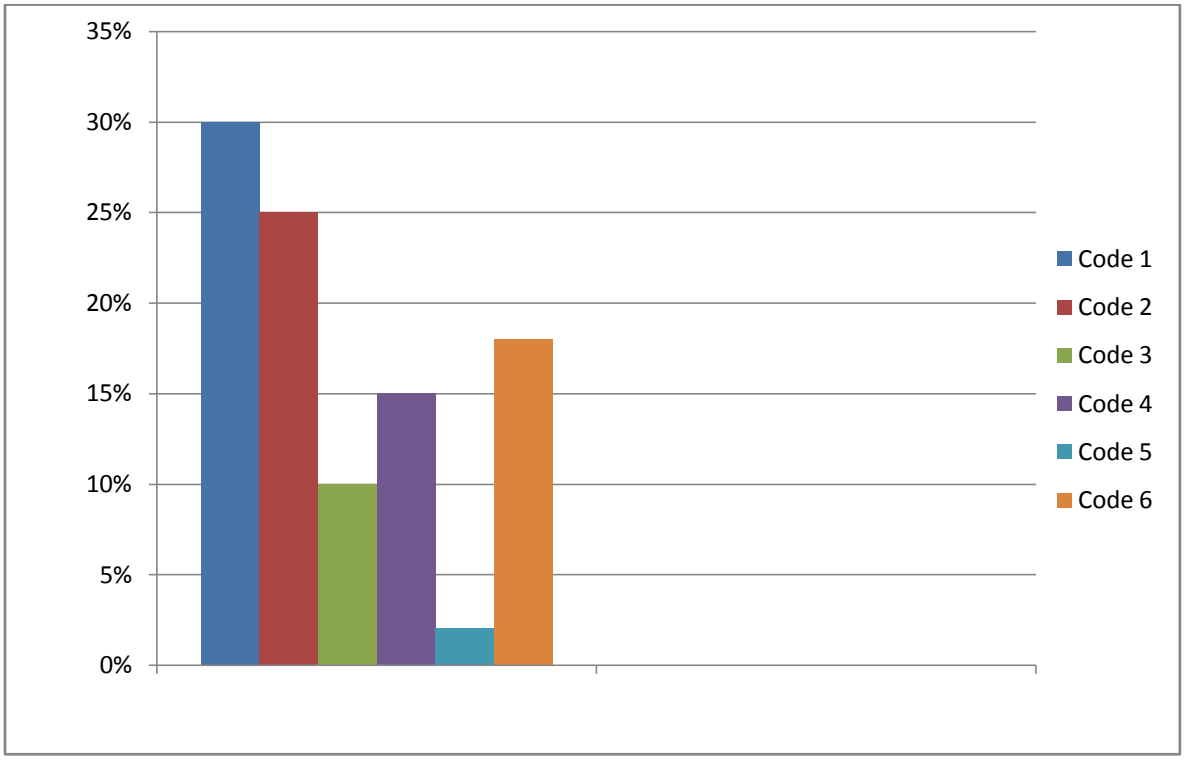


Figure III-7 : Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages à usage d'habitation

III.3.2. Les facteurs d'influences sur les ouvrages d'équipement

La dégradation des ouvrages à usage d'équipement a connu la même croissance que celle du précédent, mais vu que la croissance de réalisation du premier type d'ouvrage est très importante que celle du deuxième, la dégradation des ouvrages du deuxième type paraît moindre. Le tableau III-2, représente l'ensemble des ouvrages dégradés à usage équipement de la région.

Tableau III-2 : Ouvrages à usage d'équipement dégradés dans la région de Médéa

Désignation de l'ouvrage	**Description de l'ouvrage**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la dégradation**
Piscine semi olympique au complexe sportif O.P.O.W de Médéa (photo III-7, 8, 9)	structure en R+1	-Enrobage des armatures des poutres et dalles pleines détérioré. -Corrosion des armatures.	-Présence du chlore. -Infiltration d'eau. -Déférence de la température n'est pas prés en charge. -Mauvaise qualité du béton
Mousquet Salam à Berrouaghia (Photo III-10,11)	structure en R+3	-Détérioration de l'enrobage	-Défaut de conception (étanchéité) -Absence d'entretien -Mauvaise mise en œuvre -Mauvaise qualité du béton
Ecole Yahiaoui à Ksar el Boukhari (PhotoIII-12,13)	structure en R+2	-Corrosion des armatures	-Mauvaise qualité du béton -Manque d'entretien -Mauvaise mise en œuvre

Les images suivantes représentent un reportage photographique sur les désordres rencontré lors de nos visites aux sites précisées dans (Tableau III-2)



Figure III-8: Enrobage des aciers détérioré

Piscine semi olympique au complexe sportif O.P.O.W de Médéa



Figure III-9: Enrobage des aciers détérioré

Piscine semi olympique au complexe sportif O.P.O.W de Médéa



Figure III-10 : Armatures de la poutre complètement corrodées

Piscine semi olympique au complexe sportif O.P.O.W de Médéa



Figure III-11: Détérioration de l'enrobage

Mousquet Salam à Berrouaghia



Figure III-12: Détérioration de l'enrobage

Mousquet Salam à Berrouaghia



Figure III-13: Corrosion des armatures

Ecole Yahiaoui à Ksar el Boukhari

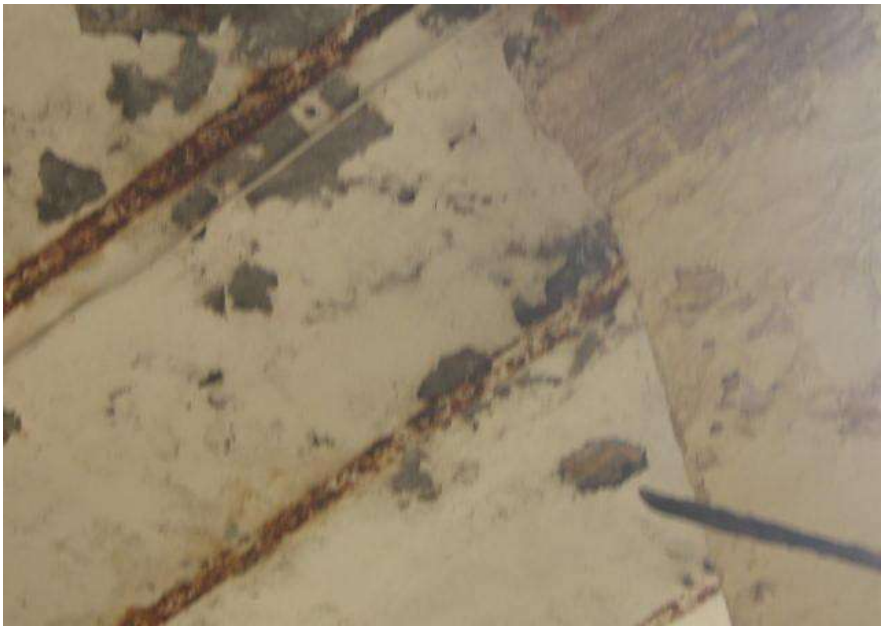


Figure III-14: Corrosion des armatures

Ecole Yahiaoui à Ksar el Boukhari

Interprétation des résultats

Selon l'histogramme figure III-2, on remarque que les facteurs liés à la mise en œuvre et la nature des matériaux, sont les facteurs les plus importants suivis par les facteurs liés à l'absence d'entretien.

- Dans 25 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre ;
- Les facteurs liés à la nature des matériaux (21 %) ;
- Dans 19 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien ;
- Les facteurs liés à l'environnement (15 %) ;
- Dans 15 % des cas, les facteurs d'influence sont liés aux défauts de conception ;
- Les facteurs liés à l'exploitation (5 %).

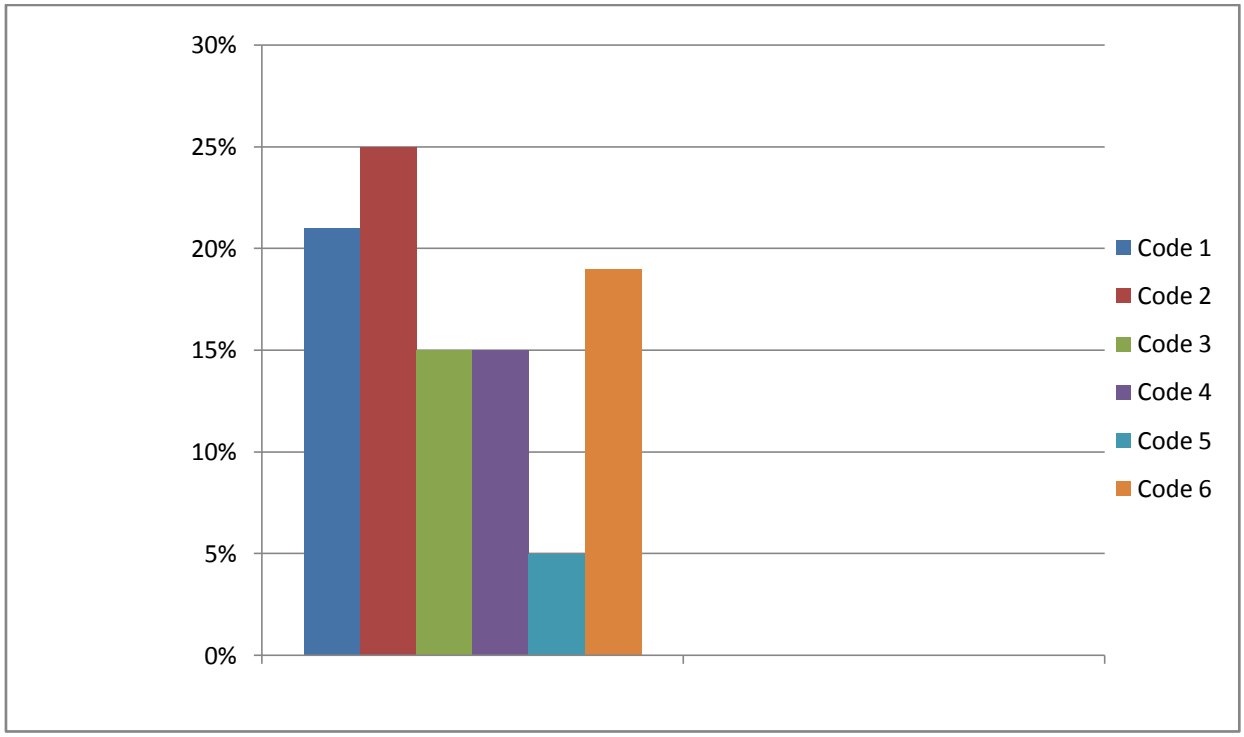


Figure III-15: les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'équipement.

III.3.3. Les facteurs d'influences sur les ouvrages d'art (Les Ponts)

Le nombre des ponts sur les routes nationales de la wilaya de Médéa est très important presque 79 ponts, y compris les dalots de longueur supérieure à 4m. Le nombre des ponts dégradés selon le rapport des visites d'inspections détaillées faites par CTTP (contrôle technique des travaux publics) en 1993 est 22 ponts. Il est évident qu'actuellement le nombre est supérieur, et que la dégradation est plus grave surtout pour ceux qui présentaient des fissures légères et qui n'ont pas été réparés. Le tableau III-3 représente une liste des ponts dégradés.

Tableau III-3: Ouvrages d'arts dégradés dans la région de Médéa

Désignation de l'ouvrage	**Situation de l'ouvrage**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la Dégradation**
Ouvrage d'art pont OUED CHAIR (Photo III-14)	Chemin Wilaya le 20 au PK 17+200	-Corrosion des armatures	-Mauvaise qualité de Béton -Mauvaise mise en œuvre. -Défaut de conception
Ouvrage d'art pont OUED BOUKMOURI (Photo III-15)	Route national 01 au PK 150+900	-Corrosion d'armature.	-Manque d'entretien. -Infiltration des eaux de ruissellement -Sol agressif -Mauvaise mise en œuvre.
Ouvrage d'art pont OUED EL MALAH (Photo III-16)	Chemin Wilaya le 20 au PK 26+800	-Corrosion d'armature -Eclatement du Béton d'enrobage	-Mauvaise qualité de Béton -Défaut de conception -Mauvaise mise en œuvre.
Ouvrage d'art- pont OUED ZABOUDJ (Photo III-17)	Chemin Wilaya	-Corrosion d'armature	-Absence du Revêtement -Mauvaise qualité de Béton -Manque d'entretien.

Les images suivantes représentent un reportage photographique sur les désordres rencontré lors de nos visites aux sites précisées dans (Tableau III-3)



Figure III-16 : Corrosion des armatures

Ouvrage d'art- pont OUED CHAIR



Figure III-17 : Corrosion d'armature

Ouvrage d'art- pont OUED BOUKMOURI



Figure III-18 : Corrosion d'armature, Eclatement du béton d'enrobage

Ouvrage d'art- pont OUED EL MALAH



Figure III-19 : Corrosion d'armature

Ouvrage d'art- pont OUED ZABOUDJ

Interprétation des résultats

Pour ce type d'ouvrage, on a l'histogramme de la figure III-3 où on remarque que les facteurs liés aux méthodes d'entretien et la mise en œuvre sont généralement la principale cause de dégradation :

- Dans 25 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien ;
- Dans 22 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre ;
- Les facteurs liés à l'environnement (18%) ;

- Les facteurs liés à la nature des matériaux (18 %) ;
- Dans 15 % des cas, les facteurs d'influence sont liés aux défauts de conception ;
- Les facteurs liés à l'exploitation (2 %).

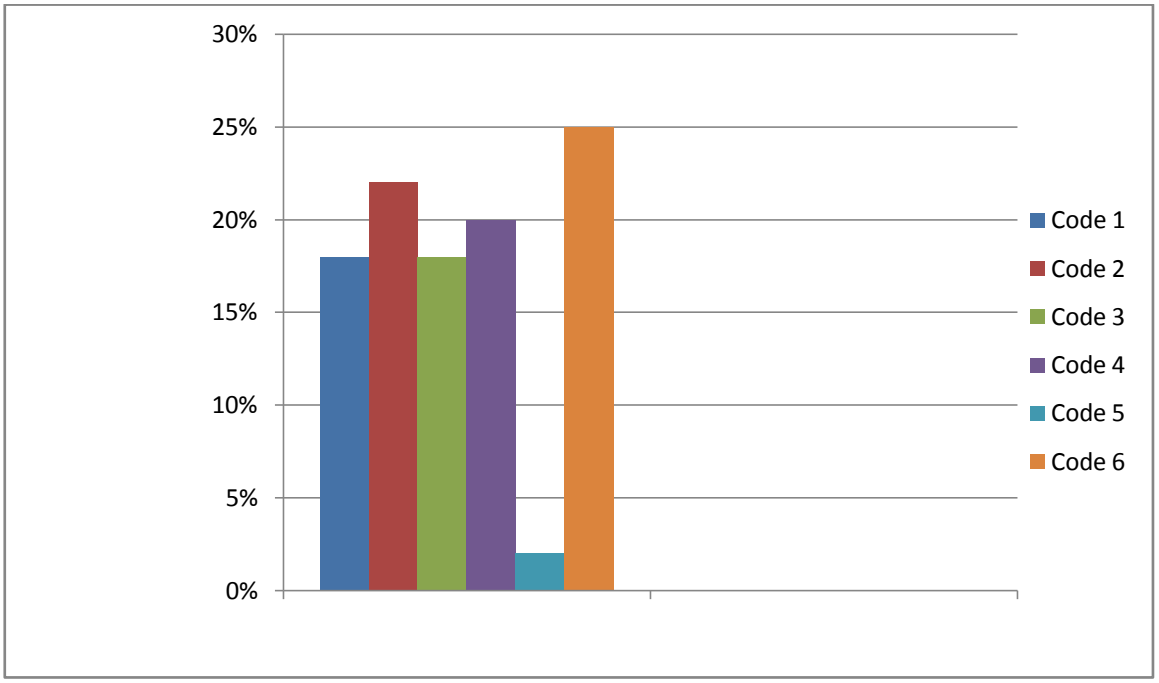


Figure III-20: les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'art (les ponts)

III.4. Les désordres induits par les différents facteurs

On remarque que les facteurs liés à la mise en œuvre jouent un rôle primordial dans l'influence sur la dégradation des ouvrages, ce qui entraîne en général des disfonctionnements majeurs du système d'étanchéité qui se traduisent en particulier par des corrosions d'armatures et par la dégradation de certaines structures en maçonnerie.

Les dommages sur le béton non-étanche dans lequel l'eau douce (les pluies) peut s'infiltrer, elle peut extraire l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment durcie.

Lorsque l'hydroxyde de calcium est lessivé, le silicate de calcium hydraté (CSH) détache encore de l'hydroxyde de calcium en raison de la perte de résistance.

L'entretien a pour but d'améliorer ou maintenir la sécurité structurale et éviter ou retarder certain type de dégradation des structures, c'est vraiment un facteur négligeable, malgré qu'il soit nécessaire surtout pour certaines parties des ouvrages qui doivent être maintenues dans le temps, comme l'étanchéité, le revêtement, qui n'ont en général qu'une durée de vie limitée. L'entretien et la maintenance devront être assurés par le personnel d'exploitation, ce qu'on appelle l'entretien courant.

Dans les ouvrages à usage d'habitats, on distingue les mêmes phénomènes qui résultent de l'indifférence des habitants, prenons les phénomènes les plus rencontrés comme :

- La stagnation des eaux potables ou usées dans les caves (Photo III-21), où les pompes à eaux perdent de l'eau ;



Figure III-21 : La stagnation des eaux dans les caves

- Les vides sanitaires sont devenus des endroits d'accumulation des eaux usées, (Photo III-22) ce qui engendre des attaques chimiques par les différents produits quelles contiennent, comme : les graisses et huiles d'origine végétale et animale réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des sels d'acides gras. L'effet de dégradation sur le béton dépend principalement de la solubilité dans l'eau des produits de réaction formés.



Figure III-22 : Etat des vides sanitaires

En plus des spécifications données par le concepteur, il est important de considérer la mise en œuvre, car une mise en place incorrecte peut entraîner différents problèmes : ségrégation, adhérence déficiente entre les différentes couches de béton, défaut de surface,

dommages aux coffrages ou à l'armature, fissuration, etc. Comme les taches effectuées sur chantier sont nombreuses et constituent tout un enchaînement d'opération, les erreurs rencontrées sont alors classées selon l'opération à exécuter :

- **Défauts de mise en place de ferraillage**

- Non-respect des plans de ferraillage (erreurs dans la disposition des aciers), surtout pour les escaliers ;
- Mauvaise disposition des armatures : soit par manque de recouvrement des armatures, car un recouvrement trop faible peut provoquer la corrosion de l'armature et l'écaillage du béton par-dessus de l'acier ;



Figure III-23: Espacement entre les deux nappes d'armature lors du ferraillage du voile non respecté

- **Défauts de malaxage et coulage**

- Un malaxage trop court ;
- Un déchargement très lent des malaxeurs à tambour non inclinable qui cause la ségrégation ;

Généralement l'équipe sur chantier essaye de couler le béton rapidement, laissant tomber librement le béton surtout lorsqu'on bétonne un élément d'une hauteur importante avec une forte densité de ferraillage, ce qui peut nuire à son homogénéité.

- **Défauts de coffrage et décoffrage**

- L'absence d'écarteurs de coffrage peut engendrer une insuffisance d'enrobage ;
- Un coffrage qui n'est pas étanche permettant à une partie de ciment de s'échapper ;
- Théoriquement, il faut laisser le coffrage le plus longtemps possible, car ils conservent l'humidité nécessaire au mûrissement du béton. Mais en pratique,

l'entrepreneur enlève le coffrage le plus rapidement possible pour les employer dans un autre ouvrage. Certains éléments dépendent uniquement des coffrages pour supporter les charges appliquées et leurs propres masses pendant les premiers jours, surtout le cas des éléments soumis à la flexion (les dalles et poutres). Avec un ciment portland normal une période de mûrissement est de l'ordre de 7 jours, une période plus courte se traduit par une résistance et une durabilité amoindrie.



Figure III-24: Perte de laitance de ciment suite à une mauvaise mise e n œuvre du coffrage de voile

- **Défauts de vibration**

- Une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité ;
- Vibration trop forte au-dessus des barres de diamètres importants placées trop près de la surface induit la fissuration précoce ;
- Une vibration excessive produira une certaine ségrégation dans la le mélange particulièrement dans les bétons assez fluides ;



Figure III-25 : Perte de laitance de cime nt suite à une mauvaise mise en œuvre du coffrage de poteau

- **Défauts de cure**

- La vitesse d'hydratation étant plus grande durant les premiers jours, c'est à ce moment qu'on a le plus besoin d'un mûrissement (cure) convenable, car l'évaporation de l'eau est très importante si la cure est inadéquate, surtout les éléments minces où le dimension de la surface exposée favorise l'évaporation.
- Normalement en climat chaud et sec, les problèmes de durabilité sont rares, et les exigences touchant à la qualité du béton y son généralement moins sévères, mais la température élevée en été a une action directe sur les ouvrages ;
- La température élevée en été influence sur la vitesse d'hydratation du ciment. Plus la température n'est élevée, plus la durée d'ouvrabilité et le délai de mise en œuvre du béton frais sont courts. Un bétonnage par temps chaud (température extérieure > 35°C), accélère la prise et diminue rapidement la plasticité du béton et accroît la fissuration après la mise en œuvre ;
- L'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment, crée des écarts de températures entre le cœur des pièces coulées et leur surface ce qui augmente la fissuration lors du refroidissement.
- Fissures dues au : retrait plastique, retrait du au séchage, différences de température et à la combinaison de ces facteurs.

- L'action de la température sur les matériaux au cours de durcissement (séchage naturel du béton) et les variations de teneur en eau entraînent des variations dimensionnelles anisotropes vraiment importantes, créant des contraintes supérieures à celles dues aux charges d'exploitation, ainsi des fissurations importantes dues au retrait de dessiccation.
- La baisse des résistances pendant la période des grandes chaleurs (juin, juillet, août et septembre), par perte d'affaissement. Cependant le coulage en été est déconseiller car le béton nécessite davantage d'eau de gâchage (E/C élevé) qu'en hiver et l'eau s'évapore rapidement en laissant les pores à l'intérieur du béton entraînant une baisse de résistance ;
- Par temps chaud, la température du béton n'est pas la seule cause de l'évaporation de l'eau de gâchage, car le vent à une influence appréciable : plus la vitesse du vent est élevée, plus l'évaporation de l'eau de gâchage est importante ;
- Il faut aussi tenir compte de l'humidité relative : plus le taux d'humidité de l'air n'est bas, plus l'évaporation de l'eau de gâchage est grande. Les sulfates contenus dans le sol se dissolvent dans les eaux (pluviale ou usée) pénétrant dans le sol et pénètrent rapidement en profondeur dans le béton de l'infrastructure. Ils réagissent avec l'aluminate de Calcium hydraté et l'eau pour former le très volumineux sulfate tricalcique d'aluminate, appelé également trisulfate ou éttringite :

$$3CaSO_4 + 3CaO.Al_2O_3.6H_2O + 26H_2O \rightarrow Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \qquad (11)$$

Les sulfates solubles dans l'eau peuvent également endommager la structure du béton sous forme de cristaux de gypse [CaSO4·2H2O] en engendrant le gonflement par suite d'une augmentation du volume qui peut arriver à 8 fois du volume initial (Figure 4).

Les conditions d'exploitation n'entraînent que des désordres mineurs dans le domaine routier, car les véhicules sont devenus de plus en plus lourds et le trafic de plus en plus dense, ce qui a engendré :

- L'utilisation d'une bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation ou de stockage, à cause des embouteillages ;
- Effets dynamiques ou abrasifs résultants de la circulation des engins lourdement chargés sur un tablier qui n'est pas encore protégé par sa couche de roulement ; Les efforts de freinage. Dans les ouvrages à usage d'habitation: la présence des citernes sur les terrasses inaccessibles des bâtiments, ainsi que les balcons, ce qui présente une importante ne surcharge pas prise dans le calcul du béton, sans parler de l'eau qui déborde en cas de surplus. Ainsi que la dégradation des marches des escaliers dans

presque tous les bâtiments. Apparemment, les facteurs liés à la nature des matériaux n'influent pas sur la dégradation des ouvrages, mais on pense que la fréquence réelle de ces facteurs est en réalité plus forte que ne le laisse paraître l'analyse, car l'observation visuelle ne permet pas d'obtenir des renseignements précis sur le comportement des matériaux in situ.

Conclusion

La dégradation des ouvrages dans la région de Médéa est devenue un sujet incontournable, après les problèmes survenus ces dernières années sur différents sites de la région et pour des ouvrages de toute nature ce qui a révéler des lacunes supposées connues mais en réalités négligées par les praticiens ainsi que la gravité des conséquences de l'indifférence du personnel sous-traitant envers plusieurs paramètres, qui ont été pendant longtemps mal jugés.

Les résultats font ressortir un certain nombre de points jugés déjà connus, cependant ils méritent essentiellement de recadrer toutes les observations et les diagnostics en retenant leur prédominance :

- Les défauts ou erreurs de mise en œuvre entraînent la mauvaise qualité du béton et jouent un rôle primordial dans le vieillissement ou la dégradation des ouvrages.
- Les effets thermiques ont été pendant longtemps insuffisamment pris en compte, même pour les structures plus récentes. L'utilisation des adjuvants, en éliminant les chocs thermiques et assurer une bonne cure, est la bonne solution pour augmenter la durabilité des constructions, surtout dans le cas de coulage des bétons pendant l'été.
- L'agressivité des sols par la présence des sulfates est le facteur qui influence sur la dégradation des ouvrages en infrastructure.
- Le défaut de conception est un facteur remarquable dans la dégradation des ouvrages surtout concernant les erreurs d'étanchéité.
- Les facteurs liés aux méthodes d'entretien causent des désordres moins graves que ceux causés par les autres facteurs, mais ils sont les plus populaires et les plus rencontrés. Et c'est le facteur qui accélère la dégradation.

Chapitre IV : Réparation et Protection

IV.1. Réparation d'un ouvrage en béton armé

La réparation d'un ouvrage est la deuxième étape dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé. C'est l'étape nécessaire pour redonner d'une part les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi pour rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire de redonner la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

Il existe principalement deux méthodes de réparation du béton armé. Il y a la méthode traditionnelle du ragréage ainsi que la technique du béton projeté. Cependant, une troisième méthode, plus récente, commence à se développer : l'utilisation des Tissus de Fibres de Carbone (TFC).

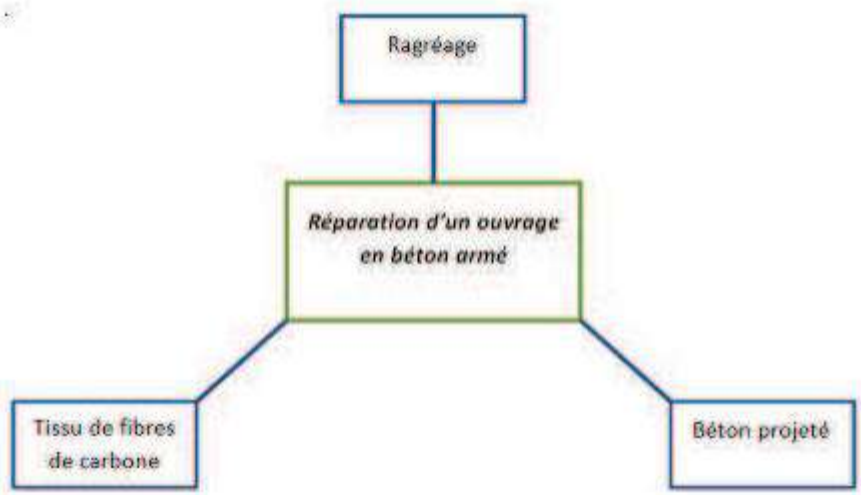


Figure IV-1 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé

IV.1.1. Le ragréage

Le ragréage est l'opération consistant à mettre un enduit de finition sur une surface maçonnée brute, neuve ou restaurée dans le but de l'aplanir. Elle s'appuie sur des mortiers (prêts à gâcher) qui rattrapent les imperfections et les dénivelés.

La méthode de ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons.
Elle est généralement utilisée lorsque les surfaces de béton à reprendre sont relativement faibles. Ceci s'explique par le fait que ce type de réparation n'a besoin que de très peu de matériel, mais est assez longue et nécessite beaucoup de main d'œuvre. Lorsque les surfaces à réparer sont plus importantes, on privilégiera plutôt le béton projeté, plus rapide, mais nécessitant une part plus importante de matériel.

La préparation de surface est une étape très importante pour la pérennité des réparations, elle doit être effectuée avec soins. Il s'agit dans un premier temps d'éliminer toutes les zones présentant une faible cohésion sur l'élément à reprendre.

C'est-à-dire qu'il faut vérifier chaque zone, afin de voir s'il n'y a pas de décollement du béton, de la fissuration apparente, des épaufrures, etc. Les zones de ségrégation doivent elles aussi être éliminées. [17]

S'il y a présence d'un phénomène de corrosion des armatures, il est nécessaire de dégager les aciers corrodés jusqu'à ce qu'une zone saine apparaisse. Pour être sûr de pouvoir effectuer une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant :

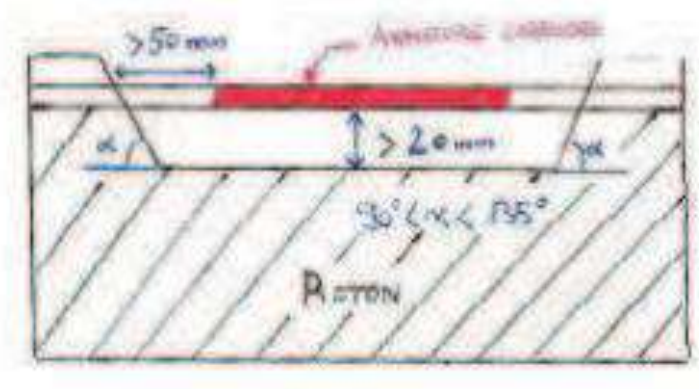


Figure IV-2 : Dégagement des armatures [17]

Une fois les armatures corrodées dégagées, il faut les nettoyer afin d'enlever toute trace de corrosion. Dans certains cas, la perte de section de l'acier peut s'avérer être très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature, soit par découpage de la zone atteinte et soudage d'une armature équivalente, soit en scellant une nouvelle armature dans le parement. Il est important qu'après cette opération, la section d'armatures soit au moins égale à celle présente initialement dans l'élément de la structure concernée.

Afin de limiter les risques d'apparition de la corrosion, les armatures doivent être passivées par application d'un produit convenablement choisi. Cette application peut se faire par différentes méthodes (par brossage, par application au pinceau, etc.)

Une fois les étapes précédentes réalisées, il est possible de commencer le ragréage. Il s'agit de reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide d'un mortier de réparation convenablement choisi par une entreprise possédant les compétences nécessaires. Il peut être intéressant de choisir de mettre des inhibiteurs de corrosion

directement dans la formulation de ce mortier afin de limiter au maximum l'apparition de corrosion dans les zones réparées.

Dans tous les cas le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Tenue verticale sans coffrage ;
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support ;
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support ;
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs ;
- De coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support;
- De bonne protection des aciers ;
- Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque « NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique». [20]

IV.1.2. Le béton projeté

La méthode du béton projeté est une alternative au ragréage. Elle est généralement utilisée lorsque les surfaces de béton à reprendre sont assez importantes.

Ceci s'explique par le fait que ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier. Lorsque les surfaces à réparer sont assez faibles, on privilégiera plutôt le ragréage, plus adapté aux petites surfaces. [14]



Figure IV-3 : Projection de béton [14]

IV.1.2.1. Technique de projection

Il existe principalement deux techniques de projection du béton. Elles se différencient par rapport à l'emplacement de l'introduction de l'eau de gâchage dans le matériau.

Il y a tout d'abord la méthode de projection par :

- voie humide : le béton gâché est transporté jusqu'à la lance soit par pompage soit par de l'air comprimé ;

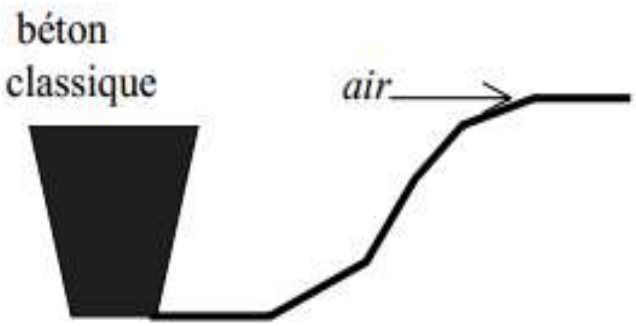


Figure IV-4: Projection par voie humide [14]

- Voie sèche : pour laquelle le mélange de ciment et de granulats, non additionné d'eau au moment du malaxage, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau étant ajoutée au dernier moment, en bout de lance.

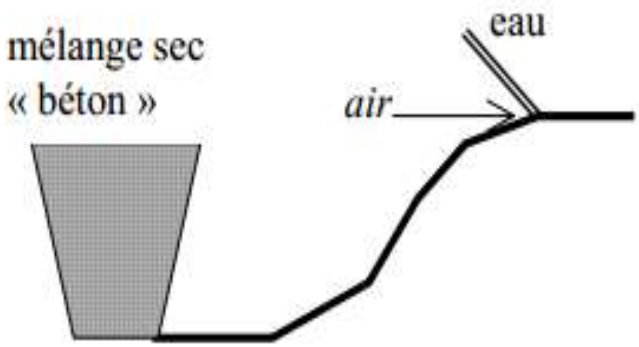


Figure IV-5: Projection par voie sèche [14]

IV.1.2.2. Choix et Principe de projection

Le choix de la technique à utiliser dépend de différents paramètres tels que la nature des matériaux utilisés, de la nature des travaux à effectuer ou encore des habitudes de l'entreprise. [16]

Le principe de la projection reste le même selon la méthode employée. Il consiste à :

- Malaxer, homogénéiser les matériaux à l'état sec ou humide
- Les transporter par canalisation, rigides ou souples, grâce à des pompes mécaniques ou à de l'air comprimé

- À projeter plus ou moins violemment, grâce à de l'air comprimé ; le matériau sur les supports à revêtir. [14]

Cependant, selon la méthode utilisée les résultats vont présenter quelques différences.

Par voie sèche, on obtiendra une résistance plus élevée que par voie humide du fait du faible rapport E/C. Mais on aura une capacité de production plus limitée, un dégagement de poussière plus important, mais surtout un risque de détérioration d'un support fragile.

Dans tous les cas, cette surépaisseur de béton est moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques. Le béton projeté n'étant pas encore carbonaté, il stoppe l'évolution de la carbonatation, le temps d'être lui-même complètement carbonaté. Il empêche également la pénétration d'humidité grâce à sa faible porosité, ce qui protège les armatures de la corrosion. De plus, il est possible d'ajouter des inhibiteurs de corrosion dans la formulation du béton, ce qui permet de rendre plus pérennes les réparations effectuées. [14]

IV.1.3. Tissus de fibres de carbone

Le renforcement par tissus de fibres de carbone peut se faire sur différents types de structures et sur les différents matériaux usuels de la construction tels que le béton armé ou non, le bois, ou les structures métalliques. Ce matériau est dit composite, car il s'emploie généralement avec une résine. Il présente beaucoup d'avantages, notamment liés à ses fortes caractéristiques mécaniques pour une masse volumique relativement faible.

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- sa faible densité
- ses propriétés mécaniques longitudinales
- l'absence de corrosion
- sa très bonne tenue à la fatigue
- sa facilité de manipulation.

Cependant, comme tout matériau il a des inconvénients. Les principaux sont les suivants :

- une anisotropie très marquée
- un comportement à la rupture de type fragile des composites
- un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier. [19]

Dans le cadre de la réhabilitation d'ouvrages en béton armé, la qualité du support est primordiale. Il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface

rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm. Les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergique. Cette technique peut être utilisée dans le renforcement d'un ouvrage, soit dans le cas de perte de section d'acier importante, soit lorsque la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter. Ce procédé consiste à placer des bandes de toile de fibres de carbone par collage aux endroits déficients de l'élément concerné. Il est à noter qu'une protection au feu est nécessaire afin de respecter la norme en vigueur. [13]

IV.2. Protection des ouvrages en béton armé

Après avoir diagnostiqué les différentes pathologies, puis réparer la structure, il peut être utile de prévoir une protection des ouvrages afin de rendre pérennes les réparations afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables. Il existe un grand nombre de protections possible. Elles sont à choisir selon ce contre quoi il est nécessaire de protéger la structure. [8] Chacune de ces méthodes permet soit de redonner au béton de bonnes caractéristiques mécaniques et chimiques soit de les protéger contre des attaques extérieures. Dans tous les cas cela permet à la structure concernée de rallonger sa durée de vie ainsi que ses capacités à absorber les attaques de l'environnement extérieur et de la vieillesse.

VI.2.1. Reconstitution de l'enrobage

De nombreuses méthodes existent pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Leur utilisation suppose une mise en œuvre attentive, un contrôle des résultats et une surveillance adaptée. [23]

IV.2.1.1. Principes et définitions

L'objectif de la reconstitution du parement est non seulement de restaurer l'apparence du béton mais aussi d'arrêter le processus de corrosion tout en rendant à la structure son intégrité. Il s'agit de réparations à caractère discontinu, ponctuel et superficiel pour lesquelles plusieurs précautions doivent être prises :

- si les zones dégradées sont visuellement identifiables (béton décollé, fissures, épaufrures, etc.), l'état des zones adjacentes (avoisinantes) n'est en général connu qu'après un diagnostic généralisé. Ainsi, les surfaces à dégarnir sont en général sous estimées lors de leur première évaluation ;
- si des zones présentent un risque de corrosion (béton carbonaté ou pollué par les chlorures), celles-ci peuvent se déclarer après un délai de quelques années, à côté de la

réparation, par l'apparition d'un couple galvanique entre la surface réparée et la surface adjacente. [23]

Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :

- l'apport de matériaux en surépaisseur peut modifier la section des éléments de la structure. Il est donc nécessaire de prendre en compte les charges qui en résultent ;
- l'enlèvement du béton dégradé ou pollué risque d'affaiblir ou de déséquilibrer la structure. Un phasage précis doit être mis en œuvre. Le recours à un étaiement peut s'avérer nécessaire ;
- des remplacements d'armatures seront à envisager selon des critères de décision (diamètre résiduel, longueur) décrits plus loin. L'objectif sera de rétablir la section d'origine.

Des étapes essentielles sont à respecter dont la préparation de la surface du support. [23]



Figure IV-6 : Reconstitution de l'enrobage [23]

IV.2.1.2. Elimination des zones dégradées

Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés sur toute la surface par un moyen mécanique ou chimique. Les produits de démolition doivent être mis en décharge ou recyclés, en conformité avec les textes réglementaires en vigueur sur la protection de l'environnement.

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse (sans trace de rouille) et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P95 95.102 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont

corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.[16]



Figure IV-7 : piquer les parties éclatées [16]

La phase d'élimination de la zone sous corrosion constitue l'une des tâches les plus délicates à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement dépend directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface et ceci sur toute la périphérie de l'acier par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.) Cette opération doit être plus particulièrement soignée en milieu marin car la rouille y est chargée de chlorures acides. Les surfaces de bétons sont ensuite nettoyées afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure subsistant après élimination des bétons dégradés. Ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage), mais dans le cas du lavage à l'eau, celle-ci doit être éliminée par soufflage ou par aspiration. [23]



Figure IV-8 : Nettoyage des surfaces [23]

IV.2.1.3. Remplacement des armatures

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 soudure afin de restituer la situation 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, celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée. [23]

IV.2.1.4. Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91 révisé 99, par exemple), pour un fonctionnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement. On devra également d'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). [23]

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.



Figure IV-9 : Protection des armatures [23]

IV.2.1.5. Etape de la réfection des bétons

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

- de tenue verticale sans coffrage ;
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support ;
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support ;
- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs ;
- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support ;
- de bonne protection des aciers.

Les produits de protection seront, de préférence choisis dans la famille des produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés. Ils doivent être conforme à la norme NFP 18-840 ou être admis à la marque « NF produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydrauliques ».

Cette marque définit notamment, pour les produits de réparation de surface, les caractères normalisés garantis (classe d'adhérence, tenue aux chocs, etc.)

Lorsque pour des raisons d'esthétique, des produits préformulés ne peuvent pas être appliqués, il conviendra d'étudier un mortier spécifique, de même texture, couleur et aspect de surface que le béton en place. Les mortiers doivent être peu sensibles au retrait, résister au gel et être durables. Une autre approche consiste à appliquer une première couche de produit certifié NF ou équivalent, afin d'assurer l'accrochage sur le béton support et une couche de finition pour l'aspect.

Enfin, il faut noter qu'il est difficile de masquer totalement des zones réparées localement. Parfois, ces zones réapparaissent sous forme de fantômes du fait des différences de comportements entre le béton support et le produit de réparation. Une solution peut consister à appliquer un produit de protection sur toute la surface. [23]

IV.2.2. Imprégnation

IV.2.2.1. Principes et définitions

Traitement du béton destiné à réduire la porosité de surface et à renforcer la surface, les pores et les capillaires étant partiellement ou complètement remplisses, le Traitement forme généralement un film discontinu à la surface du béton

Le plus souvent, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidant ou des hydrofuges qui se particularisent par leur fonction principale:

- Un produit consolidant attribue à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériau d'origine.

- Un hydrofuge forme une barrière interne au matériau, vis-à-vis de la pénétration de l'eau liquide, sans trop affecter la perméabilité à la vapeur d'eau.

Un hydrofuge est dit de surface, lorsqu'il est appliqué sur le béton durci. Il n'est ni un imperméabilisant, ni un anti graffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antisalissure, etc.). Les consolidant et les hydrofuges n'ont pas d'action directe sur la protection contre la corrosion des armatures. Mais ils peuvent être utilisés comme traitement complémentaire [6].

Seuls les hydrofuges de surfaces seront traités ici. Les traitements hydrofuges s'insèrent dans une procédure globale de réparation.

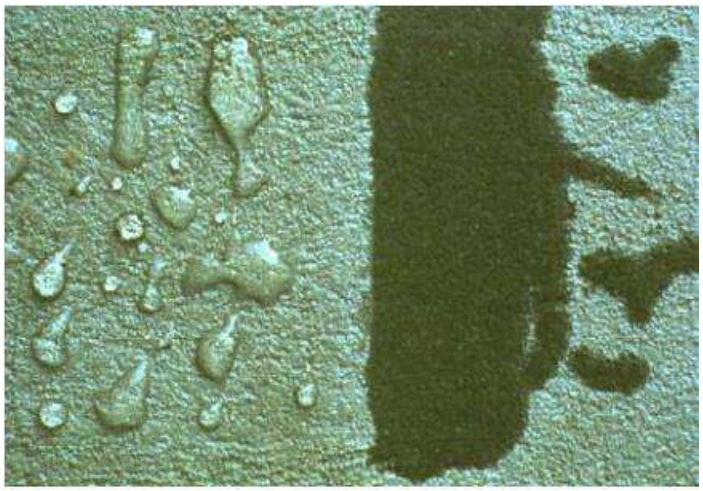


Figure IV-10 : Action d'un produit hydrofuge [6]

IV.2.2.2. Classification des produits hydrofuges

Les produits hydrofuges peuvent être classés en fonction de la nature chimique de leur constituant de base. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés. Mais il existe aussi des hydrofuges acryliques, des résines fluorées et d'autre. La classification des hydrofuges tient compte de la taille des molécules. Pour une application donné, il convient de choisir le produit qui adapté à la porosité du béton traiter.

IV.2.2.3. Procédure de choix et d'application

Le choix de produit, comme le choix de la procédure d'application ne pourront être réalisés qu'après un diagnostic et des essais préliminaires.

IV.2.2.4. Diagnostic

Avant traitement du béton par un hydrofuge, il est essentiel de définir si cette action est utile et compatible aussi bien avec le matériau à traiter qu'avec son environnement. La première étape du traitement consiste à préciser dans le diagnostic:

- La nature est l'étendue des altérations qui affectent le matériau,

- L'absence de fissure ou de délamination du béton,
- L'origine des dégradations,
- Les caractéristiques principales du béton à traiter (notamment sa porosité),
- Et enfin si aucune ne contre indication ne s'oppose au traitement.

IV.2.2.5. Choix du produit et essai préliminaires

Le choix d'une famille d'hydrofuges est réalisé après caractérisation préalable du support, et aussi après avoir clairement défini les conditions de la mise en œuvre sur chantier. L'efficacité et la durabilité du traitement hydrofuge sont optimisées, en distinguant un produit particulièrement adapté au support et à ses propriétés physiques (taille de pores, couleur, etc.), l'optimisation est faite à partir d'essais de convenance.

IV.2.2.6. Procédure d'application

Les principales techniques d'application sont le pinceau, le rouleau et le pulvérisateur pour les silicones et le pulvérisateur ou le pistolet "airless" [6].

Les conditions climatiques sont particulièrement importantes pour le processus de polymérisation. C'est pourquoi, il convient de respecter les notices techniques [11], afin d'éviter une polymérisation trop rapide par temps trop chaud ou trop lente par temps trop froid et humide [6, 7].

Enfin, le support doit être réparé et propre. Mais en plus, les indications de la fiche technique du produit concernant l'humidité du support, doivent être respectées.

IV.2.3. Inhibiteur de corrosion

IV.2.3.1. Principes et définitions

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif ralentit le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu. [21]

Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

- de pénétrer une couche de béton très hétérogène par nature (variations de compacité notamment) ;
- d'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans affecter ses propriétés (ni celles du milieu environnant) ;
- d'être stable dans le milieu considéré et compatible avec celui-ci, à la température d'utilisation ;
- d'être efficace à la concentration recommandée ;
- de ne pas être toxique.

Par ailleurs, la teneur en inhibiteur doit être réglée, en tenant compte de divers paramètres tels que les facteurs géométriques ou la bonne forme des matériaux, leur état de surface, etc.

La corrosion étant un processus électrochimique, l'action de l'inhibiteur se fait au niveau de l'une des réactions élémentaires du mécanisme de cette corrosion, et plus particulièrement au voisinage immédiat de la surface : transport des espèces réactives, formation d'intermédiaire, absorption, etc.

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être divers. L'inhibiteur recouvre (adsorption) la surface du métal, et réduit les surfaces de réactions élémentaires. Il peut former également des composés avec le métal et le liquide environnant et modifier les réactions d'interface. Dans les deux cas, la vitesse de corrosion peut être ralentie voire annulée. [21]



Figure IV-11 : Application d'inhibiteur [21]



Figure IV-12 : Application d'inhibiteur [21]

Les inhibiteurs de corrosion sont classés selon leur mode d'action :

- **Les inhibiteurs anodiques :** ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ses surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier.
- **Les inhibiteurs cathodiques :** induisent une augmentation de la surtension cathodique et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent les sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH^- sur les cathodes.
- **Les inhibiteurs mixtes :** ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques.

IV.2.3.2. Etat de l'art

Le système de maîtrise de l'efficacité du traitement est propre à chacun des composants chimiques de base.

Lors de l'utilisation pour le béton armé d'un inhibiteur appliqué sur le parement, il est demandé au produit :

- d'avoir une action rapide et vérifiable ;
- d'être performant pendant plusieurs années ;
- d'être efficace en milieu basique, neutre (carbonatation), voire acide (en présence de chlorures, la surface métallique en voie de corrosion dans les cellules occluses, est au contact d'acide chlorhydrique). [21]

IV.2.3.3. Domaine et limites d'emploi

La délimitation précise du champ d'application dépend de l'inhibiteur considéré.

Les paramètres d'efficacité à prendre en compte lors d'une étude sont les suivantes :

- L'influence de l'état de surface de l'acier : (absence de discontinuité acier/béton) : l'utilisation des inhibiteurs de corrosion permet de protéger l'ensemble des aciers en situation de risque de corrosion, sans avoir à purger le béton contaminé ou carbonaté, à condition qu'aucun phénomène d'épaufrure ou de décollement acier/béton n'ait débuté.
- La pénétration du produit : La pénétration des inhibiteurs à l'intérieur d'un béton dépend de nombreux paramètres : porosité du béton, humidité, degré de carbonatation,

etc. Ainsi, cette pénétration ne peut pas, à ce stade des connaissances, faire l'objet d'une modélisation précise. Par conséquent, il est toujours nécessaire de vérifier la pénétration de l'inhibiteur par les tests de validation in- situ.

- La concentration minimale efficace au droit des armatures.

Celle-ci doit être précisée par le fabriquant, sur la base de résultats d'essai représentatifs, en tenant compte notamment de la teneur en chlorures dans le béton au droit des armatures (limite d'efficacité).

Le recours aux inhibiteurs permet de conserver au maximum l'aspect initial de l'ouvrage et de réduire les zones à dégarnir.

IV.2.3.4. Procédure d'application

Avant d'appliquer un inhibiteur, la surface du béton doit être préparée. Il s'agit d'éliminer la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydro sablage. Il est à noter qu'un traitement par inhibiteur n'est pas possible si la surface a été préalablement traitée avec un hydrofuge.

Un inhibiteur qui est sous forme liquide s'applique directement à la surface du béton. Afin de respecter les consommations prescrites par la notice technique ou par les procédures définies pendant la phase de validation, l'application s'effectue en plusieurs passes.

Les solutions gélifiées s'appliquent en une fois.

IV.2.4. Le revêtement imperméabilisant

IV.2.4.1. Principes. Définitions. Etat de l'art

Les revêtements de surface, permettant de protéger la structure contre des attaques, sont décomposés en différentes catégories, elles sont décrites dans la suite.

Chaque type de revêtement a son propre mode d'application.

Les revêtements imperméabilisants sont généralement des systèmes multi couches appliqués à titre curatif. Leur fonction principale est de pallier aux désordres affectant la structure en ayant par exemple une fonction d'imperméabilité à l'eau liquide. Il est nécessaire qu'ils aient une élasticité suffisante afin de pouvoir résister à la fissuration du support.

Le DTU 42.1 définit le mode opératoire d'application de ces revêtements. Les produits utilisés doivent être choisis en fonction des pathologies répertoriées lors du diagnostic. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 quant à leurs caractéristiques (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique). [18]



Figure IV-13 : Application de la finition [18]

IV.2.4.2. Les peintures

La « mise en peinture » désigne la protection par système de peintures ou lasure dans des épaisseurs sèches comprises entre 20 et 600 um.

Les systèmes de peinture s'appliquent dans des quantités humides totales allant de 300 à 1500 g/m^2, selon la densité et l'extrait sec, les lasures dans les quantités restantes inférieures à 300 g/m^2, mais pouvant varier selon l'absorption du support. Un système de peinture est constitué d'une succession de couches, qui ont chacune un rôle spécifique, en vue d'obtenir un revêtement final présentant les caractéristiques escomptées.

Une peinture est constituée :

- d'un liant (aussi appelé résine ou polymère) : la nature chimique du liant permet de désigner la peinture ; il s'agit, par exemple, de peinture époxydique, polyuréthane, vinylique, acrylique ou hydraulique modifiée par des résines ;
- de matières de charge : elles confèrent à la peinture des caractéristiques physiques particulières (rhéologie, aspect...) ;
- de pigments : ils apportent la couleur, l'opacité ;
- d'additifs : il peut s'agir d'agents mouillants, thixotropes, fongicides ;
- d'un véhicule : eau (peinture dite en phase aqueuse), ou solvant (peinture en phase solvant). Il existe aussi des peintures avec très peu, voire sans véhicule.

Le plus souvent, un système de peinture comporte 3 couches :

- la couche primaire qui assure l'adhérence du système sur le support ;
- la couche intermédiaire qui assure la compatibilité entre la couche primaire et la couche de finition et donne au système une épaisseur suffisante ;
- la couche de finition qui apporte la fonction esthétique et assure la résistance du système aux agressions extérieures.

La performance d'un système de peinture dépend de l'épaisseur de chaque couche et du respect de ces épaisseurs.

Les peintures peuvent être mono ou bi-composants ; dans ce dernier cas, la peinture est obtenue à partir d'un mélange base - durcisseur ou ciment et latex. [8]

IV.2.4.3. Les lasures

Les lasures sont utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture superficielle d'un parement en béton. Elles sont incolores ou colorées et contrairement à une peinture, elles ne sont pas opacifiantes.

Une lasure est composée :

- de liant (généralement de type acrylique ou polyuréthane) ;
- d'un véhicule (eau, solvant) ;
- de pigments ou colorants ;
- éventuellement de matières de charge. [8]

Une lasure est généralement appliquée en deux couches, la première étant diluée.

IV.2.4.4. Les revêtements minces

Sont inclus dans cette catégorie :

- Les revêtements plastiques épais contenant généralement des éléments à base de résines acryliques ou polyuréthannes
- Les revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique
- Les revêtements divers à base de polyuréthane. [8]

IV.2.4.5. Les enduits de façade

On distingue deux catégories dans les enduits de façade :

- Les enduits traditionnels, exécutés selon le DTU 26.1 en trois couches distinctes
- Les enduits monocouche prêts à l'emploi.

Dans tous les cas ce sont des enduits à base de liants hydrauliques et ou de chaux aérienne. [15]

IV.2.5. La déchloruration

IV.2.5.1. Définition

Au fil du temps et selon l'environnement ambiant, des éléments chlorures présents dans l'atmosphère pénètrent dans le béton. Ces éléments favorisent l'apparition et le développement de la corrosion des aciers dans le béton armé. Ce phénomène est amplifié lorsque la présence de chlorures est importante par exemple pour les milieux salins, mais aussi dans le cadre de la réfection des bétons du bâtiment « La Saline » de la Compagnie

des Salins du Midi et des Salines de l'Est. Cela étant dû directement à l'activité qu'abrite ce bâtiment. [8]

IV.2.5.2. Principes

Le principe de la déchloruration est d'extraire ces éléments chlorures du béton afin de limiter leur impact sur les armatures présentent dans l'élément. Pour ce faire, l'extraction des chlorures nécessite de polariser une armature aux alentours du parement en utilisant une anode placée sur le parement et enrobée d'un électrolyte.

Ainsi peut circuler un courant de polarisation, de l'anode vers la cathode (l'armature).

IV.2.5.3. Techniques de déchloruration

Pour l'heure, il existe principalement deux techniques d'extraction des chlorures :

- ✓ Par courant imposé : lorsqu'un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature ;
- ✓ Par courant galvanique : lorsqu'un alliage jouant le rôle d'anode est directement relié à l'armature.

Cependant, cette méthode est réalisable seulement dans les cas où il existe une continuité électrique des armatures, il est toujours possible de relier électriquement les armatures isolées à l'aide de pontages électriques. Il est aussi nécessaire d'avoir procédé à la réfection des parements avant l'application de la ré-alcalinisation afin d'éviter toute forme d'hétérogénéité.

L'action possible de ce traitement est limitée à l'enrobage des armatures. Il n'est pas possible d'extraire les chlorures au-delà du premier lit d'armatures.

Dans le cas d'utilisation du système par courant imposé, le principe de mise en œuvre est le suivant :

- Projeter une couche de pâte (cellulose ou de laine de roche) sur laquelle on appliquera une solution électrolytique (carbonata alcalin)
- Mettre en place un treillis anodique métallique sur des baguettes isolantes, fixées au parement
- Connecter les fils de l'anode au treillis
- Projeter une deuxième couche de pâte
- Effectuer les raccordements électriques au générateur de courant continu ayant une tension réglable de 10 à 48 volts
- Humidifier périodiquement la pâte par l'électrolyte
- Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements

- d'échantillons en cours de traitement afin d'effectuer des analyses sur l'efficacité du traitement
- Déposer l'ensemble de l'installation
- Rincer la structure à l'eau basse pression.

Dans le cas d'utilisation du système anodique, le principe de mise en œuvre est le suivant :

- Projeter une couche de pâte saturée en électrolyte sur le béton
- Mettre en place l'anode métallique fixée d'une part sur une baguette l'isolant du parement béton et d'autre part en contact avec la pâte saturée en électrolyte
- Connecter l'anode au circuit électrique, c'est à partir de la que le traitement se met en route
- Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons de béton pour analyser l'évolution du traitement.

Afin de vérifier si l'extraction des chlorures est convenable, il est possible d'effectuer des prélèvements d'échantillons avant et après traitement pour pouvoir quantifier le résultat du traitement. [8]

IV.2.6. La ré-alcalinisation

IV.2.6.1. Principes. Définitions

Le principe de base de la ré-alcalinisation est de donner au béton un pH permettant de passiver les aciers. Initialement, le béton lors de sa mise en œuvre à un pH aux environs de 13. Suite à sa carbonatation, le pH du béton diminue jusqu'aux environs de 9, à ce moment-là, les armatures ne sont plus protégées. Une ré-alcalinisation permet de redonner au béton son pH d'origine. Ce traitement est dit temporaire, car il dure généralement entre une et six semaines selon le degré d'avancement de la carbonatation. [8]

Pour effectuer une ré-alcalinisation, il est nécessaire de polariser une armature aux alentours du parement en utilisant une anode placée sur le parement et enrobée d'un électrolyte. Ainsi peut circuler un courant de polarisation, de l'anode vers la cathode (l'armature).



Figure IV-14 : Traitement en cours [8]

IV.2.6.2. Techniques de ré-alcalinisation

Tout comme pour la déchloruration, il existe principalement deux techniques de ré-alcalinisation.

- ✓ Par courant imposé : lorsqu'un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature ;
- ✓ Par courant galvanique : lorsqu'un alliage jouant le rôle d'anode est directement relié à l'armature.

Cependant, cette méthode est réalisable seulement dans les cas où il existe une continuité électrique des armatures, il est toujours possible de relier électriquement les armatures isolées à l'aide de pontages électriques. Il est aussi nécessaire d'avoir procédé à la réfection des parements avant l'application de la ré-alcalinisation afin d'éviter toute forme d'hétérogénéité.

L'action possible de ce traitement est limitée à l'enrobage des armatures. Il n'est pas possible de ré-alcaliniser au-delà du premier lit d'armatures.

Dans le cas d'utilisation du système par courant imposé, le principe de mise en œuvre est le suivant :

- Projeter une couche de pâte (cellulose ou de laine de roche) sur laquelle on appliquera une solution électrolytique (carbonata alcalin)
- Mettre en place un treillis anodique métallique sur des baguettes isolantes, fixées au parement
- Connecter les fils de l'anode au treillis
- Projeter une deuxième couche de pâte
- Effectuer les raccordements électriques au générateur de courant continu ayant une tension réglable de 10 à 48 volts

- Humidifier périodiquement la pâte par l'électrolyte
- Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements
- d'échantillons en cours de traitement afin d'effectuer des analyses sur l'efficacité du traitement
- Déposer l'ensemble de l'installation
- Rincer la structure à l'eau basse pression.

Dans le cas d'utilisation du système anodique, le principe de mise en œuvre est le suivant :

- Projeter une couche de pâte saturée en électrolyte sur le béton
- Mettre en place l'anode métallique fixée d'une part sur une baguette l'isolant du parement béton et d'autre part en contact avec la pâte saturée en électrolyte
- Connecter l'anode au circuit électrique, c'est à partir de la que le traitement se met en route
- Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons de béton pour analyser l'évolution du traitement
- Déposer l'ensemble de l'installation
- Rincer la structure à l'eau basse pression

Afin de vérifier l'efficacité de la ré-alcalinisation, il est possible de procéder à des tests sur l'épaisseur de carbonatation avant et après traitement pour pouvoir comparer les résultats. Ce test se fait généralement à la phénolphtaléine.



Figure IV-15 : Application de la pâte sur le treillis [8]

IV.2.7. La protection cathodique

IV.2.7.1. Principes. Définitions

Pour le cas du béton armé, la protection cathodique des armatures est un traitement, qui contrairement à l'extraction des chlorures ou la ré-alcalinisation, appliqué

de façon permanente. Il a pour but de ralentir, voire même d'arrêter la corrosion. Le principe est d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection. Lorsque cette valeur est atteinte, on peut considérer que la vitesse de corrosion dans l'acier est négligeable. Ceci peut se faire en polarisant une armature présente dans le béton avec une anode placée soit sur le parement soit dans l'enrobage. Puis il faut appliquer un courant de polarisation, circulant de l'anode vers l'armature. [8]

IV.2.7.2. Techniques de La protection cathodique

De même que pour la ré-alcalinisation et l'extraction des chlorures, il existe principalement deux méthodes de réalisation.

- ✓ par courant imposé : avec un générateur électrique placé entre l'anode et l'armature,
- ✓ par courant galvanique : avec une anode sacrificielle directement reliée à l'armature.



Figure IV-16 : Mise en place du treillis anodique [8]

Il est tout d'abord important d'effectuer des travaux préalables avant l'application de la protection cathodique. En effet, il est nécessaire d'éliminer le béton dégradé ainsi que les bétons de réparations antérieurs, car ils peuvent présenter une résistivité différente.

Il faut aussi enlever la rouille non adhérente sur les armatures ainsi que de rétablir une continuité électrique des aciers. Enfin, il est nécessaire de reconstituer l'enrobage tout en veillant à avoir une distance minimale de vingt millimètres entre l'armature et le parement extérieur.

L'entreprise effectuant ces travaux doit procéder au calcul de dimensionnement des anodes ainsi que de la capacité du générateur. Cela a pour but de déterminer les caractéristiques de l'installation à mettre en œuvre telle que le type et les quantités

d'anodes à mettre en place, le courant total nécessaire, etc. Ces paramètres sont directement fonction de la dimension des armatures à traiter.

Une note de calcul doit indiquer le nombre et l'emplacement des zones anodiques, la consommation en courant pour chaque zone, le type d'anode choisi, le nombre et l'emplacement des capteurs de surveillance et de contrôle.

Les étapes de la mise en œuvre de la protection cathodique sont les suivantes :

- Forer des trous dans le parement en béton afin de mettre à nu des armatures et les connecter au réseau électrique
- Les anodes sont soit plaquées à la surface du parement soit enfouies dans le béton, il est nécessaire de les enrober avec du mortier
- Installer des capteurs afin de pouvoir suivre l'efficacité de l'installation
- Vérifier la continuité
- Mettre en service l'installation. [8]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes méthodes de réparation et de confortement d'un ouvrage en béton armé. Quelle que soit la méthode, le principe est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de combler le manque de section par ajout d'un autre matériau. Dans tous les cas, le but est de faire en sorte que la structure puisse reprendre à nouveau les charges qui lui sont appliquées voir de pouvoir reprendre un supplément de charge si cela s'avère nécessaire pour que l'ouvrage réponde aux attentes et à l'évolution des besoins des utilisateurs ou des propriétaires.

Chapitre V : Exemple d'étude et Réparation d'un cas pathologique

Introduction

Les matériaux de construction ont sans exception une durée de vie limitée, le béton et le béton armé, dont nous avons une expérience de durabilité de l'ordre d'un siècle n'échappent pas à cette règle.

Tout le monde s'accorde aujourd'hui pour admettre que les constructions en béton subissent des dommages dans le temps d'où la nécessité de les entretenir et de les protéger.

Le point faible du béton armé qui met la plus en péril sa pérennité et son armature en effet la corrosion des parties métalliques constitue un danger potentiel pour la conservation et la stabilité des bâtiments. Ce phénomène se traduit par l'apparition en surface exposée à l'extérieur de différentes altérations (tache de rouille, fissures, et épaufrures…etc.).

Le travail qui nous avons fait, consiste à trouvé un cas pathologique (corrosion) et établir une réparation à des désordres qui nous les retrouverons sur cet ouvrage.

Pour cela il est obligé de faire un diagnostique puits un analyse pour trouvé des solutions permet une bonne réparation.

V.1.Description de l'ouvrage

L'ouvrage se trouve à OUZERA plus exactement dans le quartier ENASRE

C'est un bâtiment de (R+3) à usage d'habitation, comporte un RDC et 3 étages.



Figure V-1 : présentation de l'ouvrage



Figure V-2 : présentation de l'ouvrage

V.2.Caractéristique géométrique de l'ouvrage

La hauteur totale du bâtiment est du 12,80 m, distribuée comme suite :

- Hauteur des étages est : 3,20 m.
- Hauteur de RDC : 3,20 m.



Figure V-3 : Caractéristique géométrique du bâtiment



Figure V-4 : vue générale du bâtiment

V.3.Description des désordres observés sur les escaliers

Des nombreux désordres ont été constatés sur cet ouvrage principalement fissuration et corrosion des armatures provoquant l'éclatement du béton d'enrobage.

Ces dégradations ont été observées dans les escaliers.



Figure V-5 : La partie dégradée de l'escalier



Figure V-6 : présence de la corrosion des armatures dans les escaliers

Les figures 06 et 07 illustrent les dégradations constatées, ces dernières se manifestent sous formes suivant :

- Epaufrure ;
- Corrosion des aciers d'armature ;
- Détérioration du béton d'enrobage ;
- Fissuration multidirectionnelle du béton.

V.3.1.L'épaufrure

- **Les causes**

1. La corrosion d'armature qui provoque des pressions et gonflement qui mène à l'éclatement ;
2. La mauvaise qualité du béton.

- **Les désordres**

L'exposition des armatures aux agents extérieures agressif ce qui facilité ensuite la corrosion des armatures.



Figure V-7 : éclatement du béton

V.3.2.Corrosion des aciers d'armature

- **Les causes**

1. La cause principale qui a provoqué cette corrosion c'est le problème d'infiltration d'eau qui diffusent à travers le béton de la dalle constituant l'escalier et qui s'évaporent à la surface du béton ;
2. La deuxième cause c'est l'absence des systèmes d'évacuation de l'eau
3. La troisième cause c'est la mauvaise qualité du béton ainsi que l'enrobage qui est mal réalisé.

- **Les désordres**

Le phénomène de corrosion des armatures, selon son stade d'avancement, engendre les désordres suivants (classés dans l'ordre croissant) :

1. Fissuration du béton au droit de l'armature ;
2. décollement du béton au niveau des armatures ;
3. armatures apparentes de plus en plus corrodées ;
4. armatures foisonnantes avec perte de section.

Ces désordres sont souvent favorisés par des défauts de mise en œuvre (enrobage insuffisant, ragréage) associés à la présence d'humidité.

Lorsque le stade de corrosion est avancé, les armatures corrodées sont souvent apparentes et des traces de rouille sont visibles.

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendant à la fois de la position des armatures (enrobage et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif).

Ce phénomène implique également une forte diminution du diamètre des armatures, ce qui diminue la résistance du béton armé et pouvant engendrer la rupture des escaliers dans le cas de forte corrosion en profondeur.



Figure V-8 : corrosion des armatures des escaliers

V.3.3.Détérioration du béton d'enrobage

- **Les causes**

Les causes de L'endommagement et l'éclatement du béton d'enrobage sont plusieurs :

1. La corrosion d'armature qui provoque des pressions et gonflement qui est ensuite traduit par des éclatements plus important des bétons d'enrobage ;
2. Erreur de réalisation (mise en œuvre) des sections d'enrobages c'est-à-dire diminution des sections de béton au droit des armatures ;
3. La mauvaise qualité du béton.

- **Les désordres**

Les conséquences du à l'éclatement du béton d'enrobage sont multiple :

1. L'exposition des armatures qui ont était couverte précédemment par le béton d'enrobage aux agents agressifs et notamment à l'air atmosphérique qui a provoqué la corrosion.
2. Une diminution importante des sections du béton qui a conduit par la suite à une diminution de la résistance.



Figure V-9 : éclatement de béton d'enrobage

V.3.4.Fissuration multidirectionnelle du béton

- **Les causes**

Les causes des fissurations du béton sont :

1. Corrosion des armatures provoque la fissuration par gonflement ;
2. L'humidité a aussi provoqué des microfissurations ;
3. Défauts de réalisation et surtout au niveau de la mise en œuvre du béton (retrait, ressuage,).

- **Les désordres**

Les dégradations ont crée un pont d'échange entre le béton et le milieu extérieur (facilité de mouvement et transport de l'eau et agents agressif a l'intérieure du béton).



Figure V-10 : présence de fissuration dans les escaliers

V.4.Elimination des désordres

- **Corrosion des aciers d'armature :** La corrosion des armatures est la dégradation la plus courante des ouvrages du génie civil.

V.4.1.Analyse des désordres

L'analyse des dommages de ces escaliers est une condition importante pour le choix de technologies et de matériaux adaptés à la réfection du béton.

On a plusieurs méthodes de test que l'on peut utiliser sans destruction des structures:

- Le test phénolphtaléine ;
- le détecteur d'armature (mesure de diamètre des armatures) ;
- mesures de potentiel….

V.4.1.1.Le phénomène de carbonatation (Le test phénolphtaléine)

La teneur en CO_2 de l'aire naturellement de 0.03% varie avec la température, la pression et le milieu (agglomération, industries…) et peut atteindre 0.01%.

La carbonatation se produit si l'humidité relative de l'aire se situe entre 50 et 75% ce dioxyde de carbone CO_2 réagit avec l'eau :

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

Lors de l'hydratation du ciment (processus de durcissement), il y a formation d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$, conférant à la pate de ciment un caractère fortement basique. Les fers d'armature obtiennent ainsi une protection naturelle contre la corrosion, la pénétration d'acide carbonique, Co2 normalement présent dans l'air, permet la formation de carbonate de calcium, CaCO3 :

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

La combinaison de l'hydrate de chaux (contenu dans le ciment) et l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, le pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence.

Le caractère basique du milieu et de ce fait la protection naturelle contre la rouille est ainsi perdu.

Le pH descend en dessous de 11-11.5 ce qui est un minimum pour la passivité. Dés ce point, l'acier en contact avec l'eau et de l'oxygène corrode.

Cette réaction, catalysée par l'humidité atmosphérique progresse de l'extérieur vers l'intérieur du béton et provoque la neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment, le milieu basique perd cette alcalinité et son pH devient inférieur à 9. La protection naturelle des armatures n'est alors plus assurée.

Le dioxyde de carbone attaque les ouvrages en béton lorsqu'il se transforme en H_2CO_3 en présence d'eau cet acide réagit avec la chaux présente dans le ciment hydraté le produit de la réaction est alors le $CaCO_3$ (calcite) pour avoir une carbonatation il faut donc de l'air, de l'eau et de la chaux. Tout ça est obtenu par l'infiltration d'eau de pluie chargée de carbone à l'intérieur du béton.

V.4.1.2.Test de contrôle

Solution de phénolphtaléine : c'est un indicateur du milieu alcalin lorsqu'il est en contact avec un milieu basique dont le ph est supérieur à 13 il nous donne une couleur rose à mauve.



Figure V-11 : Solution de phénolphtaléine

- Si la couleur du béton reste la même ce qui indique qu'on a un béton carbonaté ;
- Si la couleur du béton devient rose à mauve indique qu'on a un béton sain.



Figure V-12 : Test de la carbonatation

Nous pouvons indiquer un test simple pour contrôler le degré de carbonatation. Nous utiliserons à cet effet un détecteur chimique (ou indicateur) qui indiquera un environnement

alcalin ou non. C'est une solution de 1 gr de phénolphtaléine dans 50ml d'alcool (méthanol) et 100ml d'eau. Cette solution doit être déposée sur une surface du béton fraichement mise en contact avec l'air. Si une couleur mauve apparait, c'est la preuve d'un environnement suffisamment alcalin. La phénophtaléine est un indicateur acide-base simple utilisé pour déterminer la teneur en chaux mais elle n'est efficace que jusqu'à une certaine profondeur.

D'après l'essai qu'on a fait sur l'escalier sur les quels apparait des taches blanches et des tache de rouille, on a remarqué que la couleur du béton reste la même sans aucun changement, ceci justifie le phénomène de carbonatation

V.5.Réparation des désordres

Des nombreux désordres ont été constatés sur cet ouvrage principalement fissuration et corrosion des armatures provoquant l'éclatement du béton d'enrobage.

Ces dégradations ont été observées sur les escaliers. Donc on va les réparer soigneusement et sans faire oublier de l'entretenir régulièrement.

On peu dire qu'on doit procéder une réparation structurelle parce que les armatures sont très touchées et corrodées.

1. Avant d'entamer la préparation du support, on doit prendre les précautions de sécurité nécessaire afin d'assurer la stabilité de la construction ;
2. Dénuder l'armature rouillée jusqu'à la disparition de toute amorce de corrosion visible.
3. Nettoyer toute la surface du béton ;
4. Dépoussiérage toutes les parties nettoyées à l'air comprimé exemple d'huile ou à l'eau à haute pression ;
5. Protection des armatures dérouillées elles sont immédiatement recouvertes de deux couches de peinture de protection anticorrosion à base minérale ;
6. Application d'un revêtement de protection anticorrosion sur les aciers d'armature préparés ;
7. Remplacement de l'armature corrodée en stade avancée ;

Pour les sections d'armature visiblement réduite, on opte en connaissance de la cause qui est la carbonatation, on opte pour les solutions suivantes :

- on coupe et on élimine les parités qui sont vraiment touchées ;
- on remplace l'armature à condition de prévoir un ancrage suffisant ;
- on applique des armatures de renfoncement tout en indiquant le diamètre et la longueur des barres et leur emplacement.

8. Remplissage des parties éclatées Recouvertes d'un pont d'adhérence ;
9. Application de la peinture de protection pour béton à haute protection contre la carbonatation.

Conclusion

Notre but principal est de garantir aux constructions une durée de vie plus longue possible et pour arriver à ça il faut assurer une étude correcte, une bonne réalisation et surtout respecter les règles et les normes de conception pour éviter tout les désordres possibles.

Dans ce chapitre on a essayé de présenter les diagnostiques et réparations réalisé sur un ouvrage dégradé. L'un des abject de cette étude était de déterminer les causes de dégradation du béton. Les résultats des investigations convergent vers une corrosion d'armature qui engendre l'éclatement du béton.

Pour réparer ce problème on a utilisé des méthodes de réparations simples et efficaces.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La corrosion des armatures du béton est la cause la plus importante de l'altération des structures. Bien qu'identifiés depuis de nombreuses années, les mécanismes physico-chimiques des réactions sont très difficiles à étudier car ils se produisent au sein du matériau hétérogène.

La corrosion des armatures dans le béton armé est un sérieux problème pour la pérennité des structures. Dans le monde, des sommes importantes sont engloutis, chaque année dans la réparation de ces structures endommagées par ce phénomène, sans compter les conséquences que peuvent avoir des travaux de construction et de réfection répétés sur l'environnement.

Plusieurs méthodes de protection des ouvrages en béton armé contre les éclatements et la délamination du béton engendrés par la corrosion des armatures sont préconisées. Aucune d'elles n'est applicable dans tous les cas. Rappelant que chaque procédé ou traitement doit comporter quatre étapes allant de l'évaluation de la structure ; à la compatibilité entre les procédés et les exigences diverses en passant par la nature et cause des éventuelles de dégradations, notamment le choix entre les solutions sur le plan technique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] CHANVILLARD G., «Le matériau béton: Connaissances générales», Les cours de l'ENTPE, édition ALEAS, Octobre, 1999.

[2] Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Documents techniques et scientifiques AFGC/Ce fracor 2003

[3] COCHARD (C.) et TACHÉ (G.), « La dégradation du béton armé liée à la corrosion des armatures le long du littoral breton ». Matériaux e t Construction, no 10-11 (1993).

[4] GUERRIN (A.) et LAVAUR (R.C.). « Traité de béton armé. Tome I : Généralités. Propriétés générales ». Mécanique expérimentale du béton armé. 356 p., 16 éd., 1973, Dunod.

[5] TACHE G. & VIE D., «Diagnostic des ouvrages en béton armé, facteurs de vieillissement des ouvrages», Centre expérimental du bâtiment et des travaux publics. CEBTP, annales du bâtiment et des travaux publics, Février, 1998.

[6] GODART (B.) et LE ROUX (A.), « Alcali-réaction dans le béton : mécanisme, pathologie et prévention C 2252 ». Traité Construction (1995).

[7] Réparation et renforcement des structures –FABEM –Guide du STRES. 2010

[8] Protection des bétons –FABEM –Guide du STRES.2010

[9] AFREM-AFPC (« Application des méthodes microscopiques à la caractérisation microstructurale des bétons »)

[10] DELYOE (F.X.), BOUSSION (R.), MASSIP (M.), OLIVIER (G.) et R ANGEARD (D.), « Mesure de la profondeur de carbonatation du béton ». Projet de méthode d'essai, no 17, LCPC, Service chimie, nov. 1986.

[11] MAMILLAN (M.), « Restauration des bâtiments en béton armé C 2350 ». Traité Construction (1994).

[12] TACHE G. (2008) « Détermination de la vitesse de propagation du son dans le béton», Notice explicative d'avril 2008

[13] PERCHAT (J.). « Règles BAEL. Pathologie et réparation des ouvrages C 2317 ». Traité Construction (1998).

[14] Béton projeté –FABEM –Guide du STRES.2010

[15] LEJEUNE (Ch.). « L'enduit monocouche, complément indispensable de façades ». CSTB Magazine no 43, avril 1994.

[16] NF P 95102 Béton projeté

[17] NF P 95 103 Traitement des fissures et protection du béton

[18] DTU 42/1 (NF P 84-404) Imperméabilisation des façades

[19] Pathologie et réparation des ouvrages en béton, de stockage et de transport des liquides septembre 1996

[20] Renforcement, réparation des structures, Annales ITBTP janvier/février 1983.

[21] SOCOTEC (1999), Les désordres dans le bâtiment, 270 solutions pour les éviter, Le Moniteur, Paris, France,

[22] Encyclopédie du bâtiment, Introduction à la pathologie des bâtiments, Edit. WEKA, Paris, France

[23] S.M. JHONSON traduit par LONDEZ M. (1969), Dégradation, entretien et réparation des ouvrages de génie civil, Edit. Eyrolles, Paris, France,

[24] VICTOR-BELIN N., Prévenir construire, responsabilités et assurances dans le bâtiment, Le Moniteur, Paris,

[25] [Tuutti, 1982] TUUTTI K.; « Corrosion of Steel in Concrete"; Swedish Cement and Concrete Research Institute; S-100 44; Stockholm (1982).

[26] [Garboczi, 1998] GARBOCZI, BENTZ, 1998- Multiscale analytical/ numerical theory of the diffusivity of concrete pp. 77-88.

[27] [Powers, 1947] POWERS T.C., BROWNYARD T.L.; « Studies of the physical properties of hardened cement paste. American Concrete Institut Journal; 1947; vol.43; Parties 1 à 9.

[28] [BRE, 1997] J. G. M. Wood and J. Crerar; "Tay road bridge: Analysis of chloride ingress variability & prediction of long term deterioration"; 10 novembre 1997. Structural Studies & Design Ltd, Chiddingfold, UK Paper to seminar at Building Research Establishment; Construction and Building Materials; Volume 11, Issue 4, June 1997, Pages 249-254; Corrosion and Treatment of Reinforced Concrete.

[29] [Castel, 2000] CASTEL A., « couplage mécanique et corrosion dans les éléments de béton armé», doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.

[30] [Liu, 1998] ; LIU T.et WEYERS R.W.; "Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures"; Cement and Concrete research; Vol.28; Issue 3; Mars 1998; pp.365-379.

[31] [Cornell, 2003] CORNELL R.M., SCHERTMANN U.; "The Iron Oxides"; WILEY-VCH; Germany; 2003; 664 p.

[32] [Marcotte, 2003] MARCOTTE T., HANSSON C.M., « The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water"; Journal of Materials science; Vol. 38; 2003; pp.4765-4776

[33] [Lacombe, 1990] LACOMBE P., BAROUX B., BERANGER G. : Les aciers inoxydables ; 2èmeédition ; Les Ulis : Les éditions de physique ; 1990.

[34] [Laurens, 2001] LAURENS S., Thèse 2001, Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage- aide au diagnostic de la corrosion des armatures.

[35] [Dous, 2002] DOUS O., RHAZI J., BERTRAND L. ; «Auscultation des dalles en béton armé par des techniques de contrôle non destructif » ; Sherbrooke ; 2002

[36] [Klysz, 2004] KLYSZ G., « Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar : exploitation de l'onde directe émetteur-récepteur »; Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier- Toulouse III.

[37] [Sbartaï, 2005] SBARTAI Z. M. , LAURENS S., RHAZI J. , BALAYSSAC J-P., BALLIVY G., ARLIGUIE G. ; « Evaluation non destructive du risque de corrosion par mesures radar et de résistivité électrique : expérimentation en laboratoire et application in situ » ; Congres International, Réhabilitation des Construction et Développement Durable , Alger, 3-4 mai 2005, pp 25-33.

[38] [François, 1994] FRANCOIS R., ARLIGUIE G., MASO J.C. ; « Durabilité du Béton Armé » ; Rapport de synthèse ; LMDC INSA UPS Toulouse ; 1994.

[39] Ollivier. J.P,Vichot. A, La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chossées, 840 pages 2008.

[40] Page C.L, Lambert P, Vassie P.R.W, Investigation of reinforcement corrosion I: The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete, materials and structures 24 (1991)

[41] Thiery. M, Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005