REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

CAUSES DE DEGRADATION DU BETON EN ALGERIE

Présenté par

MAHMOUDI Ismail

MAIZI Houcine

Proposé et Dirigé par

Mr. ZEMIR Ismail

Promotion 2019

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Mr. ZEMIR Ismail pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée.

Nos sincères remerciements vont à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à Notre formation.

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance aux responsables et tout le personnel « centre national de l'ingénierie de construction » et «centre de diagnostic et d'expertise» pour leurs aides et leurs encouragements qui n'ont épargné aucun effort pour que notre recherche bibliographique se déroule dans de meilleures circonstances

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Et nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A toute ma famille MAHMOUDI, et mes amis,
A mon binôme HOUCINE et toute la famille MAIZI.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon
chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude,
et frères de cœur,

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A toute ma famille MAIZI, et mes amis,
A mon binôme ISMAIL et toute la famille MAHMOUDI.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon
chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude,
et frères de cœur,

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résume

Liste des illustrations, tableaux et graphiques

Introduction général……..1

Chapitre I : Dégradations du béton armé

I.1. Dégradations mécaniques 5

I.1.1Chocs 5

I.1.2 Abrasion, Erosion 5

I.1.3 Déamination 5

I.2. Dégradations Chimiques 5

I.2.1Réaction d'alcalis granulats 5

I.2.2. Attaques Sulfatiques 6

I.2.3. Attaques Acides 8

I.2.4. L'attaque des chlorures 9

I.2.5. Lixiviation 11

I.3. Dégradations Physique Mécanismes développés par le gel et les sels d'éverglaçage 11

I.3.1. Cycles dé gel-dégel 12

I.3.2. Sels dé déverglaçagé 12

I.3.3. Tassement 13

I.4.Types de pathologie 13

I.4. a. Pathologies à risque moyen 13

I.4. a.1. Faïençage 13

I.4. a.2. Epaufrure 14

I.4. a.3. Lichen 14

I.4. a.4. Le ressuage 15

I.4. b. Les pathologies à risque élevé 15

I.4. b.1. Retrait 15

I.4. b.2. La Fissure 16

I.4. b.3. Les Lézardes 17

I.4. b.4. La carbonatation 18

I.4. b.5. La corrosion 22

I.5 .Conclusion 28

Chapitre II : Caractérisation, Diagnostic

II.1. Introduction. Objectifs du diagnostic 30

II.1.1. Place du diagnostic 30

II.1.2. Cas particulier de la corrosion des armatures 30

II.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion..... 31

II.1.4. Procédure à suivre 31

II.2. Visite préliminaire 31

II.3. Inspection détaillée 32

II.3.1. Préparation de l'inspection 32

II. 3.2. Inspection 32

II.4. Investigations in situ 33

II.4.1. Méthodes de mesure de la corrosion des armatures dans le béton 33

II.4.1.1. Généralités..... 33

II.4.1.2. Méthodes non destructives 33

II.4.1.2.1. Relevé visuel……..34

II.4.1.2.2. Le relevé du ferraillage……..……35

II.4.1.2.3. L'auscultation sonique ……..……36

II.4.1.2.4. Scléromètre ……38

II.4.1.3. Méthodes destructive..... 38

II.4.1.3.1. Carottage d'éléments en béton armé ……....39
II.4.1.3.2. Prélèvements d'aciers……....40
II.4.1.3.4. Test a la carbonatation……..……41
II.5. Conclusion sur le diagnostic……..……....43

Chapitre III : Les méthodes de réparation et de prévention de béton

III.1. Les méthodes de réparation 45
III.1.1. Introduction 45
III.1.2. Réparation traditionnelle 45
III.1.3. Revêtements en surface du béton(Imprégnations)..... 46
III.1.4. Inhibiteurs de corrosion 47
III.1.5. Le béton projeté 48
III.1.6. Traitements électrochimiques 50
III.1.7. Tissus de fibre de carbone 51
III.1.8. Conclusion sur les réparations 53
III.2. Prévention des armatures dans le béton 53
III.2.1. Introduction : 53
III.2.2. Mesures préventives 53
III.2.2.1. Armatures résistantes à la corrosion 53
III.2.2.1.1. Les armatures en acier inoxydable……..53
III.2.2.1. 2.Le revêtement imperméabilisant…….55
III.2.2.1.2.1. Les peintures……..…….55
III.2.2.1.2.2. Les lasures ……..55
III.2.2.1.2.3. Les revêtements minces …….55
III.2.2.2. Les inhibiteurs de corrosion..... 56
III.2.2.3 .1.La déchloruration ……..……..56
III.2.2.4 .2.La ré-alcalinisation ……..57
III.2.2.4 .1. La protection cathodique ……..……..……58
III.2.2.5. Protection contre toute pénétration 58
III.2.2.6. Contrôle du taux d'humidité 60
III.2.2.7. Restauration du béton 62

III.2.2.8. Renforcement structural 64
III.2.2.9. Résistance hysique 66
III.2.2.10. Résistance aux produits chimiques 68
III.2.2.11. Préservation ou restauration de la passivité 69
III.2.2.12. Augmentation de la résistivité 71
III.3. Conclusion 72

Chapitre VI : Etude de Cas des Tours de Commerces les Bananiers-Alger

IV.1. Problématique 74
IV.2. Description du projet 74
IV.3. Diagnostic des désordres constatés 76
IV.3.1. Relevé visuel 76
IV.4. Localisation des désordres 77
IV.5. Qualification des désordres 78
IV.6. Constatation des désordres 80
IV.7. Mode opératoire de réparation 85
IV.7.1. Type 1 : Corrosion 85
IV.7.2. Types 2 : Ségrégation 86
IV.7.3. Type 3 : Fissures 87
IV.7.3.1. Fissures superficielles 87
IV.7.3.2. Fissures semi profondes 87
IV.7.3.3. Fissures profondes 88
IV.7.4. Type 4 : Infiltration d'eau 88
IV.7.5. Type 5 : Joint de dilatation 89
IV.7.6. Type 6 : Efflorescence 89
IV.8. Matériaux utilisés et techniques de réparation 90
IV.8.1. Caractéristiques des matériaux utilisés 90
IV.8.2. La réfection des bétons 90

Sommaire

IV.8.3. Choix des produits 91

IV.8.4. Méthodes et matériels utilisés 91

IV.8.5 .Techniques de réparation des éléments structuraux 92

IV.9. Recommandations techniques 92

Conclusion général……94

Bibliographique

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Attaques Sulfatiques……07
Figure I.2 : Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton……09
Figure I.3 : Mécanisme de corrosion par des piqures due aux chlorures……10
Figure I.4 : Schéma illustratif de dégradation des armatures due aux chlorures……11
Figure I.5 : Evolution de la carbonatation en fonction du dosage en ciment du béton……18
Figure I.6 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation…….19
Figure I.7 : Processus général de la carbonatation……..19
Figure I.8 : La pénétration du CO2 dans le béton ……..19
Figure I.9 : La pénétration de l'eau par le CO2……...20
Figure I.10 : La pénétration de carbone dissous et les hydroxydes de calcium $Ca(OH)_2$…20
Figure I.11 : Diagramme de Tuutti modifié…….21
Figure I.12 : Corrosion des armatures due à la carbonatation……..22
Figure I.13 : Les étapes et les produits de la corrosion des armatures…….23
Figure I.14 : Processus de corrosion……...24
Figure I.15 : les types de corrosion……..…….25
Figure I.16 : Étapes de l'évolution de la corrosion des armatures……..……..26
Figure II.1 : détection par fenêtres et résultats……..…36
Figure II.2 : L'auscultation sonique…….. 37
Figure II.3 : Scléromètre……38
Figure III .1 : Action d'un produit hydrofuge……..……..46
Figure III .2 : Projection de béton……..……49
Figure III .3 : projection par voie humide……..……. ..49
Figure III .4 : projection par voie sèche……..…….…..49
Figure IV.1 : Principe de dégagement et de nettoyage des armatures corrodées…….…..86
Figure IV.2 : le ragréage…….. ..87

LISTE DES TABLEAU

Tableau I.1 : paramètres influent sur la cinétique de carbonatation**……**21
Tableau II.1 : Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP**)……..…....**37
Tableau III.1 : Protection contre toute pénétration**……...……**58
Tableau III.2 : Contrôle du taux d'humidité**…….……..**60
Tableau III.3 : Restauration du béton**…….…….....**62
Tableau III.4 : Renforcement structural**…….……..…**64
Tableau III.5 : Résistance physique**…….……...**66
Tableau III.6 :Résistance aux produits chimiques**…….…….**68
Tableau III.7 : Préservation ou restauration de la passivité**……..……..……** 69
Tableau III.8 : Augmentation de la résistivité**……..……...**71
Tableau IV .1 : Qualification des désordres**……..……..**78

LISTE DES PHOTOS

Photo I.1 : Intrados des ponts dégradés……05

Photo I.2 : Barrières de retenue dégradée…….05

Photo I.3 : Fissuration en étoile de plusieurs millimètres d'ouverture due à la réaction alcali-granulat,……..……06

Photo I.4 : Attaques Sulfatiques……....07

Photo I.5 : Fissuration interne ……..……..…..12

Photo I.6 : Écaillage de la surface ……..…….…12

Photo I.7: dégradation due aux sels de déverglaçage…..……..13

Photo I.8 : phénomène de faïençage……..14

Photo I.9 : Epaufrure dans construction……..…..14

Photo I.10 : Lichen sur la structure…….……..14

Photo I.11 a. : Fissure active (individuelle) ……..…….……..16

Photo I.12 b. :Microfissures……..…….16

Photo I.13 : lézardes…….....17

Photo II.1: fissurometre digital……..35

Photo II.2 : Carottage d'éléments en béton armé…… ..39

Photo II.3: Prélèvement d'aciers……40

Photo II.4: mesure de potentiel de corrosion…….41

Photo II.5 : Test a la carbonatation……...42

Photo III.1: Application d'inhibiteur ……..……...47

Photo III.2: Application d'inhibiteur…….....47

Photo III.3: Projection de béton……..……48

Photo III.5: Application de la pâte sur le treillis……50

Photo III.6: Traitement en cours…….…..50

Photo III.7 : Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone…….....52

Photo III.8 : Revêtements de protection PCI Masterseal et Barraseal ……..….. …59

Photo III.9 : Injection de résine PCI dans les fissures…….……59

Photo III.10 : Membranes Conideck……..…….…60

Photo III.11 : Traitement hydrophobe PCI Silconal 303……..…...61

Photo III.12 : Le taux d'humidité du béton……..……61

Photo III.13 : Revêtements imperméabilisants PCI Barraseal……..……...62

Photo III.14 : Mortiers de réparation PCI…….……63

Photo III.15 : Les mortiers de réparation PCI Nanocret®…….…..63

Photo III.16 : Mortiers de réparation PCI……..64
Photo III.17 : Renforcement structurel MBrace……65
Photo III.18 : Produits d'injection PCI Apogel……65
Photo III.19 : Renforcement structurel avec PCI Nanocret R4 Fluide……..66
Photo III.20 : Revêtements de sols Mastertop……...66
Photo III.21 : Revêtements astertop……...…67
Photo III.22 : Il est possible d'augmenter la résistance physique ou mécanique grâce aux mortiers de resurfaçage PCI Polycret……..…67
Photo III.23 : Revêtements Masterseal 136, 138, 185, 190 résistants aux produits Himiques……..68
Photo III.24 : Systèmes Masterseal : 138, 190 – époxy / 136 – polyuréthane / 185 – époxy ciment……..…….68
Photo III.25 : Augmentation de l'enrobage de l'armature par projection de PCI Nanocret R4……..69
Photo III.26 : Réalcalinisation par diffusion : utilisation du PCI Barraseal 100 FX à base de ciment……70
Photo III.27 :PCI Nanocret R4 / R3 : utilisé en remplacement du béton contaminé par les Chlorures……..70
Photo III.28 : Revêtements protecteurs et imperméabilisants Masterseal……..71
Photo III.29 : Systèmes d'étanchéité Conipur. Évitent la pénétration de l'eau et permettent au béton de sécher…….……71
Photo III.30 : Traitement hydrophobe par PCI Silconal 303……..72
Photo IV.1 : Tours bannaniers des commerces ALGER……74
Photo IV.2 : Vue aérienne tours bananiers des commerces ALGER ……..……..75
Photo IV.3 : Plan de situation du projet…….....75
Photo IV.4: Parking…… ..77
Photo IV.5: Parking…….…..77
Photo IV.6 : Le socle administratif……77
Photo IV.7: Corrosion au niveau du ferraillage poteaux……...80
Photo IV.8 : Corrosion au niveau du ferraillage poutres ……...80
Photo IV.9 : Corrosion au niveau du ferraillage voiles ……..……81
Photo IV.10 : Corrosion au niveau du ferraillage voile de la monte de charge…….81
Photo IV.11 : Corrosion au niveau du ferraillage dalle de la monte de charge…… ….81
Photo IV.12 : Ségrégation au niveau des poteaux …… 82

Photo IV.13 : Ségrégation au niveau des poutres……..…82
Photo IV.14 : Ségrégation au niveau des voiles du monte de charge……82
Photo IV.15 : Ségrégation au niveau des escaliers……83
Photo IV.16 : Ségrégation au niveau des plancher……83
Photo IV.17 : Etanchéité dégradé……..83
Photo IV.18 : Infiltration d'eau à travers les dalles……..…… 83
Photo IV.19 : Détérioration du joint au niveau des poteaux……84
Photo IV.20 : Détérioration du joint au niveau des planchers ……84
Photo IV.21 : Gauche à droite ; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche……84

ملخص مذكرة :

تعتمد ديمومة الهياكل الخراسانية المسلحة على سلوكها فيما يتعلق بالظروف المناخية والبيئية التي تحيط بها ، والتي تخضع لتغيير فيزيائي وكيميائي دائم ناتج عن عدوان خارجي. في هذا السياق ،قمنا بدراسة حالة تدهور الخرسانة القديمة, وضع التنفيذ و قيمة التشخيص ومعنى معرفة الأسباب الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لقدم الخرسانة وأصل التدهور, الذي يمكن أن يؤدي بنا إلى فهم أفضل لهذا الموضوع. لذلك ، فمن الممكن اقتراح طريقة مناسبة لاتخاذ القرارات بشأن الصيانة الممكنة، الإصلاح أو التعزيز. هذه الدراسة أيضا تقلل من التدهور والأخطاء في المنشآت الخراسانية الجديدة في المستقبل.

الكلمات الرئيسية: الديمومة، التغيرات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية والتشخيص والتدهور، والصيانة، إصلاح والتقوية.

Abstract:

The durability of reinforced concrete structures depends on their behavior with respect to the climatic and environmental conditions in which their structures live which are subjected to a permanent process of physical and chemical deterioration resulting from external aggression. In this context, case studies on the degradation of old concrete have allowed us to put into practice the diagnostic value and its significance. Knowledge of the physical, chemical and mechanical causes of concrete aging and the origin of the degradation can lead us to better understand the subject. Therefore, it is possible to propose an adequate method for making decisions about possible maintenance, repair or reinforcement.

Key words: Durability, physical, chemical and mechanical alteration, diagnosis, degradation, maintenance, repair, reinforcement.

Résumé :

La durabilité des structures en béton armé dépend de leurs comportements vis à vis des conditions climatiques et environnementales dans lesquels vivent ses structures qui sont soumises à un processus permanent d'altération physique et chimique résultant d'agressions extérieures. Dans ce contexte, des études de cas sur la dégradation du béton ancien nous ont permis de mettre en pratique la valeur de diagnostic et sa signification. La connaissance des causes physiques, chimiques et mécaniques du vieillissement du béton et l'origine de la dégradation peut nous amener à mieux comprendre le sujet. Par conséquent, il est possible de proposer une méthode adéquate pour la bonne prise des décisions relatives à l'entretien possible, la réparation ou le renforcement.

Mots clés : Durabilité, altération physique, chimique et mécanique, diagnostic, dégradation, entretien, réparation, renforcement.

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.

Aujourd'hui, la plus part des infrastructures en génie civil sont en béton armé, dont la majorité et surtout les ouvrages routiers ont atteint un seuil de dégradation important et même parfois la fin de leur vie utile. Il est donc temps de les réhabiliter ou de les remplacer.

Le remplacement de ces ouvrages pose en plus du problème de financement, le problème de mise en service et les délais précieux lors de leur remplacement.

De même il y a plusieurs structures dégradées qui ne doivent pas obligatoirement être démolies. Alors il est nécessaire de chercher d'autres méthodes telle que la réparation pour prolonger leur vie utile.

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 remédier à cette situation et œuvrer à la réhabilitation efficace et durable des ouvrages en béton armé dont les armatures sont corrodées, nous avons décidé de travailler pour notre mémoire de fin d'étude, sur le thème «les cause de Dégradations du béton armé». Les objectifs visés par notre étude sont :

- expliquer les mécanismes de la Dégradations du béton armé
- présenter les techniques d'investigation pour la détection de Dégradations du béton armé
- expliquer les méthodes de réparation des ouvrages du béton armé
- donner des mesures préventives pour empêcher ou retarder le plus longtemps possible la Dégradations du béton armé conformément à l'adage qui dit que : »prévenir vaut mieux que guérir »

I.1. Dégradations mécaniques

I.1.1Chocs

Les désordres de ce genre concernant beaucoup plus les ponts. Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts (Photo I.1) ; les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue (Photo I.2), ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier.[1]



Photo I.1 : Intrados des ponts dégradés



Photo I.2 : Barrières de retenue dégradée

I.1.2 Abrasion, Erosion

Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des Structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau comme les barrages (érosion des évacuateurs de crue) ou les galeries d'amenée d'eau, et dans les structures Soumises a des charges mécaniques répétées comme les chaussés en béton. [1]

I.1.3 Déamination

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti- verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de ponts provoque des déaminations du béton dans sur un nombre considérable d'ouvrage d'art dans certains pays comme les Etats Unis et le Canada. Mais en France la cause principale du déaminations du béton est l'action conjuguée de la dissolution de la chaux du béton, du gel éventuel de ce béton gorgé d'eau et, le passage répété des roues de poids lourds qui ont provoqué un feuilletage local du hourdis et qui a aboutit a la formation des trous dans le hourdis. [1]

I.2. Dégradations Chimiques

I.2.1Réaction d'alcalis granulats

C'est vers 1942, aux Etats-Unis que les réactions alcali-granulats furent découvertes comme la source principale de dégradation d'un barrage, ces réactions chimiques produisent dans le béton des gonflements qui sont capable dans le cas échéant, de fissurer la structure. Les aspects visibles de ces réactions physico-chimiques sont des fissurations sous forme de

faïençage, des colorations le long des fissures, des exsudations de gel ou encore des éclatements de béton, (Photo I.3).

Outre ces aspects visibles, on note également des pertes de résistances mécaniques importantes (jusqu'à 80% en traction et 60% en compression) et de rigidité (de 60 à 80% de chute de module d'élasticité), [2].



Photo : I.3 - Fissuration en étoile de plusieurs millimètres d'ouverture due à la réaction alcali-granulat, [3].

On distingue trois types de réactions alcali-granulats, [4], (RAG)

- Les réactions alcali-silice;
- Les réactions alcali-silicate;
- Les réactions alcali-carbonate

Les réactions alcali-silice et les réactions alcali-silicate sont assez semblables; elles diffèrent principalement par leurs vitesses: les réactions alcali-silice sont plus rapides. Les trois types de réactions ont en commun la réaction de la solution interstitielle d'un béton avec certains granulats, laquelle engendre des gonflements qui peuvent entraîner des fissures.

Dans ce qui suit, on entend par réactions alcali-granulats aussi bien les réactions alcali- silice que les réactions alcali-silicate; il ne sera traité que ponctuellement des réactions alcali-carbonate, rarement observées, [5].

I.2.2. Attaques Sulfatiques

L'attaque aux sulfates est causée par une séquence complexe de réactions chimiques. Ces réactions provoquent une modification chimique et physique de la matrice cimentaire. La restructuration de la matrice conduit à une perte des propriétés mécaniques et physiques. Il n'y a pas de réactions chimiques clairement identifiées qui causeraient ce trouble. Toutefois, on note deux formes principales sous lesquelles les attaques se manifestent :
Les attaques aux sulfates dites internes qui surviennent en raison d'une mauvaise formulation ou encore d'une cure inadéquate. Une cure inadéquate sera considérée comme une cure dont la température dépasse 70 °C. Une température de cure trop élevée provoquera une instabilité de certains éléments tels que les mono-sulfo-aluminates ce qui favorisera la formation d'ettringite expansive.
Les attaques aux sulfates de type externe qui surviennent lorsqu'un agent agressif intrusif parvient à s'infiltrer dans le liquide interstitiel et à bouleverser l'équilibre. Leurs actions sont multiples, mais on observe en général la dissolution de plusieurs éléments de la matrice cimentaire. [6]

Processus d'attaque par les sulfates :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, les expansions peuvent résulter de la formation d'ettringite secondaire (l'ettringite primaire n'est pas expansive). [7]

Schématiquement, la formation de l'ettringite se fait en deux étapes qui peuvent être résumées en ce qui suit :

1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates). Dans le cas du sulfate de sodium:

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH$$

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

$CaSO_4.2H_2O$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu expansif.

2) Formation d'ettringite secondaire

- à partir du C_3A anhydre résiduel:

$$C_3A + 3CaSO_4.2H_2O + 26H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O$$

- à partir des aluminates hydratés:(mono-sulfo-aluminates)

$$C_3A.CaSO_4.18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O(C_4AHx)$$

$$C_3A.Ca(OH)_2.xH_2O + 2Ca(OH)_2 + 3SO_4 + 11H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO4.32H_2O(II, 5)[8]$$

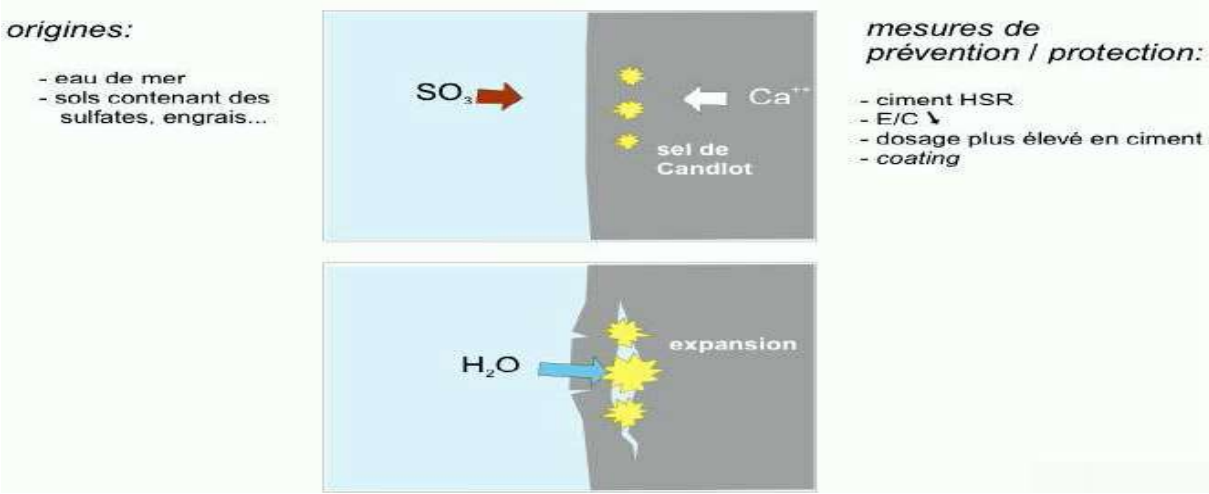


Figure I.1 : Attaques Sulfatiques

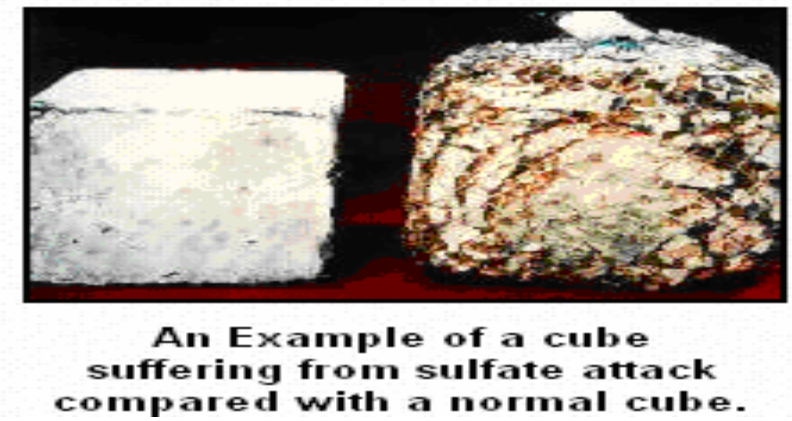


Photo I.4 : Attaques Sulfatiques

I.2.3. Attaques Acides

Tous les acides se comportent de manière analogue au gaz carbonique. La base contenue dans le béton, l'hydroxyde de calcium est neutralisée pour former le sel correspondant.

Rappel : Acide + Base → Sel + Eau

L'agressivité de l'acide est fonction de la solubilité du sel formé, [9].

Acides organiques : L'agressivité varie selon les acides

- Forte avec l'acide lactique ou acétique;
- Très faible avec l'acide oxalique ou tartrique.

Exemple

$2CH_3COOH + CaOH_2 \rightarrow Ca(CH_3COO)_2 + 2H_2O$

Acide acétique — Hydroxyde de calcium — Acétate de calcium

L'acide acétique forme avec l'hydroxyde de calcium un acétate de calcium neutre. Le sel acétate de calcium est très soluble dans l'eau, il est extrait (dégagé) ce qui a pour effet d'endommager la pâte de ciment.

$(COOH)_2 + Ca(OH_2) \rightarrow Ca(COO)_2 + 2H_2O$

Acide oxalique — Hydroxyde de calcium — Oxalate de calcium

L'acide **oxalique** a un comportement analogue à celui de l'acide acétique et réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former de l'oxalate de calcium. Parce que contrairement à l'acétate de calcium, l'oxalate de calcium n'est pas soluble dans l'eau, la pâte de ciment reste exempte de dommages.

Les **acides forts** ne neutralisent pas l'hydroxyde de calcium, mais réagissent avec toutes les parties de la pâte de ciment et attaquent également les granulats contenant du carbone, comme le calcaire. La pâte de ciment se dissous entièrement par exemple dans l'acide chlorhydrique en formant du chlorure de calcium, d'aluminium, de fer et de manière colloïdale du dioxyde de silicium, [9].

Acides minéraux

Milieux très agressifs (sels très solubles) ⟶ dissolution

$2\ HCL + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCL_2 + 2\ H_2O$

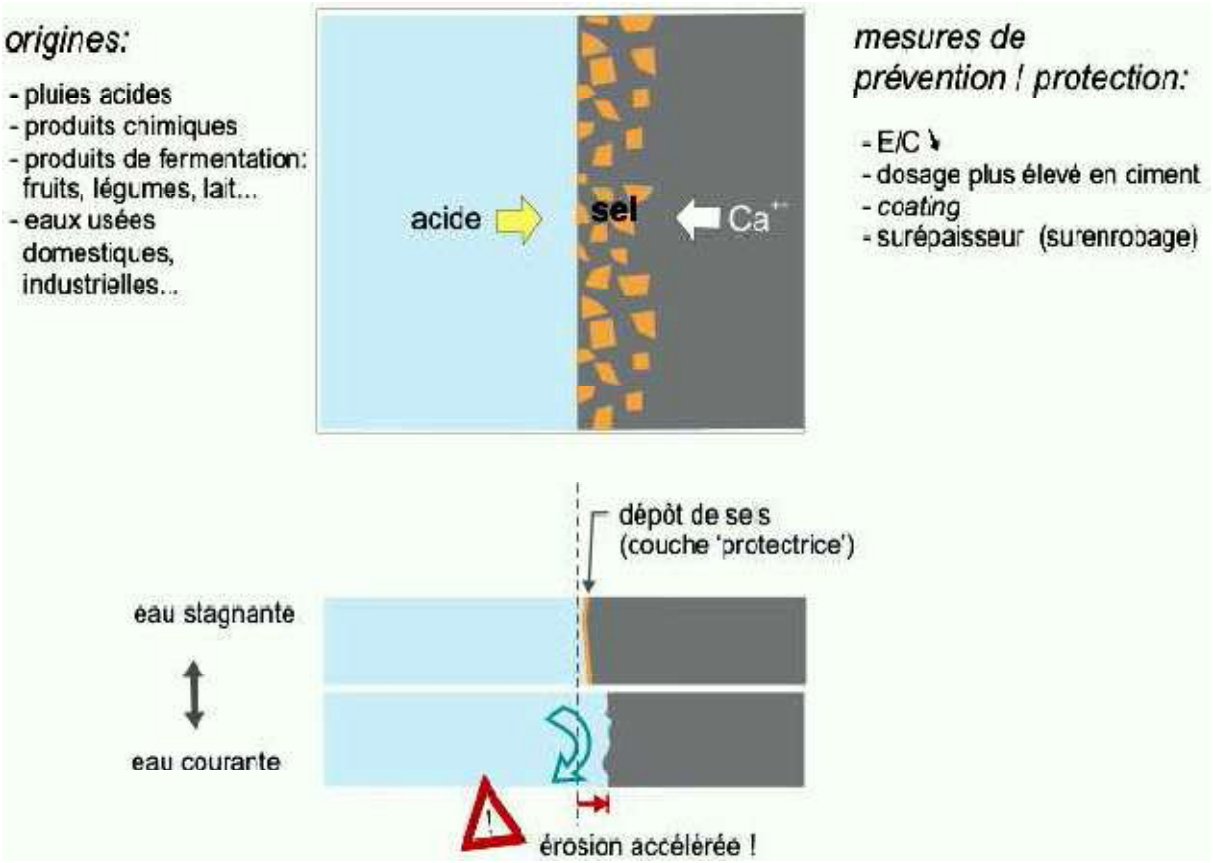


Figure I.2 - Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton

I.2.4. L'attaque des chlorures

Les sels de chlorures sont très solubles dans l'eau. Les ions ainsi formés dans l'eau pénètrent avec celle-ci dans le béton (pénétration des chlorures) , soit par humidification d'un béton sec (**convection**), soit par **diffusion**, due au fait que la teneur en chlorure est plus forte dans le milieu environnant que dans le béton d'origine (gradient de concentration). Les chlorures venant de l'extérieur restent, en majorité, à l'état dissous dans la solution interstitielle du béton. Mais ils peuvent aussi réagir avec certains constituants du matériau (réaction chimique ou adsorption).

- Les chlorures agissent par rupture du film passif des aciers (processus encore imparfaitement compris) qui perd son caractère protecteur,
- Les chlorures sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et le film passif est lui-même variable selon l'endroit,
- Les chlorures entrainent une corrosion qui est localisée (piqûres).

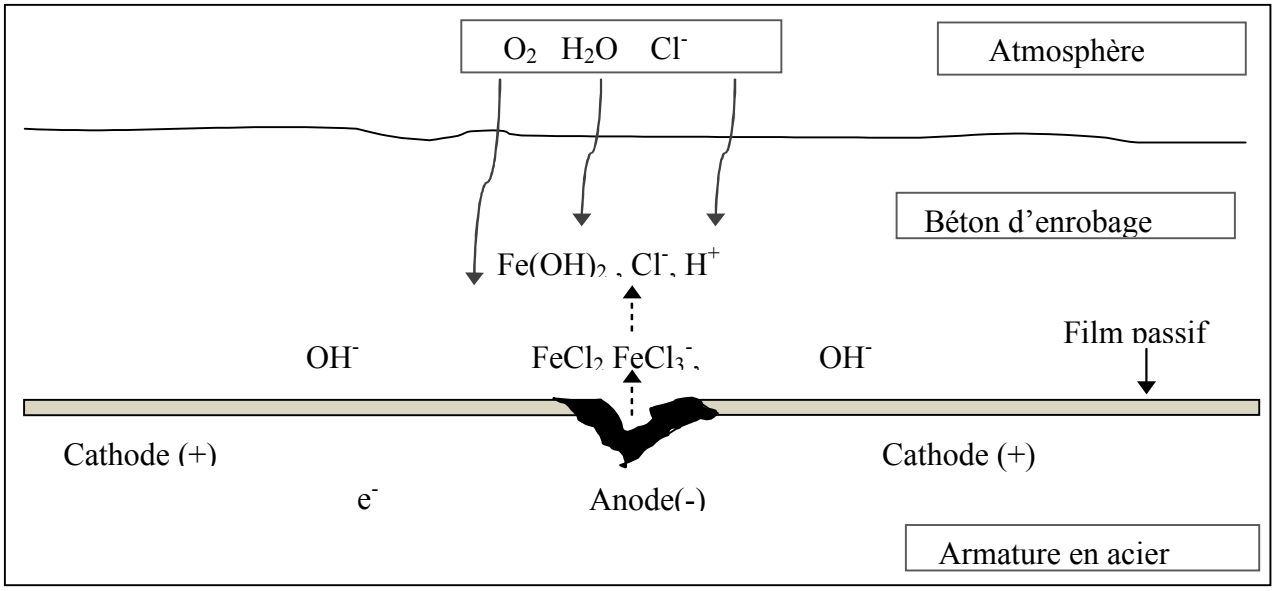


Figure I.3 - Mécanisme de corrosion par des piqures due aux chlorures

On peut définir deux « sortes » de chlorures :

- **Chlorures libres** : se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ils sont extractibles à l'eau et sont de ce fait appelés également "chlorures solubles dans l'eau",

- **Chlorures totaux** : incluent, outre les précédents, ceux fortement adsorbés sur les C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme de composés tels que les chloro-aluminates de calcium (C_3A important pour la fixation).

A partir d'une certaine teneur en chlorures, la couche de passivation de l'acier est attaquée. La corrosion due aux chlorures est un phénomène dangereux, parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section d'armature, [10].

Néanmoins, il est souvent admis la valeur suivante

$$[Cl^-]_{libre} / [OH^-] = 0.6$$

Un rapport $[Cl^-]_{libre} / [OH^-]$ compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration "critique" en ions chlorure totaux de l'ordre de 0,4 % par rapport à la

masse de ciment, pour un béton non carbonaté, [10], (et donc à des concentrations "critiques" comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton, suivant la formulation)

Seuil d'amorçage de la corrosion due aux chlorures

A la différence de la carbonatation, la corrosion ne démarre pas instantanément lorsque les ions chlorures atteignent les aciers : il faut atteindre une concentration critique.

Cette valeur, exprimée par rapport aux chlorures libres, peut varier en fonction de nombreux facteurs (cation associé aux chlorures, teneur en oxygène, humidité relative, température, degré d'hydratation du ciment, teneur en C_3A, porosité, ajouts, composition acier…).

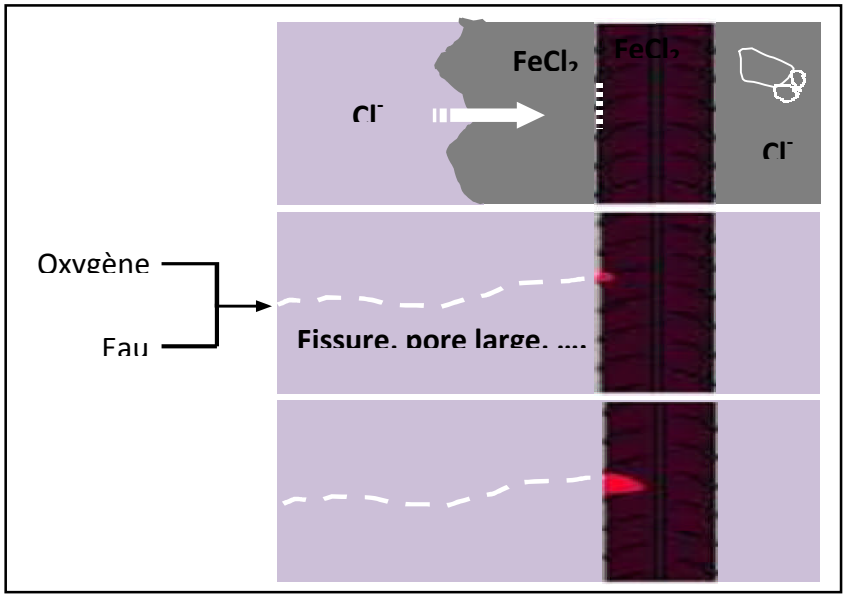


Figure I.4 - Schéma illustratif de dégradation des armatures due aux chlorures

I.2.5. Lixiviation

La lixiviation est la mise en solution de certains constituants du béton. Par exemple, la chaux est dissoute selon la réaction :

$$Ca(OH)_2 > Ca_2+ + 2\ OH-$$

Après lixiviation, la porosité du béton est augmentée et sa dégradation s'accélère. Cette dégradation reste limitée aux zones du béton dans lesquelles l'eau pure peut circuler (près des fissures, etc.).

Même si l'eau n'est pas très pure, mais que le béton est assez poreux, il peut se produire un phénomène d'entraînement visible de constituants du béton vers l'extérieur (suintement, efflorescence, fuite de laitance, etc.). Si l'écoulement de l'eau à travers le béton se fait de haut en bas, il peut se former des stalactites.

Si l'eau est acide, par exemple, chargée d'acide carbonique provenant de CO_2, ou d'acide d'origine industrielle (HNO_3, etc.), les granulats calcaires peuvent aussi être fortement attaqués. [11]

I.3. Dégradations Physique Mécanismes développés par le gel et les sels d'éverglaçage

- Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage

Il est généralement admis que l'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau en glace (de l'ordre de **9%**) n'est pas la cause principale de la dégradation du béton, ainsi que l'ont montré les recherches menées notamment par Powers et Litvan, [12]. Dans la

zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restants à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée présente dans les capillaires fins, qui sont considérés aujourd'hui comme la cause principale des dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel, [13].

I.3.1. Cycles dé gel-dégel

Les dégradations occasionnées par le gel sont de deux types :

– Une **fissuration** répartie dans la masse du béton, provoquée par un mécanisme de gel interne, (voir Photo I.5).

– Un délitage de la zone superficielle, appelé **écaillage**, qui résulte d'un gradient thermique important au voisinage de la surface, (voir Photo I.6).

Ces deux types de dégradations, qui peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, sont dus à des mécanismes distincts, [8 et 12], l'action répétitive de cycles de gel et de dégel, ou une brusque chute de température superficielle généralement provoquée par l'action des sels de déverglaçage.



Photo I.5 - Fissuration interne



Photo I.6 - Écaillage de la surface

I.3.2. Sels dé déverglaçagé

Les sels de déverglaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique, c.-à-d. une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton

qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels répétés et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau. La nature des sels de déneigement peut également avoir une incidence sur le processus de dégradation observé Par ailleurs, les ions chlore des sels de déverglaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures.[15]



Photo I.7: dégradation due aux sels de déverglaçage

I.3.3. Tassement

On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures. [1]

I.4.Types de pathologie

I.4. a. Pathologies à risque moyen

I.4. a.1. Faïençage

Le phénomène de faïençage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence. Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faïençage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faïençage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton.[16]




Photo I.8 : phénomène de faïençage

I.4. a.2. Epaufrure

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction.[17]




Photo I .9 : Epaufrure dans construction

I.4. a.3. Lichen

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme. Lichen est plus fréquent dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif.[18]




Photo I.10 : Lichen sur la structure

I.4. a.4. Le ressuage

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

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

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée. Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale.[19]

Type de ressuage

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

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

Le ressuage ne doit pas forcément être négatif: la perte d'eau diminue le rapport e/c et le béton devient plus dense du moins dans les parties inférieures. Sur les surfaces de béton inclinées ou verticales, l'élimination de l'eau de ressuage au moyen de lés de coffrage dissipant l'eau fait partie des méthodes ayant fait leurs preuves pour améliorer la qualité du béton superficiel.[19]

I.4. b. Les pathologies à risque élevé

I.4. b.1. Retrait

Le béton peut subir des dégradations dont la cause est l'existence d'un retrait mal maîtrisé. Le retrait est en effet un phénomène physico- chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Ce qui engendre en fissuration superficielle de formes et direction quelconque, on a différents types de fissures de retraits dont deux types sont :

- **Retrait plastique**

Causé par un manque d'humidité durant le mûrissement du béton.

- **Retrait du séchage**

La plus importante cause de fissuration du béton est le retrait au séchage sous contrainte. La perte humidité par la perte d'eau durant Le mûrissement cause le retrait de celui-ci de prés de 1% par unité de longueur et, par conséquent, création de contraintes de traction. Si Le béton est libre de se déformer, aucune fissuration n'apparaît. Mais la combinaison des deux phénomènes, retrait et contrainte, provoque la fissuration du béton si la résistance à la traction de ce dernier est dépassée. [1]

I.4. b.2. La Fissure

Se sont des ouvertures linéaires au tracé régulier dont la largeur est comprise entre 0.2 et 2 mm. Une fissure est une rupture entre deux parties du matériau qui ne sont plus liées et qui deviennent séparable (Photo.10). La nature des fissures varie en fonction des causes qui leur ont donné naissance, on distingue deux types de fissures :

- ✓ **Fissures mortes**

Ce sont les fissures qui n'évoluent pas et tendent à se stabiliser dans le temps, elles sont généralement dues à un retrait au séchage ou un tassement localisé. Ces fissures ne présentent pas un grand danger pour la structure si elles restent inactives. Leur réparation est nécessaire si ces fissures constituent un problème pour l'étanchéité de l'ouvrage ou dans le cas où elles peuvent être le foyer d'autres types de fissures.

- ✓ **Fissures actives**

Ces fissures représentent un danger pour la structure. Elles sont en évolution progressive (étendue et ouverture). (Photo. a) La réparation de ces fissures est plus complexe, elle doit se faire à partir des causes qui leur ont donné lieu. Ces deux types de fissures peuvent exister sous forme d'un réseau de fissures ou en fissures individuelles et isolées.[1]



Photo I.11 a. Fissure active (individuelle)



Photo I.12 b. Microfissures

La fissuration des ouvrages, qu'elle présente ou non un caractère pathologique sur le plan structurel, peut entraîner une diminution de la durabilité des ouvrages dès lors que les fissures sont suffisamment ouvertes et profondes pour permettre une pénétration des agents agressifs jusqu'aux armatures. Indépendamment des phénomènes précédemment évoqués, elle peut résulter de retraits du béton d'origine thermique ou hydrique, et/ou de mouvements de l'ouvrage d'origine mécanique ou thermique. La fissuration peut aussi entraîner ou accentuer les différents types de dégradations examinés ci-avant. On peut y pallier en mettant en oeuvre par exemple des revêtements souples s'accommodant des variations d'ouverture des fissures tout en répondant aux autres critères de protection nécessaires.[20]

I.4. b.3. Les Lézardes

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

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

elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d’abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans une maison neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d’un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l’époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre. [21]



Photo I.13 : lézardes

I.4. b.4. La carbonatation

I.4. b.4.1. Les mécanismes de la carbonatation

La pâte de ciment hydratée constitue un milieu fortement alcalin **(pH >12)** qui agit comme passivant vis-à-vis de l'acier: l'armature ne rouillera pas, bien qu'elle soit en contact avec l'eau et l'oxygène pénétrant via les capillaires et les microfissures, [22].

La réaction du dioxyde de carbone(CO_2) avec les substances alcalines du béton s'appelle la carbonatation, [5]. Ainsi, la combinaison du dioxyde de carbone avec l'hydroxyde de calcium donne lieu à un carbonate de calcium comme le montre la réaction suivante

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

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier. La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur, mais se trouve freinée par la formation des carbonates. La vitesse de progression de la carbonatation diminue donc avec la profondeur atteinte.
Cette progression est en fait modifiée par des facteurs liés au béton lui-même : nature et dosage du ciment, (figure I.5), dosage en eau, porosité du béton et au milieu environnant.

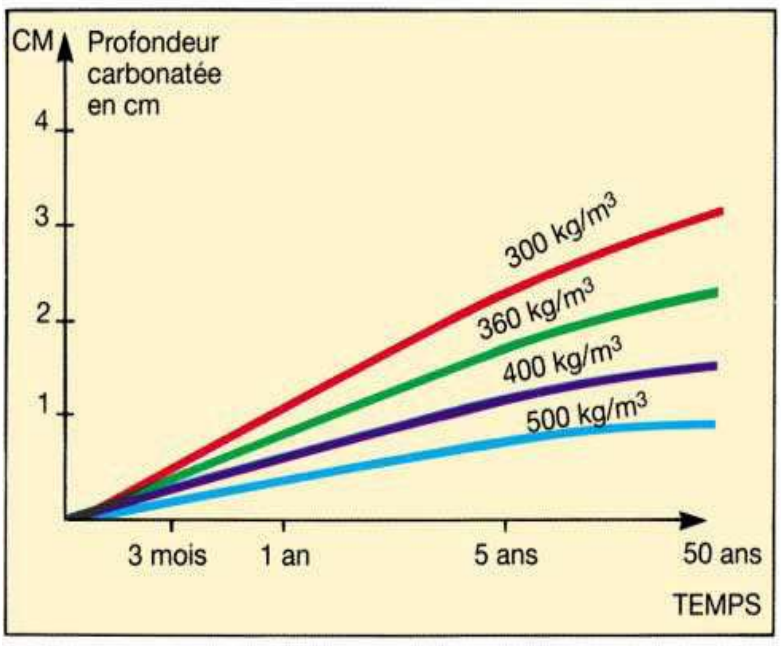


Figure I.5 : Evolution de la carbonatation en fonction du dosage en ciment du béton

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximum pour une humidité relative de l'ordre de **60% à 65%,** pratiquement nulle en atmosphère sèche ou saturée, [15 et 23].

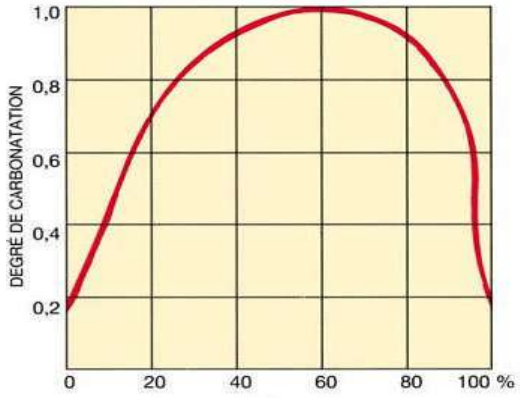


Figure I.6 - Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation,

Dans les atmosphères industrielles, ou même urbaines, l'eau de pluie entraîne des composés chimiques qui peuvent diffuser dans le béton et attaquer le métal des armatures. En particulier, le dioxyde de soufre ou les oxydes d'azote provenant des moteurs d'automobiles peuvent entraîner une acidification des pluies (pH de l'ordre de 3 ou 4) qui deviennent particulièrement agressives pour le béton et pour les armatures.

Les eaux chargées en sels tels que les chlorures (milieu marin) ou les sulfates (certaines eaux souterraines) provoquent une corrosion importante des armatures que peut empêcher un bon enrobage de béton, [15].

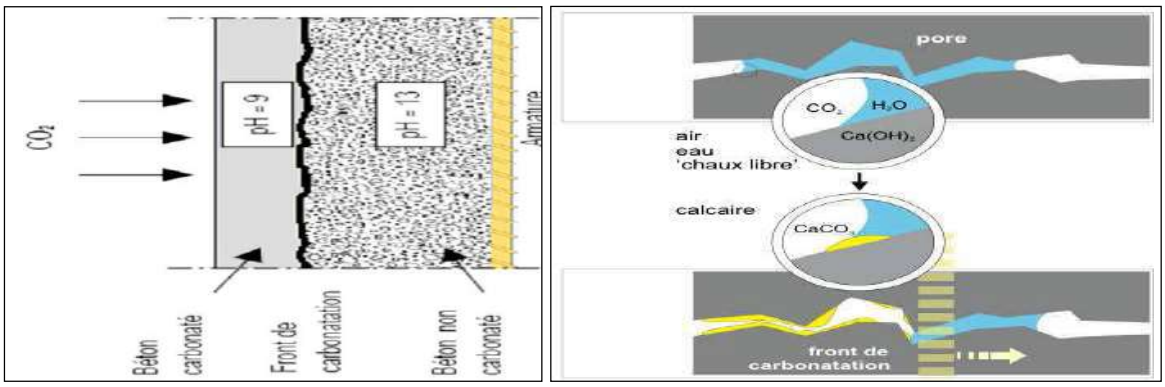


Figure I.7 - Processus général de la carbonatation

I.4. b.4.2 .Les étapes de la carbonatation

La carbonatation dans le béton peut se diviser en trois étapes principales :

Etape 01 : Diffusion de dioxyde de carbone dans le béton

L'alcalinité du béton neuf est d'un pH de 12 à 13. Ce taux alcalin élevé protège l'armature métallique du béton contre l'oxydation. Par contre, la pénétration de dioxyde de carbone (CO_2) diminue le pH du béton.

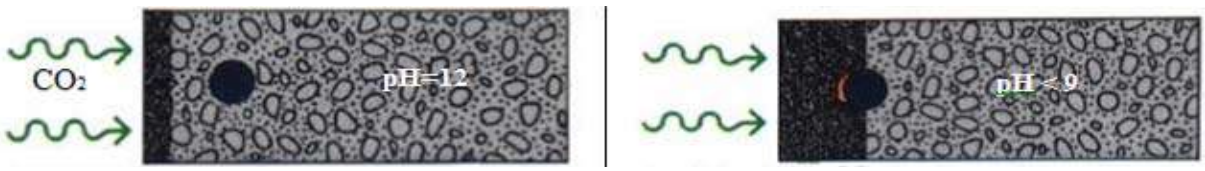


Figure I.8 : La pénétration du CO2 dans le béton

Etape 02 : Dissolution du CO_2 dans l'eau

Des réactions chimiques en chaîne nécessitant la présence de : béton, d'acier, de CO_2 et d'eau. Cette réaction chimique, appelée " carbonatation ".



Figure I.9 : La pénétration de l'eau par le CO_2

Etape 03 : Réaction chimique entre le dioxyde de carbone dissous et les hydroxydes de calcium $Ca(OH)_2$

L'oxydation ainsi provoquée amène une augmentation appréciable de son volume, à tel point que le béton commence à se fissurer et à éclater.



Figure I.10 : La pénétration de carbone dissous et les hydroxydes de calcium $Ca(OH)_2$

I.4. b.4.3. Conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est évidemment la baisse du *pH* due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution de *pH* détruit la couche passivant et amorce ainsi la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le *pH* chute à une valeur d'environ 9 à leur profondeur d'enrobage. Le modèle conceptuel de corrosion par carbonatation (ou pénétration des chlorures) des aciers dans le béton armé montre que les processus liés à la corrosion se développent selon deux périodes [Tuutti, 1982 ; Baroghel-Bouny, 2005]. Dans le cas de la Carbonatation, il est possible de résumer :

– Période d'incubation, elle correspond à la phase où le CO2 transite dans le béton et où des processus physico-chimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais où aucune dégradation n'est encore visible à l'échelle macroscopique d'observation. Elle peut donc être définie comme le temps requis pour que les aciers soient dé passivés par la carbonatation ;

– Période de propagation, la phase où la corrosion s'amorce et des dégradations se développent.[24]

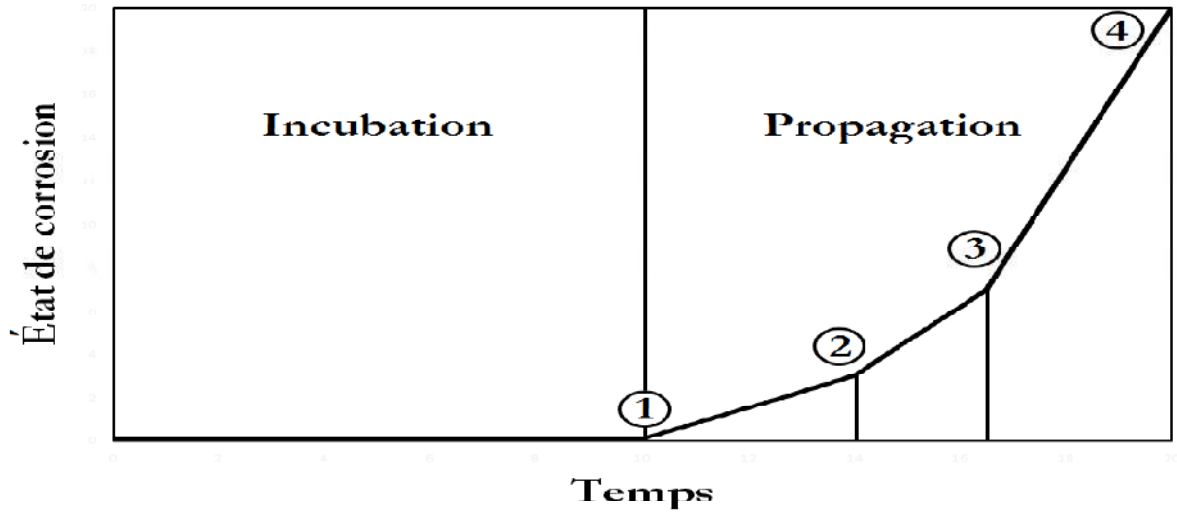


Figure I.11 : Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassivation des armatures, (2) apparition des fissures,
(3) éclatement du béton en parementent et (4) ruine [Baroghel-Bouny, 2005].

I.4.b.4.4. paramètres influent sur la cinétique de carbonatation

Les principaux facteurs qui influencent la vitesse de carbonatation du béton sont résumés dans le tableau :

Tableau I.1 : paramètres influent sur la cinétique de carbonatation

facteur	**influence**
E/C (eau/ciment)	Plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible
Dosage en ciment	Une augmentation du dosage diminue la profondeur de carbonatation à un temps donné
Type de ciment	les bétons de ciment avec des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes) se carbonatent plus rapidement sur les bétons au ciment portland.
Résistance à la compression	la vitesse de carbonatation diminue si l'augmentation de résistance se traduit par une diminution de la porosité et une augmentation des produits
cure	Une bonne cure diminue la vitesse de carbonatation, car le béton sera plus compact et l'hydratation du ciment augmentée
humidité	Vitesse de carbonatation maximum pour une humidité comprise entre 40% et 80%
Température	Une augmentation de la température augmente la vitesse de carbonatation

I.4. b .4.5. Corrosion des armatures due à la carbonatation

La pâte de ciment hydratée constitue un milieu fortement alcalin (pH >12) qui agit comme passivant vis-à-vis de l'acier : l'armature ne rouillera pas, bien qu'elle soit en contact avec l'eau et l'oxygène pénétrant via les capillaires et les microfissures.

Dans un béton carbonaté, le pH descend sous 8. L'acier cesse d'être passivé, l'armature commencera à rouiller si elle est située dans une zone où humidification et dessèchement s'alternent.

Il importe donc de tenir les armatures suffisamment éloignées des zones pouvant se carbonater pendant la vie de la structure. Il en résulte des enrobages (épaisseur de béton comprise entre l'armature et la surface de béton à l'air libre) minima à respecter.[25]

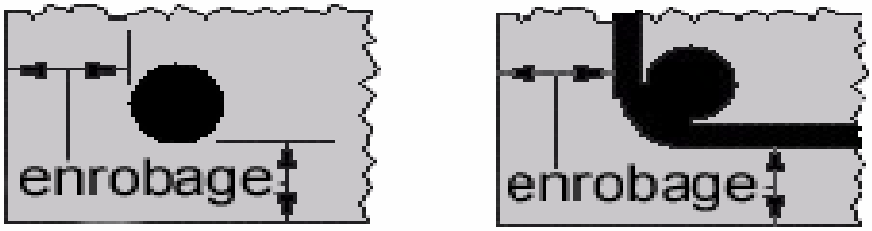


Figure I .12 : Corrosion des armatures due à la carbonatation

I.4. b.4.6.Vitesse de carbonatation

Après un temps assez court, de un à trois mois, la vitesse de carbonatation devient à peu près inversement proportionnelle à la profondeur déjà carbonatée car la couche superficielle de carbonate formée freine la diffusion du gaz carbonique.

_ Exemple :

Pour fixer les idées, à propos d'un béton moyen, conservé en atmosphère ordinaire à environ 65 % d'humidité relative, on peut donner les valeurs suivantes :

– 5 mm de carbonatation après 1 an ;

– 10 mm de carbonatation après 4 ans ;

– 25 mm de carbonatation après 25 ans (et peut aller jusqu'à10 cm. [26]

I.4. b.5. La corrosion

I.4. b.5.1.Aperçu général sur la corrosion dans le béton

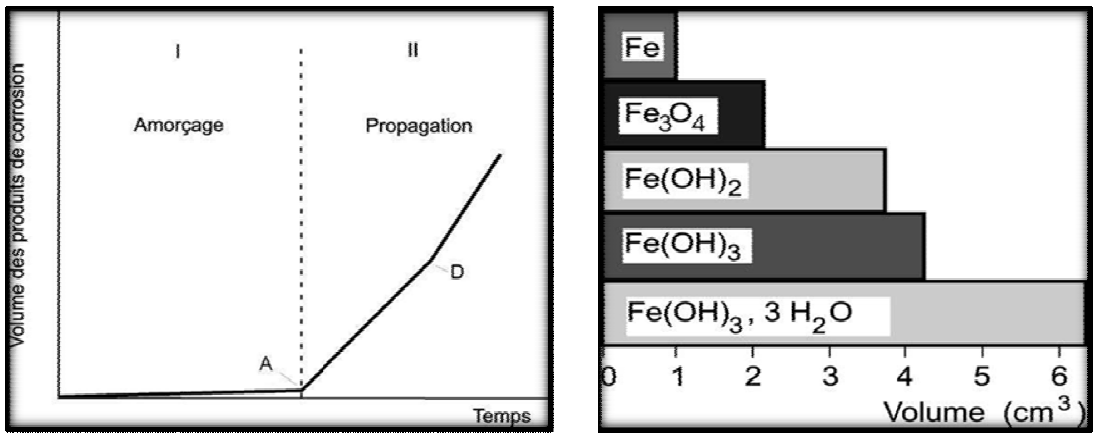
Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les ouvrages en béton armé sont conçus et construits pour durer, mais ils se dégradent par le mécanisme de corrosion sous l'effet de l'agressivité de l'environnement au quel ils sont exposés.

Le béton, du fait de sa forte alcalinité grâce à l'hydratation du ciment qui produit une solution interstitielle basique de pH élevé (environ 13), 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. Alors La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une protection chimique des armatures. Dans la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux périodes : Une période d'initiation et Une période de propagation.

Les étapes de la corrosion des armatures

La corrosion avec formation de rouille des armatures dans les bétons comporte deux phases [2, 3 et 4]. Dans une première phase (ou stade), les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton. C'est le stade **d'incubation**. La seconde phase est celle dite de **propagation** qui commence lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage, [27].



Phase I: Amorçage, Incubation

Phase II: Propagation

Produits de corrosion

Figure I.13- Les étapes et les produits de la corrosion des armatures

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

I.4. b.5.2. Processus de corrosion :

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui définissent chacun un type de corrosion.

La corrosion chimique est la conséquence d'une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase liquide. Elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique. Il est très difficile d'en donner des exemples car elle est le plus souvent accompagnée de corrosion électrochimique.

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive. Ces hétérogénéités déterminent la formation à la surface du métal de micro-anodes et de micro-cathodes qui constituent des micropiles.

Un courant électrique circule entre les électrodes. Les zones appelées anodes sont attaquées et les zones appelées cathodes sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. Nous reviendrons plus loin sur ce type de corrosion dont l'importance est prédominante dans l'industrie laitière.

La corrosion bactérienne est l'attaque des métaux par les produits du métabolisme de certains micro-organismes.

Ce type de corrosion n'a pas été, à notre connaissance, rencontré dans l'industrie laitière. On l'observe le plus souvent sur les canalisations enterrées et sur les ouvrages immergés en eau de mer.

Enfin, la corrosion avec érosion peut se produire lorsqu'une couche de produits de corrosion adhérente et continue à la surface du métal est détruite localement par abrasion consécutive au mou. **[28]**

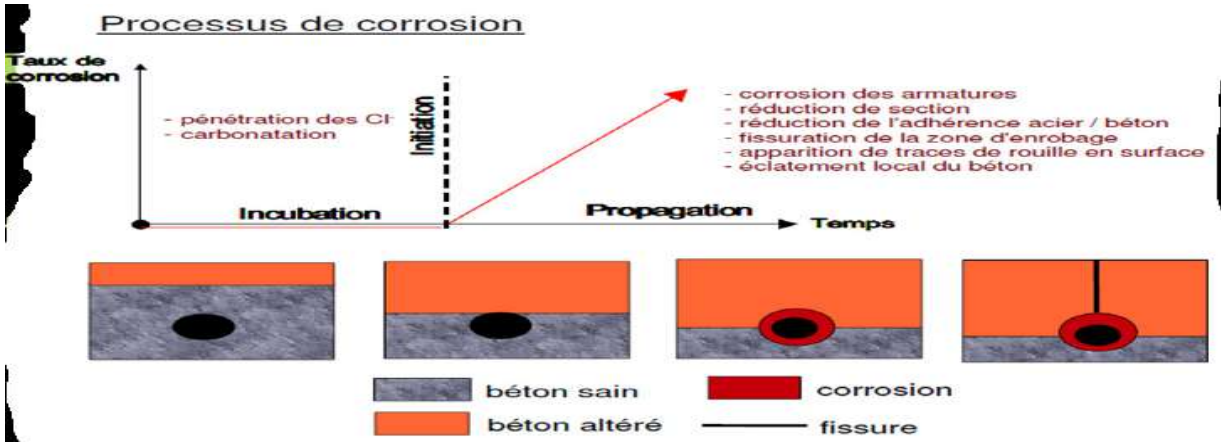


Figure I.14 : Processus de corrosion

I.4. b.5.3. La corrosion de l'acier dans le béton

Lorsque les aciers sont noyés dans le béton frais, la solution alcaline des pores du béton produit une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche d'oxyde, appelé film passif. Ce Phénomène, appelé passivation, n'arrête pas la réaction de corrosion, mais la limite à quelques microns par année [29] Cependant, les de ces ions, particulièrement les ions chlorures, au voisinage de l'armature compromet la stabilité structures sont soumises à des conditions environnementales qui impliquent la pénétration d'agents agressifs tels que les ions chlorures et sulfates [[30], [31]]. La présence du film passif et accélère la réaction de corrosion.

I.4. b.5.4. Différents types de corrosion

Il existe plusieurs types de corrosions :

_ Corrosion généralisée ou uniforme

La corrosion est répartie uniformément sur la surface du métal en contact avec le milieu corrosif. Sans distinction de sites anodiques et cathodiques. Un seul métal intervient.

_ Corrosion localisée : on distingue

_ Corrosion galvanique (ou bimétallisme*)*

La corrosion galvanique pouvant exister entre au moins deux matériaux métalliques placés dans le même environnement

_ Corrosion inter-granulaire

Cette corrosion est due aux hétérogénéités. C'est une attaque sélective aux joints de grains, par suite d'hétérogénéités locales

Corrosion par piqûre

Dans certaines conditions d'environnement, les métaux subir une attaque par piqûration. Ces piqures se localisent en certains points de la surface métallique, elle peut progresser en profondeur. Elle se manifeste essentiellement en présence d'ions chlorure, au fond de la cavité créée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous entraine une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion.

Corrosion par caverneuse

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène. [32]

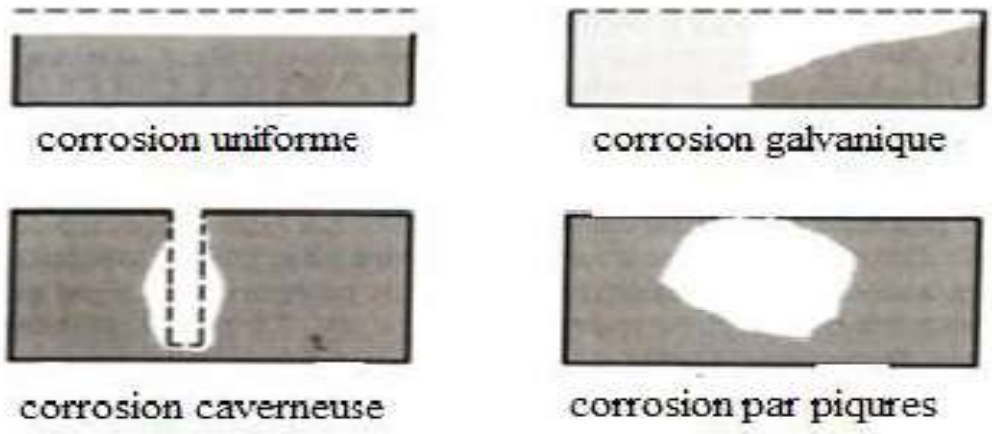


Figure I.15 : les types de corrosion

I.4. b.5.5.Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton armé :

Les processus de **corrosion des armatures** sont les principales causes de dégradation des ouvrages en béton armé et précontraint. Ils touchent tous les domaines de la construction : le Bâtiment (balcons, façades, …), le Génie Civil (réservoirs d'eau potable, ouvrages d'assainissement, silos, aéro réfrigérants, ouvrages industriels ou nucléaires,…), les ouvrages d'art (ponts, viaducs, barrages…), les monuments historiques, les ouvrages portuaires… etc. Le mécanisme général est identique à celui des processus généraux de corrosion des métaux en contact avec un environnement: ce sont des phénomènes électrochimiques, nécessitant la présence simultanée d'eau, oxygène et d'un ou de plusieurs agents corrosifs.

Il y a toutefois des particularités dont les propriétés des armatures d'être protégées à la fois dès la mise en place du béton, par l'alcalinité créée par l'hydratation du ciment (pH entre 12 et 14) ; et tout au long de la vie de la structure, par leur enrobage (distance entre le parement et la surface de l'armature), [27].

Les principaux paramètres susceptibles d'assurer la protection des armatures sont donc:la qualité du béton (béton moins poreux), l'enrobage des armatures. L'environnement joue un rôle néfaste bien sûr, mais la plupart du temps accélérateur,[33]

Deux mécanismes principaux, très différents, conduisent à la **dépassivation** des armatures : **la carbonatation**, qui correspond à la neutralisation de l'alcalinité du béton par le gaz carbonique de l'air, et **l'action des chlorures** (ceux-ci proviennent de très nombreux milieux : marin, sels de déverglaçage, industrie,…), [10 et 33].

I.4.b.5.6. Amorçage et propagation de la corrosion

Selon le modèle de Tuutti, la durée de vie des structures de béton armé peut être séparée en deux phases distinctes telles que montré à la **Figure I.16** . La première phase est l'initiation de la corrosion dans laquelle l'armature est passive, mais le processus de dépassivation, c.-à-d. carbonatation ou pénétration des ions chlorure dans le béton, prend place. La seconde phase est la propagation de la corrosion qui débute lorsque l'acier est dépassivé et qui se termine lorsqu'un état limite est atteint au-delà duquel les conséquences de la corrosion ne peuvent plus être tolérées [34]

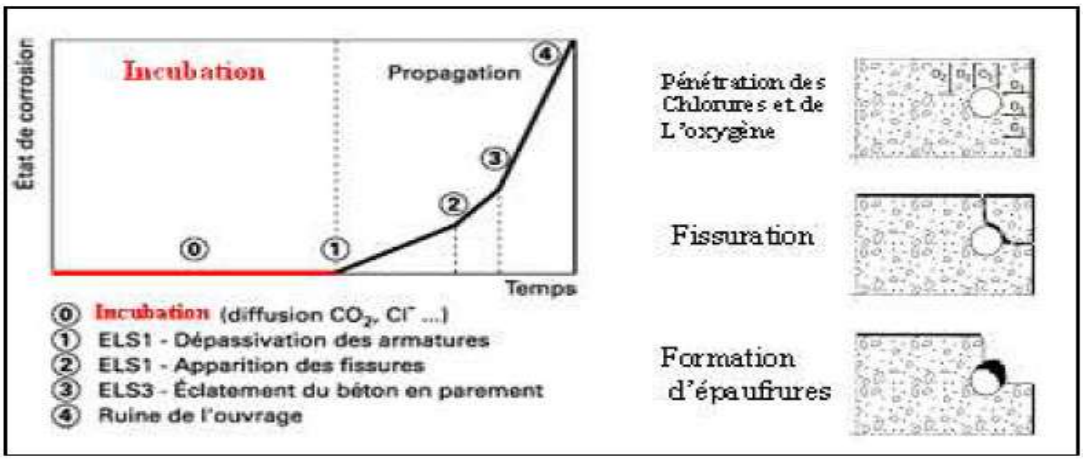


Figure I.16 : Étapes de l'évolution de la corrosion des armatures

Le temps d'initiation et la cinétique de propagation de la corrosion dépendent de plusieurs facteurs tels que : les caractéristiques du mélange de béton, les propriétés des barres d'armature ainsi que l'état de surface des barres d'armature (Bertolini et coll, 2004). Selon Bertolini et coll (2004), la qualité du mélange de béton dépend pour beaucoup du rapport (E/C), de la minéralogie du ciment et de la présence ou non d'ajouts cimentaires.

1.4. b.5.7. Facteurs influents sur la corrosion des armatures du béton

Parmi les facteurs qui influencent la pénétration des chlorures ou du dioxyde de carbone et par conséquent la corrosion des armatures :

I.4. b.5.7.1. La température

Une augmentation de la température accroît la vitesse de corrosion .Ce phénomène peut s'expliquer d'une part par le fait que les processus anodiques et cathodiques 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 [35].

I.4. b.5.7.2. Résistivité du béton (Porosité)

La résistivité du béton a une influence sur le taux de corrosion à une même température. Elle est proportionnelle à la vitesse de corrosion lorsque l'armature est à l'état actif sauf dans le cas de béton saturé, très sec ou dégradé. Plus elle sera élevée, moins le béton sera conducteur, et donc le passage du courant sera limité. La résistivité du béton est fortement conditionnée par sa phase liquide. Plus la porosité du béton est forte, plus la phase liquide peut être importante et par conséquent plus la résistivité est faible. Plus le béton a une résistivité élevée, plus la diffusion des ions agressifs sera limitée et le courant de corrosion sera faible [36]

I.4. b.5.7.3. La concentration en chlorures

Les ions chlorures conditionnent la solubilité des produits de corrosion et l'existence de dépôts **[37]**. 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 [38], 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.

I.4.b.5.7.4. 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'espèce participant à la corrosion des armatures. [39]

I.5 .Conclusion

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

II.1. Introduction. Objectifs du diagnostic

II.1.1. Place du diagnostic

Le guide technique "Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton" définit six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. 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...

Il est à noter que ce texte ne remplace pas "l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art ", qui constitue un document de référence pour les ouvrages routiers, et qui décrit les modalités de cette surveillance.

II.1.2. Cas particulier de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufrures, taches de rouille.

Dans certaines circonstances, toutefois, une déamination 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).

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, chlorures 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 autres le principe des solutions de réparation

. Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, 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.1.4. Procédure à suivre

La procédure à suivre pour un diagnostic, 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 nécessaire (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 de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.).

II.2. 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 des parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigations. Elle comprend :

- la collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage :

historique, documents, dossiers, 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.

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) pourront être envisagés à cette étape, afin d'orienter le programme d'analyse futur).

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 sujétions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc.,

• d'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garanties est nécessaire,

• et de faire évoluer 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...

II.3. 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 phases suivantes :

II.3.1. 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. 3.2. Inspection

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

• la présence d'anciens revêtements, ou de produits 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.

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

II.4. Investigations in situ

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. [40]

II.4.1. Méthodes de mesure de la corrosion des armatures dans le béton

II.4.1.1. Généralités

Les problèmes dus à la corrosion d'un ouvrage en béton armé sont parfois visibles sous forme de fissures ou d'éclats. Toutefois, la corrosion peut avoir commencé dans les zones voisines sans avoir provoqué de désordres visibles. La détection de telles zones s'impose au cours d'un diagnostic.

L'auscultation d'une structure en service peut être réalisée en mesurant le potentiel de corrosion de ses armatures qui est la technique non destructive la plus répandue. La présente étude s'est basée sur cette technique pour établir les cartes de potentiel. Celles ci permettent la détection rapide et pratique de l'état de corrosion des aciers. Cette investigation a été réalisée pour chaque armature tout en variant la valeur de son espacement par rapport à la barre voisine.

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

II.4.1.2. Méthodes non destructives

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ou une partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité.

Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des bâtiments d'Algérie qu'il soit utile d'effectuer des prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser.

Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie.

Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus.

Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes non destructives.

II.4.1.2.1. Relevé visuel

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

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur
- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet
- La présence de coulures de calcite
- Les zones d'altération superficielles et profondes
- Les zones humides
- Les zones de mousses ou de végétation
- Les éclats de béton en formation ou profonds
- Les aciers apparents
- Les zones de ségrégation

Il est nécessaire de répertorier tous ces éléments sur des plans, soit existant soit à créer, et de créer un dossier photographique des principaux désordres afin de pouvoir les visualiser au mieux.

Dans tous les cas le diagnostic visuel doit permettre de :

- Qualifier les désordres, car chaque type a une origine et des conséquences particulières.

- Déterminer les caractéristiques d'une pathologie permet de savoir quelle sorte de traitement sera nécessaire afin de stopper le phénomène.

- Quantifier les désordres, car selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.

- Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème. S'il est seulement prévu de réparer l'élément sans s'attaquer à ce qui engendre la

pathologie, la réparation risque de ne pas être pérenne et l'on verra rapidement apparaitre de nouvelles pathologies similaires.

Les outils indispensables pour mener à bien une inspection visuelle sont les suivants :

-Un appareil photo

-Un mètre

-Un distancemètre

-Un pied à coulisse

-Un fissuromètre (réglette en plastique transparente munie de traits de largeurs calibrées que l'on place successivement sur la fissure à observer pour estimer sa largeur)

-Le nécessaire pour prendre des notes

Cette première étape permet de définir la gravité des pathologies, mais aussi de classer les différents éléments en fonction de la priorité auxquels ils doivent être réparés.

L'investigation visuelle permet aussi de prévoir quels sont les autres moyens de diagnostic les plus adaptés à mettre en œuvre afin de répondre pleinement à la problématique.

Ces investigations complémentaires on pour but de préciser les désordres observés lors du relevé visuel, mais aussi de recueillir des informations complémentaires concernant leur constitution ainsi que leur état.



Photo II.1 : fissurometre digital

II.4.1.2.2. Le relevé du ferraillage

Le relevé du ferraillage peut se faire à l'aide d'un pachomètre de type" Ferroscan". Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif. Il permet de déterminer le positon exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil. Le pachomètre détecte la diffusion de ce champ magnétique ainsi que les modifications de la résonance magnétique induite par la présence d'aciers.

Ainsi, l'appareil mesure la variation électromagnétique due à la présence d'éléments ferromagnétiques, les armatures.

La détermination du diamètre et de l'enrobage repose sur le fait que plus une armature a un diamètre important, plus le signal reçu par l'appareil sera important. A contrario, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal sera faible.

Ainsi, la profondeur d'auscultation avec cet appareil est limitée (généralement de l'ordre de 10 à 15 centimètres selon le type de bétons et le type d'armatures).

Le schéma ci-dessous montre la réponse obtenue selon la densité d'armatures, avec à droite une seule armature, au milieu trois armatures relativement espacées et à droite trois armatures rapprochées

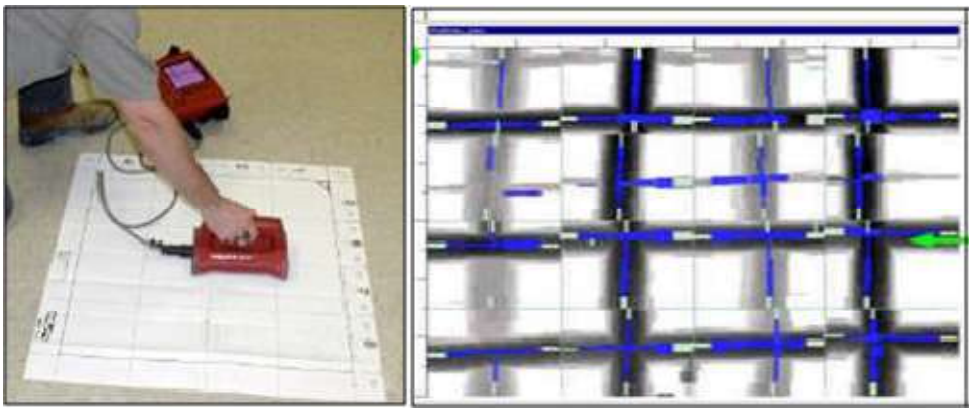


Figure II.1 : détection par fenêtres et résultats

II.4.1.2.3. 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. Connaissant la distance de l'émetteur 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.

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

Tableau II .1 : Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP)

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

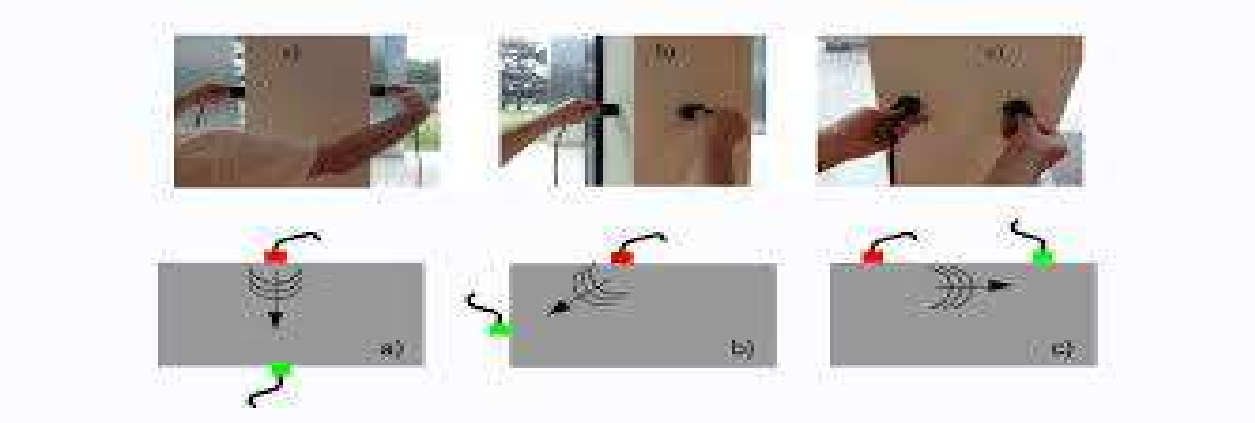


Figure II .2 : L'auscultation sonique

II.4.1.2.4. 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, considéré. Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influer sur les résultats, tels que l'on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton.

Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée.



Figure II .3 : Scléromètre

II.4.1.3. Méthodes destructive

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes.

Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaitre ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous- jacent à la structure.

Cela permet aussi de connaitre leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies.

Parmi les investigations destructives, on recense principalement les techniques suivantes :

II.4.1.3.1. Carottage d'éléments en béton armé

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

-Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur le sol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage.

-Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi des analyses chimiques et microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C.

- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,...) La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour « l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton».

La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferraillage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte.

Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées.

Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.



Photo II .2 : Carottage d'éléments en béton armé

II.4.1.3.2. Prélèvements d'aciers

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcula 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.

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'aciers initiaux.



Photo II .3 : Prélèvement d'aciers

II.4.1.3.3. Potentiel de corrosion

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que si le ferraillage est continu et s'il n'y a pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant. Si le ferraillage est discontinu, il est toujours possible de mettre en place des pontages électriques.

Le principe de la mesure du potentiel de corrosion est de mettre à nu une armature puis de la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance. Une électrode de référence est placée sur le parement, elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre.

Elle est dite de référence, car elle a un potentiel constant du à un équilibre électrochimique. Il est important de veiller à ce que la jonction entre le béton et l'électrode soit humide afin d'établir une conduction électrique.

Cela permet de diminuer la résistance entre l'électrode de référence et le béton ainsi que le potentiel de jonction entre interstitielle du béton l'électrolyte contenu dans l'électrode de référence et la solution Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence.

La norme ASTM C876-91 fait une corrélation entre le potentiel mesuré et la probabilité de corrosion. Ainsi, en utilisant une électrode Cu/CuSO4 on a la relation suivante :

-Si E > - 200 mV alors la corrosion est peu probable (probabilité inférieure à 10%)

-Si -350 < E < -200 mV alors la corrosion est possible (probabilité de cinquante pour cent)

-Si E < - 350 mV alors la corrosion est très probable (probabilité de 50 à 90%)

Cependant, il est important de noter le fait que différents paramètres peuvent influer sur les résultats obtenus, tels que :

-L'hygrométrie de surface, il peut y avoir une diminution de 100 mV entre une mesure sur surface humide et une mesure quand c'est sec

-Pour des milieux agressifs comme la présence de chlorures, la conductivité est augmentée et les potentiels sont plus négatifs

-Lorsque le béton est carbonaté, les potentiels sont plus positifs.

En effectuant ainsi des mesures en de nombreux points d'un élément, il est possible d'effectuer une cartographie complète de la probabilité de corrosion.

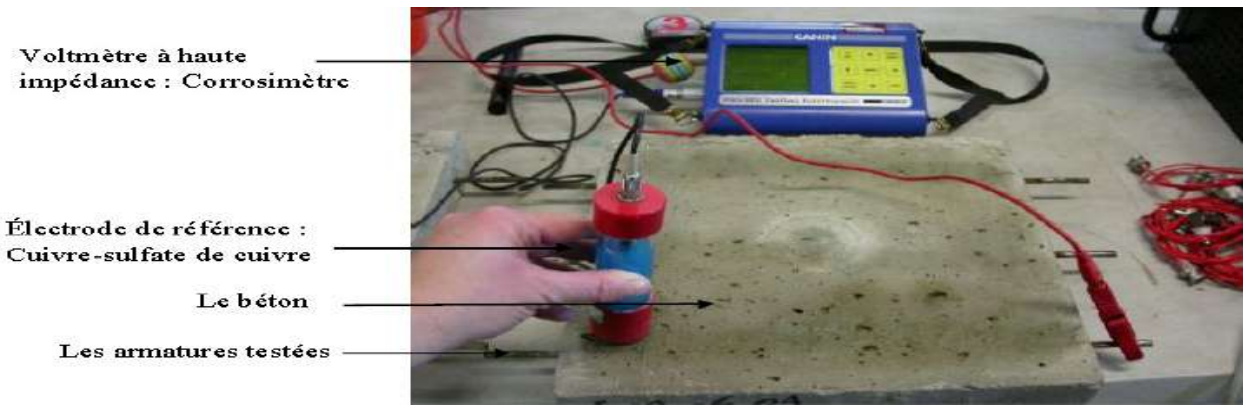


Photo II .4 : mesure de potentiel de corrosion

II.4.1.3.4. Test a la carbonatation

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

La phénolphtaléine est un composé organique de formule C20H14O4. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact.

Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique).

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

Cet essai se réalise généralement sur une coupe 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. 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. [41]



Photo II .5 : Test a la carbonatation

II.4.1.4. Conclusion sur le diagnostic

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.

Ce la 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 oeuvre 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 oeuvre des travaux de protection adaptée, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

III.1. Les méthodes de réparation

III.1.1. Introduction

Suite à un propre diagnostic, les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

III.1.2. Réparation traditionnelle

Cette réparation est la plus classique .Elle consiste à : enlever dans la zone dégradée, le béton d'enrobage non adhérent et dégager les armatures corrodées à traiter, par un moyen mécanique ou chimique. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce que l'acier sain soit mis à nu sur une longueur d'au moins 50 mm. Les armatures doivent être dégagées sur la totalité de leur circonférence.

De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, repiquage, bouchardage, décapage à l'eau à haute pression , sablage à sec ou humide, ponçage, décapage thermique, décapage chimique.

L'importance de cette préparation est fonction de la profondeur de carbonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures.

-éliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenaillage et toutes poussières résiduelles ou souillures, soit par lavage à l'eau, soit par brossage, aspiration ou soufflage à l'air.

- remplacer les armatures corrodées ou mettre en place des armatures complémentaires par recouvrement, scellement ou soudure pour restituer la section d'armature initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement nécessaires afin de redonner à l'ouvrage sa capacité structurelle.

Les armatures peuvent recevoir une protection contre la corrosion par application sur toute leur surface d'un revêtement adapté (inhibiteur anodique, résine synthétique …).

Lorsque la partie d'ouvrage est exposée à un environnement particulièrement agressif ou si l'épaisseur d'enrobage nécessaire ne peut pas être respectée, il peut être mis en place des armatures inox de nuance adaptée.

-reconstituer le béton d'enrobage afin de retrouver la géométrie de la structure:

ragréage manuel ou mécanique, béton coulé, béton projeté… Les armatures sont ainsi protégées par passivation grâce à l'alcalinité du nouveau béton d'enrobage.

La zone reconstituée qui bénéficie d'un pH élevé après mise en oeuvre du nouveau béton d'enrobage devient une cathode forte au regard des bétons anciens environnants qui deviennent des zones anodique sou il y a risque de corrosion.

C'est le phénomène dit d'anode induite.

III.1.3. Revêtements en surface du béton(Imprégnations)

D'une façon générale, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidant ou des hydrofuges. Ils se distinguent par leur fonction principale :

• un produit consolidant confère à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériau d'origine. Il ne s'agit donc pas d'une consolidation structurale à l'échelle d'un ouvrage.

• un hydrofuge constitue 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.

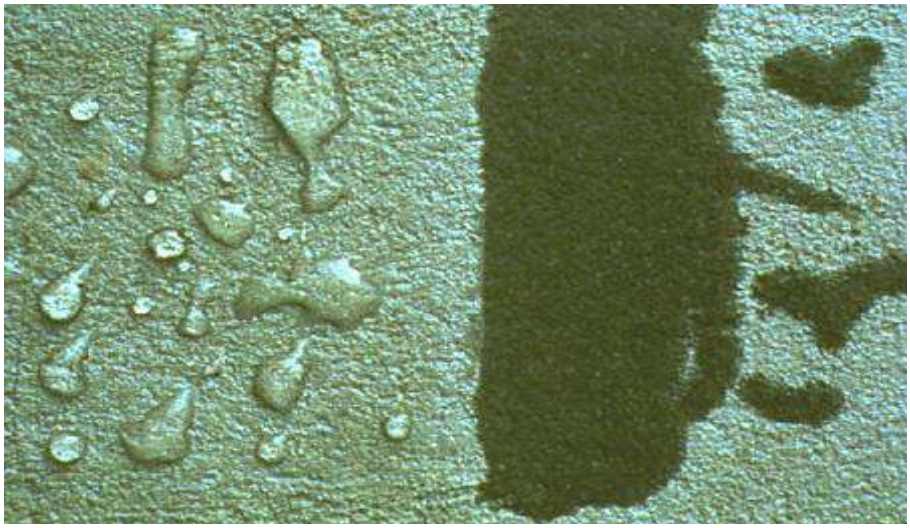


Figure III .1 : Action d'un produit hydrofuge

Par sa fonction principale, un produit hydrofuge n'est ni un imperméabilisant, ni un anti graffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antisalissure, etc.).

Les consolidants 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.

Par la suite, seuls les hydrofuges de surface seront traités dans ce document.

Il est à noter que certains points ne sont donnés qu'à titre indicatif. La mise en œuvre de ces produits est spécifiée dans des documents tels que le Guide pour la protection du béton armé par application de produit à la surface du parement (LCPC).[40]

III.1.4. Inhibiteurs de corrosion

Par définition, un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou arrête le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu. Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

0• de pénétrer une couche de béton très hétérogène par nature (variations de compacité notamment) ,

• d'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en 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 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, adsorption, 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.



Photo III .1: Application d'inhibiteur



Photo III .2: Application d'inhibiteur

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

a- 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 ces 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.

b- 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 des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH- sur les cathodes.

c- Les inhibiteurs mixtes ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques. [40]

III.1.5. Le béton projeté

Définition

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projeté grâce à de l'air comprimé, sur une paroi.



Photo III .3: Projection de béton

Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance,
- par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton.

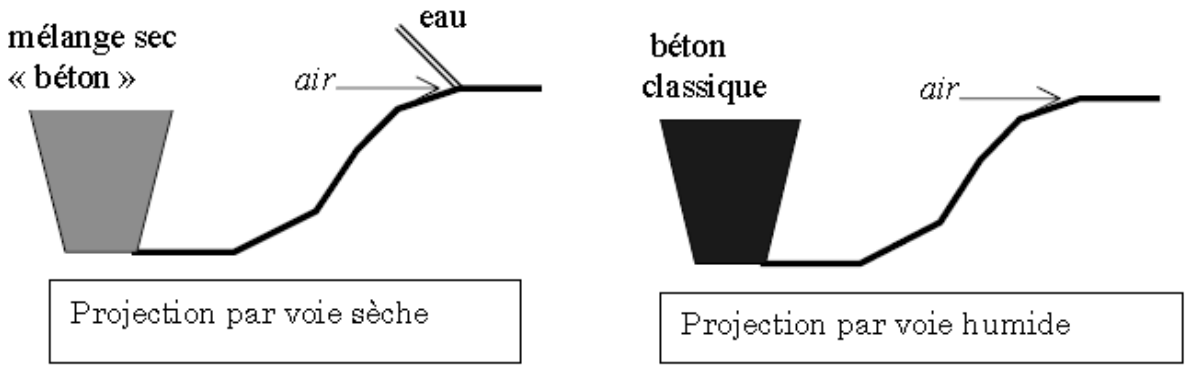


Figure III .2 : Projection de béton

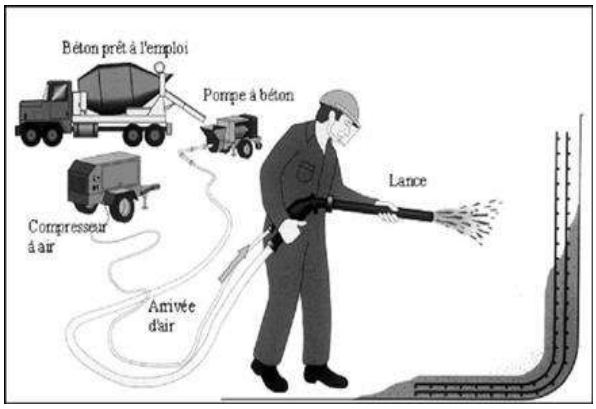


Figure III .3: projection par voie humide

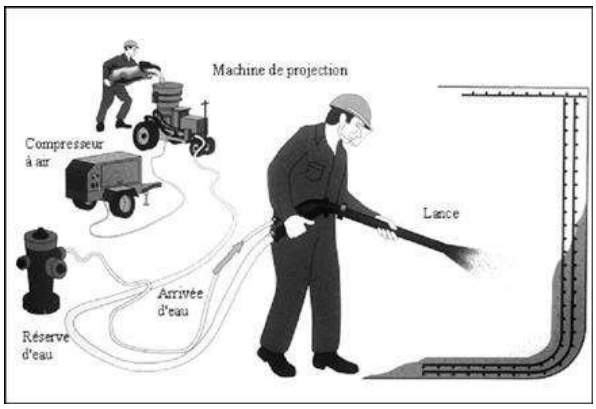


Figure III.4: projection par voie sèche

-Avantage : Ici Le contrôle de la qualité est simple, puisque l'on utilise un béton conventionnel (le dosage des constituants du mélange est connu)

-Désavantage : Ici le procédé ne peut être arrêté, car le mélange eau-ciment est préalable.

-Avantages : Ce procédé peut être arrêté et continué à tout moment durant les travaux. En effet, le contact ciment-eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible par avant si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées sont facilement obtenues puisqu'il permet d'avoir de faibles rapports eau-liant.

-Désavantage : Le dosage de l'eau dans le mélange se fait directement à la lance, par le lancier, ce qui complique le contrôle de la qualité.

Mode opératoire

La mise en œuvre se fait à l'aide d'une machine à projeter qui est transporté à travers un boyau et projeté pneumatique ment à très grande vitesse sur une surface. L'air expulsé et le béton compacté, par la puissance de projection et l'impact sur la surface, permettent au matériau de se supporter sans affaissement, même sur une surface en surplomb. Tout comme pour la méthode de réparation par ragréage, il est nécessaire de dégager les armatures , Il est possible d'appliquer un passivant (par brossage, par application au pinceau, etc.) sur les armatures réparées pour diminuer les risques de réapparition de la corrosion. Cette application peut se faire dans le cas du béton projeté par voie humide, mais n'est pas possible lors de la projection par voie sèche, parce que la protection serait abimée.[41]

III.1.6. Traitements électrochimiques

Principe

Le principe de ces traitements consiste à polariser l'armature la plus proche du parement, à l'aide d'une anode placée sur ce parement et enrobée d'une pâte saturée d'un liquide convenablement choisi (électrolyte).

Le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature (cathode). Les armatures plus profondes doivent être reliées électriquement à celle qui est directement polarisée. Ces traitements électrochimiques sont dits temporaires, parce qu'ils durent généralement entre une et six semaines. Deux techniques de traitements temporaires sont distinguées :

- une technique pour laquelle un générateur électrique (technique du courant imposé) est placé entre l'anode et l'armature,
- une technique pour laquelle l'anode, en alliage judicieusement choisi, est directement reliée à l'armature (courant galvanique).Leur objectif est de redonner au béton d'enrobage, sa capacité à protéger les armatures.

Il s'agit soit d'augmenter le pH du béton qui a été carbonaté (ré-alcalinisation), soit d'extraire les ions chlorures qui ont pénétré cet enrobage (déchloruration). L'aspect du béton traité est respecté.



Photo III.5 : Application de la pâte sur le treillis



Photo III.6: Traitement en cours

III.1.7. Tissus de fibre de carbone

Les matériaux composites constitués de fibres dans une résine polymère, également connu sous le nom de polymères renforcés de fibres (PRF),ont apparue comme une alternative aux matériaux et techniques traditionnelles. Le renforcement par des PRF-carbones peut être appliqué sur différents types de structures tels que le béton armé, le bois, les structures métalliques. Les PRF sont légers, non corrosif, et présentent une résistance élevée à la traction. L'intérêt de leur utilisation se trouve dans :

- Leur faible densité.
- Leurs propriétés mécaniques longitudinales.
- L'absence de corrosion.
- Leur bonne tenue à la fatigue.
- Leur facilité de manipulation, en outre, ces matériaux sont facilement disponibles sous plusieurs formes.
- Les principaux inconvénients des PRF sont les suivants :
- Une anisotropie marquée.
- Un comportement fragile à la rupture.
- Un prix élevé comparé à l'acier.

Mode opératoire

Cette technique est intéressante dans le cas de perte de section d'acier importante, et quand la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter.

Cette méthode consiste à coller des bandes de toile de fibres de carbone aux surfaces déficientes. Les étapes d'applications suivantes, selon « ASLAN FRP i», sont nécessaires :

1. Une préparation de la surface par jet de sable ou de l'eau doit être effectuée pour exposer les surfaces des agrégats fins. Il existe des normes et de recommandations pour la préparation de la surface tel que : ACI 546R et ICRI 0370.

2. Effectuer des tests d'arrachements (un procédé, à proximité de la surface, dans lequel un disque circulaire en acier est collé à la surface du béton avec une résine époxy ou polyester. La force nécessaire pour tirer de ce disque à partir de la surface, avec une couche de béton fixé, est mesurée).

3. Mesurer la régularité ou la planéité de la surface préparée. Une surface inégale se traduira par pelage prématuré du stratifié. Ceci est mesuré en plaçant une règle droite contre la surface

préparée. Les zones irrégulières doivent être portées avec un mortier de nivellement ou un mastic.

4. Avant d'appliquer l'adhésif structurel au tissu CFRP, le côté sablé ou rendue rugueuse du stratifié est essuyé avec de l'acétone ou un autre solvant jusqu'à ce que tout résidu en excès est retiré de la plaque de carbone.[41]

5. Un adhésif structurel est appliqué à la fois au carbone et à la surface du béton.

6. Le tissu est soigneusement positionné et pressé en place en utilisant un rouleau en caoutchouc dur pour obtenir une épaisseur de ligne de liaison entre 2mm à 3mm. L'adhésif en excès est ensuite essuyé sur les côtés avant qu'il puisse durcir.

7. Pour faciliter l'inspection de contrôle de qualité, des plaques de test adjacentes à la zone en cours de renforcement doivent être préparés simultanément à chacune des opérations ci-dessus. Un test d'arrachement peut alors être effectué pour valider une installation correcte.



Photo III.7 : Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone

III.1.8. Conclusion sur les réparations

On a vu les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé, mais n'importe qu'elle méthode est utilisées, le but est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de satisfaire cette condition par l'ajout d'un autre matériau.

On cherche à ce que la structure puisse reprendre les charges qui lui sont appliquées et même un supplément de charge si c'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires.

III.2. Prévention des armatures dans le béton

III.2.1. Introduction

Il est bien connu que la vie d'une structure en béton armé, dans la mesure où la corrosion est concernée, présente deux périodes distinctes. Au premier lieu (la phase d'initiation) dans le dioxyde de carbone ou les chlorures pénètrent le béton d'enrobage, atteindre l'armature et dé passiver par la suite l'acier. Dans le second (la phase de propagation) a lieu à la corrosion (modèle de Tuutti). La durabilité nécessaire pour la durée de vie demandée peut être obtenue théoriquement en augmentant à la fois la période d'initiation (p.ex. en agissant sur la qualité du béton ou sur l'épaisseur de l'enrobage), et le temps de propagation (par exemple, contrôler les facteurs qui déterminent la vitesse de corrosion, tel que la résistivité du béton).

En général, la première action, qui prolonge le temps d'initiation, est plus viable et fiable.

Dans tous les cas, la prévention commence dans la phase de conception, lorsque la structure est conçue et les calculs de structure sont faits, l'épaisseur de l'enrobage est fixée, les détails sont élaborés, les matériaux et leurs proportions et d'éventuelles mesures supplémentaires de prévention sont choisis. La prévention continue lorsque le béton est mélangé, coulé, compacté et durci et dans l'ensemble de durée de vie de la structure, avec une surveillance, inspection et de maintenance programmée.

Il est bien connu que le coût des préventions adéquates réalisées durant les phases de conception et de construction sont minimes par rapport aux économies qu'ils permettent au cours de la durée de vie et plus encore, par rapport aux coûts de la réhabilitation qui pourraient être nécessaires à des dates ultérieures.

III.2.2. Mesures préventives

III.2.2.1. Armatures résistantes à la corrosion

III.2.2.1.1. Les armatures en acier inoxydable

Un acier inoxydable est un acier qui contient au minimum 10,5% de chrome (EN 10088).

Ce chrome participe à la formation d'une couche superficielle dite couche « passive » ; elle est composée d'un film très mince de quelques nanomètres, invisible à l'oeil nu ; ce film est constitué d'oxydes et d'hydroxydes de chrome. Cette couche fait partie intégrante du métal et elle assure une sorte de protection anti - corrosion durable.

Les aciers inoxydables sont divisés en quatre groupes: ferritique, ferro-austénitique, martensitique et austénitique.

Historiquement, les aciers inoxydables les plus couramment utilisés dans l'industrie de la

construction sont aciers austénitiques tels que 304, 316, et 316 LN aciers inoxydables (Smith et Tullman, 1999). Ces aciers sont en faibles pourcentages de carbone et contiennent environ 18 pour cent de chrome et 8 pour cent de nickel. Ferritique-austénitique aciers inoxydables ont également été utilisés comme acier d'armature pour béton.

On les appelle des aciers inoxydables duplex qui contiennent 21 à 28 pour cent de chrome et de 1 à 8 pour cent de nickel. Les aciers ferritiques ont moins de 17 pour cent de chrome et aciers martensitiques ont de 12 à 18 pour cent de chrome.

Ni l'un ni l'autre n'a été employé en tant qu'acier d'armature de béton.

Une étude de FHWA a évalué l'utilisation de 304 et 316 aciers inoxydables dans les tabliers des ponts en béton armé. L'étude a indiqué que les armatures des tabliers construits en utilisant seulement 304 inoxydables pour les armatures inférieures et supérieures ont démontré une forte résistance à la corrosion.

Toute fois, pour les armatures traditionnelles des ponts construits en utilisant l'acier inoxydable 304 pour les armatures supérieures seulement et couplé avec de l'acier classique pour les armatures inferieures exposées à une faible résistance à la corrosion.

L'acier inoxydable 316 a bien exécuté dans les deux cas (McDonald et al., 1998).

Une autre étude a évalué 304, 316LN, et de l'acier inoxydable duplex 2205 et a indiqué que l'acier inoxydable solide ne montrait aucun signe de corrosion lorsque la concentration de chlorure dans le béton adjacent aux barres en acier inoxydable a été 15 fois plus élevée que le seuil d'initiation de la corrosion classique (Clemena et Virmani, 2002).

Bien que beaucoup d'études aient indiqué le rendement élevé des aciers inoxydables dans le béton, le principal obstacle à son utilisation dans les structures en béton armé est leur coût initial élevé.

III.2.2.1. 2.Le revêtement imperméabilisant

III.2.2.1.2.1. Les peintures

Une peinture est composée d'un liant, de matières pulvérulentes (pigments, charges), d'additifs et d'un véhicule (solvant, eau, ou pas de solvant du tout).

Les peintures permettent de réaliser des revêtements sous forme de « systèmes de peinture», car il s'agit dans le cas général d'un ensemble de trois couches dans lequel chaque couche a sa fonction propre : impression, intermédiaire et finition. La couche d'impression permet au système de peinture de bien accrocher au support. À l'exception de l'impression qui parfois peut être non pigmentée, les peintures sont opaques et filmogènes.

La norme NF T 36-005 définit une classification des peintures suivant la nature chimique du liant, qui sert généralement à les distinguer Celles-ci sont ainsi qualifiées d'acryliques, de Polyuréthanes, d'époxydes, de Pliolites®, etc.

Les épaisseurs sèches totales des systèmes de peinture visés ici peuvent varier de 50 à 300 |jm. Peuvent entrer dans cette catégorie des peintures s'inscrivant dans la famille des liants hydrauliques modifiés (LHM).

III.2.2.1.2.2. Les lasures

Le terme « lasure » a été emprunté au domaine de la protection des bois. Les lasures conduisent à des revêtements transparents, éventuellement colorés, qui laissent apparaître la texture superficielle du parement de béton.

Les lasures ne sont pas opacifiantes, et sont relativement fluides pour bien imprégner le support. Les résines qui constituent le liant sont le plus souvent de nature acrylique ou polyuréthane. Leur épaisseur à la surface du béton est de l'ordre de 50jm.

III.2.2.1.2.3. Les revêtements minces

Sont concernés dans ce document :

-des revêtements semi-épais décrits dans la norme XP T 34-720,

- des revêtements plastiques épais (RPE) décrits dans les normes NF T 30-700 à 707, contenant des charges grossières et généralement à base de liant acrylique ou polyuréthane,

- des revêtements d'imperméabilité, souvent à base de résines acryliques, définis dans les normes NF P 84-401 et XP P 84-402 et 403, et surtout utilisés dans le domaine du bâtiment, conformément aux normes NF P 84-404 1 à 3 complétées par le fascicule FD P 84-405,

- des revêtements divers à base de résines polyuréthane, méthacrylique, ou encore de liant hydraulique modifié (LHM).

Ces revêtements masquent le plus souvent complètement le support béton . Ils peuvent pour certains s'appliquer avec des spatules ou des machines de projection spéciales. Ils nécessitent généralement une couche d'impression très fine pour bien accrocher au support (il s'agit toujours de « systèmes »).

Les épaisseurs déposées varient de plus de 300 pm à 3 mm (valeur limite considérée dans le présent document).[34]

III.2.2.2. Les inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont appliqués à la surface des bétons à traiter. Ils vont migrer dans la zone d'enrobage vers les armatures assurant ainsi leur protection contre la corrosion en abaissant la vitesse de corrosion de l'acier.

L'inhibiteur est appliqué directement sur la surface du béton après préparation du support (enlèvement de la laitance, des salissures, des revêtements éventuels…) par pulvérisation sous forme liquide en plusieurs passes ou par application directe sous forme gélifiée sur la surface.

Il pénètre dans le béton par capillarité. Cette technique permet de protéger les armatures de la corrosion sans avoir à purger le béton carbonaté et donc en conservant l'aspect initial du parement de l'ouvrage. La pénétration des inhibiteurs au sein du béton dépend de nombreux paramètres dont la porosité du béton, le degré d'humidité, le niveau de carbonatation, la teneur en chlorures… La technique fonctionne sous réserve d'une teneur limitée en chlorures dans le béton et fonctionne d'autant mieux pour les armatures faiblement enrobées. Souvent le traitement doit être complété par la mise en œuvre d'un revêtement de protection.[42]

Nota : les inhibiteurs de corrosion peuvent aussi être incorporés dans le béton frais lors de la construction d'ouvrage neuf.

Ils sont plus efficaces en présence d'un phénomène de carbonatation qu'en présence de chlorures.

III.2.2.3 .1.La déchloruration

La déchloruration est une technique de traitement électrochimique qui consiste à extraire les chlorures et produire des ions hydroxydes (OH–) situés dans la zone d'enrobage qui protège les armatures, afin de freiner la propagation de la corrosion.

La totalité des chlorures ne peut pas être extraite, il convient de s'assurer que la teneur résiduelle en chlorure au droit des armatures est inférieure aux valeurs limites admissibles (0,4% du poids du ciment).

Ces traitements peuvent être réalisés :

- à l'aide d'un générateur électrique qui impose un courant continu (tension 40 V) circulant de l'anode vers l'armature. Si nécessaire la déchloruration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ou simultanément ;
- à l'aide d'une anode active (grille d'acier ou en titane) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique. Dans ce cas la réalcalinisation et la déchloruration peuvent être effectués en même temps.

Pour les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée à la surface de la zone de béton à traiter. Elle doit être humidifiée régulièrement pour permettre la circulation du courant.

Ces traitements sont temporaires, leur durée d'application est de quelques semaines.

Il convient préalablement d'assurer une continuité électrique entre les armatures.[42]

III.2.2.4 .2.La ré-alcalinisation

Ce traitement électrochimique du béton consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins (Na+ ou K+) dans la zone d'enrobage des armatures.

Il va permettre de redonner une alcalinité élevée au béton qui a été carbonaté et donc stopper la corrosion des armatures.

Le traitement est réalisé avec une densité de courant imposé de 0,5 à 1 A/m2 et dure une à deux semaines. Il induit une électrolyse autour des armatures qui contribue à la création d'OH- et à la remontée du pH à des valeurs supérieures à 10.

Les étapes du traitement **:**

- projection d'une première couche de pâte associée à une solution électrolytique adaptée ;
- mise en place d'un treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement ;
- connexion du treillis à l'anode ;
- projection d'une deuxième couche de pâte ;
- raccordements électriques au générateur de courant continu ;
- humidification régulière de la pâte par l'électrolyte ou par l'eau ;
- suivi des tensions et courants ;
- dépose de l'ensemble de l'installation. [42]

III.2.2.4 .3.La protection cathodique

La protection cathodique à courant imposé consiste à diminuer à l'aide d'un courant électrique (2à20mA/m2) le potentiel électrique de corrosion de l'armature jusqu'à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier est négligeable. Cette technique permet de restaurer la passivité des armatures, elle est installée de manière définitive et donc protège la structure en permanence.

Les dimensions des anodes et la capacité du générateur de courant sont définies en fonction des dimensions des armatures (diamètres, longueurs) et des surfaces à traiter .Il convient de rétablir préalablement au traitement la continuité électrique des armatures et parfois de protéger la surface du béton après traitement pour éviter de nouveaux désordres.

Un générateur électrique impose un courant qui circule de l'anode (pôle positif : treillis en titane ou en carbone disposé sur toute la surface de la zone à traiter et enrobé par un matériau à base de liants hydrauliques) vers l'armature (pôle négatif : cathode).

III.2.2.5. Protection contre toute pénétration

Tableau III.1 : Protection contre toute pénétration . [43]

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés**
Protection contre la Pénétration Réduction ou prévention de la pénétration d'agents indésirables, par exemple eau, autres liquides, vapeur, gaz, produits chimiques et agents biologiques.	**1.1 Imprégnation**	*(sans objet)*
	1.2 Revêtement de surface avec ou sans capacité de pontage des fissures	**Masterseal®** **PCI Polyflex®**
	1.3 Fissures colmatées localement (1)	**PCI Pecitape®** 3000
	1.4 Remplissage des fissures	Matériaux d'injection **PCI Apogel®**
	1.5 Transfert des fissures en joints (1	**PCI Escutan®** **PCI Elritan®**
	1.6 Montage de panneaux extérieurs (1)(2)	*(sans objet)*
	1.7 Applications de membranes (1)	Membranes **PCI Pursol® 640**

(1) Ces méthodes sont susceptibles de faire appel à des produits et systèmes non couverts par la norme EN 1504
(2) Le fait que des méthodes soient mentionnées dans cette norme ne signifie pas qu'elles ont été autorisées

Méthode 1.2



Photo III.8 : Revêtements de protection PCI Masterseal et Barraseal : disponibles en versions rigide, flexible, en acrylique, en époxy ou en PU, protection contre tous les types d'agressions.

Méthode 1.4



Photo III.9 : Injection de résine PCI dans les fissures : versions rigide, flexible, mousse, à base d'époxy ou de PU.

Méthode 1.7

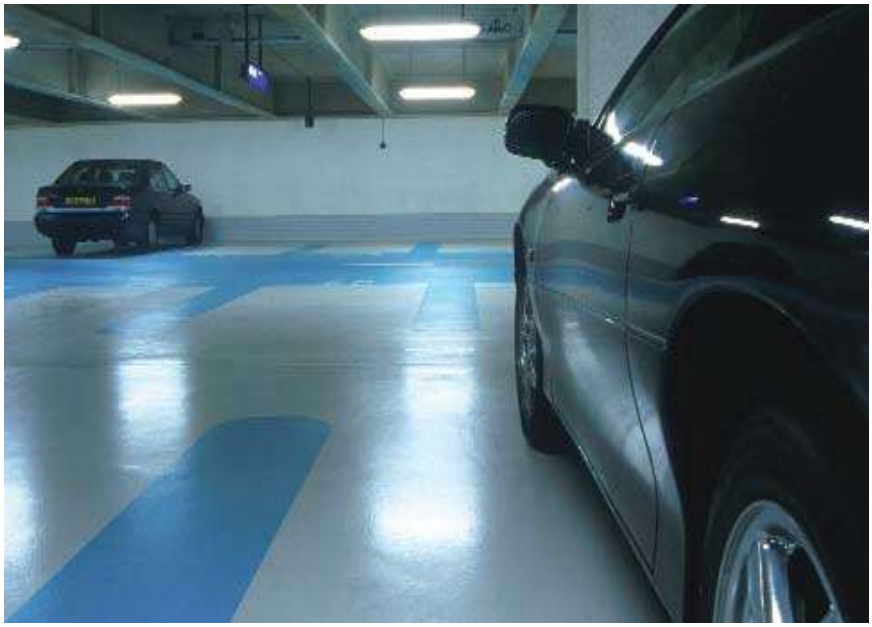


Photo III.10 : Membranes Conideck : résistantes aux produits chimiques et à l'usure, à base d'époxy, de PU, garantissant un niveau de protection optimal.

III.2.2.4. Contrôle du taux d'humidité

Tableau III.2 : Contrôle du taux d'humidité

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés**
Contrôle de l'humidité Réglage et maintien de la teneur en humidité du béton selon une gamme de valeurs spécifiée.	**2.1 Imprégnation hydrophobe**	**Masterseal®**
	2.2 Revêtement de surface	**Masterseal®** **PCI Barraseal®**
	2.3 Protection ou sur-revêtement (1)(2)	***(sans objet)***
	2.4 Traitement électrochimique (1)(2)	***(sans objet)***

(1) Ces méthodes sont susceptibles de faire appel à des produits et systèmes non couverts par la norme EN 1504

(2) Le fait que des méthodes soient mentionnées dans cette norme ne signifie pas qu'elles ont été autorisées

Méthode 2.1



Photo III.11 : Traitement hydrophobe PCI Silconal 303 : émulsion à base de silane, applicable dans de nombreuses situations ou circonstances.

Méthode 2.2



Photo III.12 : Le taux d'humidité du béton peut être contrôlé à l'aide de revêtements de protection PCI Masterseal et Barraseal à base d'acrylique, d'époxy, de PU, rigides ou flexibles.

Méthode 2.2



Photo III.13 : Revêtements imperméabilisants PCI Barraseal : à base de ciment, rigides ou flexibles.

III.2.2.5. Restauration du béton

Tableau III.3 : Restauration du béton

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés**
Restauration du béton - Restauration de la forme et de la fonction spécifiées à l'origine, du béton d'origine d'un élément de la structure. - Restauration de la structure en béton par remplacement partiel.	**3.1 Application du mortier à la main**	**PCI Nanocret®**
	3.2 Nouveau coulage de béton	**PCI Nanocret®**
	3.3 Projection de béton ou de mortier	**PCI Nanocret®**
	3.4 Remplacement de certains éléments	***(sans objet)***

Méthode 3.1



Photo III.14 : Mortiers de réparation PCI : PCI Nanocret R4 / R3 / R2 / FC, appliqués à la main.

Méthode 3.3



Photo III.15 : Les mortiers de réparation PCI Nanocret® permettent d'obtenir une qualité optimale et sont extrêmement faciles à appliquer, application des PCI Nanocret R4 / R3 par projection.

Méthode 3.1



Photo III.16 : Mortiers de réparation PCI Nanocret :nouveau coulage d'éléments avec le PCI Nanocret R4 Fluid.

III.2.2.6. Renforcement structural

Tableau III.4 : Renforcement structural

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés**
Renforcement structurel Augmentation ou restauration de la portance d'un élément de la structure en béton.	**4.1 Ajout ou remplacement d'armatures en acier encastrées ou externes**	**Scellement Masterflow® PCI Seltex®**
	4.2 Installation de barres liées entre elles dans des trous préformés ou forés dans le béton	**PCI Barrafix® PCI Repahaft® PCI Seltex®**
	4.3 Collage de plaques	**Résines MBrace® et adhésifs PCI Barrafix®**
	4.4 Ajout de mortier ou de béton	**PCI Nanocret®**
	4.5 Injection dans les fissures, vides ou interstices	**Matériaux d'injection PCI Apogel®**
	4.6 Remplissage des fissures, vides ou interstices	**Matériaux d'injection PCI Apogel®**
	4.7 Précontrainte — (postcontrainte) (1)	***(sans objet)***

(1) Ces méthodes sont susceptibles de faire appel à des produits et systèmes non couverts par la norme EN 1504

Méthode 4.3



Photo III.17 : Renforcement structurel MBrace : laminés, lamelles en fibres de verre, de carbone ou d'aramides,

Méthodes 4.5 et 4.6



Photo III.18 : Produits d'injection PCI Apogel utilisés pour la fermeture des fissures par transfert de force (transfert de charge).

Méthodes 4.1 et 4.4



Photo III.19 : Renforcement structurel avec PCI Nanocret R4 Fluide.

III.2.2.7. Résistance physique

Tableau III.5 : Résistance physique

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés***
Résistance physique Augmentation de la résistance aux attaques physiques ou mécaniques	**5.1 Recouvrements ou revêtements**	Durcisseurs de sols **Mastertop®** Mortiers de resurfaçage **PCI Polycret®** Revêtement **Masterseal® et PCI Barraseal®**
	5.2 Imprégnation	*(sans objet)*

Méthode 5.1



Photo III.20 : Revêtements de sols Mastertop : à base de ciment, époxy, PU, augmentation considérable de la résistance physique du béton.

Méthode 5.1



Photo III.21 : Revêtements Mastertop : résistance à l'abrasion, etc.

Méthode 5.1



Photo III.22 : Il est possible d'augmenter la résistance physique ou mécanique grâce aux mortiers de resurfaçage PCI Polycret.

III.2.2.8. Résistance aux produits chimiques

Tableau III.6 :Résistance aux produits chimiques

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés***
Résistance aux produits chimiques Augmentation de la résistance de la surface du béton aux détériorations par attaque chimique	**6.1 Recouvrements ou revêtements**	Revêtements **PCI Pursol®** Revêtements de sol **Ucrete®** **Masterseal®** **PCI Barraseal®**
	6.2 Imprégnation	*(sans objet)*

Méthode 6.1



Photo III.23 : Revêtements Masterseal 136, 138, 185, 190 résistants aux produits chimiques.

Méthode 6.1



Photo III.24 : Systèmes Masterseal : 138, 190 – époxy / 136 – polyuréthane / 185 – époxy ciment.

III.2.2.9. Préservation ou restauration de la passivité

Tableau III.7 : Préservation ou restauration de la passivité

Définition du principe	Méthodes sur la base du principe	Produits recommandés
Préservation ou restauration de la passivité Création des conditions chimiques dans lesquelles la surface de l'armature est maintenue ou retourne à l'état passif.	**7.1 Augmentation de la couverture de l'armature avec mortier ou béton hydraulique supplémentaire**	**PCI Nanocret®**
	7.2 Remplacement du béton contaminé ou carbonaté	**PCI Nanocret®**
	7.3 Réalcalinisation électrochimique du béton carbonaté (1)	*(sans objet)*
	7.4 Réalcalinisation du béton carbonaté par diffusion	**PCI Barraseal®** **PCI Barraseal®**
	7.5 Extraction électrochimique du chlorure (1)	*(sans objet)*

Méthode 7.1



Photo III.25 : Augmentation de l'enrobage de l'armature par projection de PCI Nanocret R4.

Méthode 7.4



Photo III.26 :Réalcalinisation par diffusion : utilisation du PCI Barraseal 100 FX à base de ciment.

Méthode 7.2



Photo III.27 :PCI Nanocret R4 / R3 : utilisé en remplacement du béton contaminé par les chlorures.

III.2.2.10. Augmentation de la résistivité

Tableau III.8 : Augmentation de la résistivité. [43]

Définition du principe	**Méthodes sur la base du principe**	**Produits recommandés***
Augmentation de la résistivité Augmentation de la résistivité électrique du béton.	**8.1 Limitation de la teneur en humidité par des traitements de surface, des revêtements ou recouvrement**	**Masterseal®** **PCI Silconal®** **PCI Barraseal®** Membranes **PCI Pursol®**

Méthode 8.1



Photo III.28 : Revêtements protecteurs et imperméabilisants Masterseal.

Méthode 8.1



Photo III.29 : Systèmes d'étanchéité Conipur. Évitent la pénétration de l'eau et permettent au béton de sécher.

Méthode 8.1



Photo III.30 : Traitement hydrophobe par PCI Silconal 303.

Conclusion

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeur pour nos sociétés. L'environnement construit en béton armé date principalement de l'après guerre et nécessite d'urgence un plan de remise à niveau, quand il n'est pas déjà trop tard et que la seule solution qui reste est la démolition. Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton. La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufrures, doit apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer. En vue de favoriser l'adhérence et donc la durabilité de la réparation, les études montrent à suffisance l'importance de l'adhérence initiale du produit de réparation : c'est une condition nécessaire mais pas une condition strictement suffisante de longévité. A ce sujet, la préparation adéquate de la surface à réparer, consistant à enlever le

béton de mauvaise qualité, à garantir une rugosité minimale pour favoriser l'accrochage mécanique, à obtenir une surface propre sont des opérations indispensables pour garantir l'adhérence. L'emploi de plus en plus généralisé de bétons auto-plaçant mais aussi de bétons à ultra-hautes performances posent question pour l'avenir à moyen et long termes les techniques et les matériaux employés aujourd'hui sur des bétons de moindres qualités seront-ils toujours valables pour des matériaux plus résistants.

IV.1. Problématique

L'objet de notre travail est l'établissement d'un diagnostic technique qui consiste en ce qui suit :

- L'évaluation des dommages et désordres subis par un ensemble immobilier ;
- L'interprétation de l'origine probable des désordres, en précisant le lien objectif entre les causes et effets ;
- Donner un avis sur l'état de conservation de l'ouvrage diagnostiqué ;
- La préconisation de recommandations techniques portant sur les solutions à adopter quant à la remise en état de l'ouvrage ;
- Faire une conclusion.
- Il est à signaler que le présent diagnostic technique est basé sur l'examen technique visuel des éléments constitutifs de l'ouvrage objet de notre travail avec l'identification de leurs signes d'altération, y compris le constat des désordres apparents tels qu'ils ont pu être observés lors de notre intervention.

IV.2. Description du projet

Le projet est un ensemble immobilier à usage de bureaux+commerces, sis aux «Bananiers » commune de Mohammedia à Alger sur un site d'une superficie de 2ha environ. Il abrite trois immeubles de grande hauteur (IGH) de 16 niveaux et 9.500 m^2 chacun, un centre commercial et sportif de 28.000 m^2 couverts et deux parkings à étages de 12.500 m^2.



Photo IV.1 : **Vue générale sur les Tours de Commerces les Bananiers-Alger**



Photo IV.2 : **Vue aérienne Tours de Commerces les Bananiers-Alger**



Photo IV.3 : Plan de situation du projet (distance 1500m du front de Mer)

IV.3. Diagnostic des désordres constatés

Cette partie présente des renseignements sur le processus d'évaluation de béton dans les structures existantes.

L'étape diagnostic a permis l'adaptation des méthodes de réparation les plus convenables et l'évaluation des causes des dégradations.

Ces causes peuvent être engendré du processus de vieillissement naturel de la structure, étant donné que le projet n'est pas protégé d'un côté et de l'autre côté cela peut aussi être à cause de l'environnement immédiat.

Afin de conserver les réparations et les rendre durables, il est nécessaire de réaliser des travaux de protection adaptés, pour éviter l'apparition de nouvelles pathologies semblables.

IV.3.1. Relevé visuel

Un état des lieux basé sur des constatations et relevées est effectué pour déceler toute présence de désordres apparents ou de pathologie affectant tout ou une partie des ouvrages existants.

L'examen s'est porté sur les parties visibles et accessibles de l'ouvrage et le présent constat ne tient pas compte **des anomalies non décelables, ni des vices cachés de la structure, dans les fondations ou dans le sol**

À partir des visites des lieux, des relevés et des contrôles effectués sur les différents composants des blocs. Ce relevé a permis de :

- Scanner 3D HW LS Focus3D X330
- Appareil topographique TS 06 LEICA
- Appareil photos – (pour prise des photos)
- Laser Distomètre X310/120m LEICA

A. **QUALIFIER LES DESORDRES,** pour chaque type à une origine et des Conséquences particulières.

B. **QUANTIFIER LES DESORDRES,** selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.

C. **LOCALISER LES DESORDRES,** afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème.

IV.4. Localisation des désordres (voir tableau et plans de repérage par niveau) :



Photo IV.4: Parking



Photo IV.5: Parking

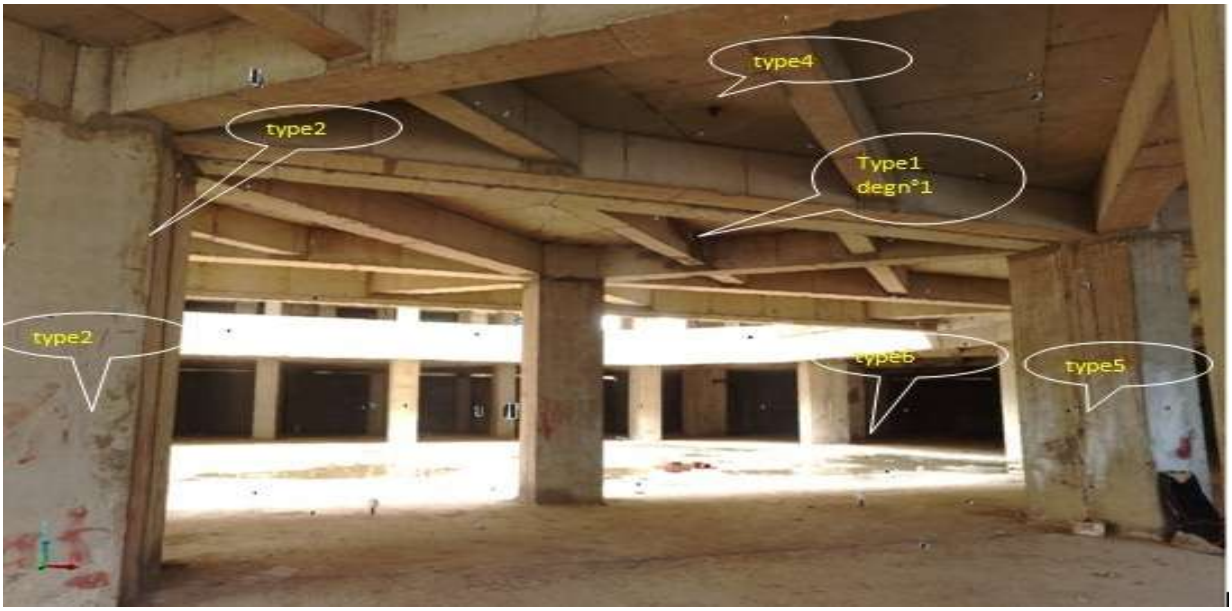


Photo IV.6: Le socle administratif

VI.5. Qualification des désordres

Tableau IV .1 : Qualification des désordres

PATHOLOGIE RELEVEE					
TYPES	**CONSTAT**		**DESCRIPTION**	**CAUSES**	**RISQUE**
TYPE 1	**Corrosion**	Corrosion superficielle **(degrés n°1)**	Apparitions des aciers	✓ Soulèvement et détachement des éclats de béton ✓ Mauvaise disposition des armatures ✓ Fissures infiltrantes	Une modification du comportement de la structure, mettant en cause la durée de vie de l'ouvrage.
		Corrosion semi profonde **(degrés n°2)**			
		Corrosion profonde **(degrés n°3)**			
TYPE 2	**Ségrégation**	Bullage	Présence de cavités	✓ Formulation inadapté ✓ Mise en œuvre inadapté	problème d'ordre esthétique.
		Nids de cailloux	Granulat apparent	✓ Vibration inadaptée	Encrassement.
		Fuite de laitance	Béton poreux	✓ Mauvaise étanchéité	Encrassement.
TYPE 3	**Fissures**	ÉPAUFRURE : Fissure Superficielle **(fis n°1)**	ces phénomènes se manifestent par un réseau de fines ouvertures qui n'intéresse que la couche superficielle de laitance du béton brut	✓ Corrosion des armatures	Pénétration des eaux. Extension des désordres.
		FISSURES Semi Profonde **(fis n°2)**	Plus épaisses que les fissures classiques, elles ont une largeur supérieure à 2mm	✓ Corrosion des armatures ✓ Attaques sulfatiques ✓ Origine thermique (dilatation, contraction du béton sous l'effet de la chaleur et du froid)	

		Fissures Profonde **(fis n°3)**	l'ouverture varie dans le temps en fonction de gradients thermique ou hygrométrique ou de sollicitations de l'ouvrage.	✓ Corrosion des armatures ✓ Attaques sulfatiques ✓ Origine thermique (dilatation, contraction du béton sous l'effet de la chaleur et du froid)	Détérioration de la structure.
TYPE 4	**Infiltration D'eau**		Présence d'eau	✓ Absence d'étanchéité ✓ Vieillissement des joints	✓ Fissuration des éléments de structure. ✓ Moisissures. ✓ Développement de bactéries. ✓ Odeurs nauséabondes.
TYPE 5	**Dégradation des joints**		joint détérioré	✓ absence d'étanchéité	vieillissement du joint
TYPE 6	**Efflorescences**		Cristallisation (blanchâtres) à la surface du béton	✓ Remontée d'eau localisée chargée en chaux à la surface du béton. ✓ Apport de sels solubles de l'environnement (sulfates, chlorures). ✓ Porosité du béton élevée : l'eau peut facilement atteindre la surface et pénétrer dans le béton	✓ En fonction de l'hygrométrie ambiante. ✓ Dégradation éventuelle du béton. ✓ Dégradation des armatures.

IV.6. Constatation des désordres

D'après le diagnostic établi sur l'ensemble de l'ouvrage, et d'après le constat technique visuel, nous avons relevé un nombre assez important de désordres, qui se manifestent essentiellement par la dégradation du béton d'enrobage, par la corrosion avancée des armatures en certains endroits et par l'absence totale d'un complexe d'étanchéité.

Ces désordres se résument comme suit :

- ✓ Eclatement du béton avec des fissurations verticales et horizontales, assez prononcées en plusieurs endroits, au niveau des poutres, poteaux, poutrelles et paillasses d'escalier allant jusqu'à épaufrures. A certains endroits, on a observé des armatures de ferraillage mises à nu très corrodées allant jusqu'à l'effritement.



Photo IV .7: Corrosion au niveau du ferraillage poteaux





Photo IV.8 : Corrosion au niveau du ferraillage poutres




Photo IV.9 : Corrosion au niveau du ferraillage voiles




Photo IV.10 : Corrosion au niveau du ferraillage voile de monte charge



Photo IV.11 : Corrosion au niveau du ferraillage dalle de monte charge



Photo IV.12 : Ségrégation au niveau des poteaux



Photo IV.13 : Ségrégation au niveau des poutres



Photo IV.14 : Ségrégation au niveau des voiles de monte charge




Photo IV.15 : Ségrégation au niveau des escaliers




Photo IV.16 : Ségrégation au niveau des plancher




Photo IV.18 : Infiltration d'eau à travers les dalles

Photo IV.17 : Etanchéité dégradé



Photo IV.19 : Détérioration du joint au niveau des poteaux



Photo IV.20 : Détérioration du joint au niveau des planchers

IV.7. Mode opératoire de réparation

IV.7.1. Type 1 : Corrosion

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.

-1er degré : Corrosion superficielle

- ✓ Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant.
- ✓ Protéger les surfaces avec un produit approprié pour éviter la corrosion.
- ✓ Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le tourde la zone à réparer.
- ✓ L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produits choisit entre 2 et 100 mm (indiqués par le fournisseur).
- ✓ Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge.
- ✓ Respecter les valeurs d'enrobage définies par les règles BAEL.



Photo IV.21 : Gauche à droite ; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche

-(2eme degré, 3emedegré)- corrosions semi profondes et profonde

- ✓ Un nettoyage surfacique afin de faire disparaitre toute poussière ou toute souillure subsistant après élimination des bétons dégradés, ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage).
- ✓ Pour traiter les armatures corrodées, il y a lieu 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 et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon (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.

- ✓ Remplacement des armatures corrodés qui seront de même nature et ces dernières seront mises en place par scellement avec des produits spécifiques afin de reconstituer la situation initiale. (voir détails d'exécution).
- ✓ Protection des armatures par application sur toutes les surfaces dégagées par un inhibiteur de corrosion.
- ✓ Réfection des bétons qui consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier adéquat. (voir matériaux utilisés).

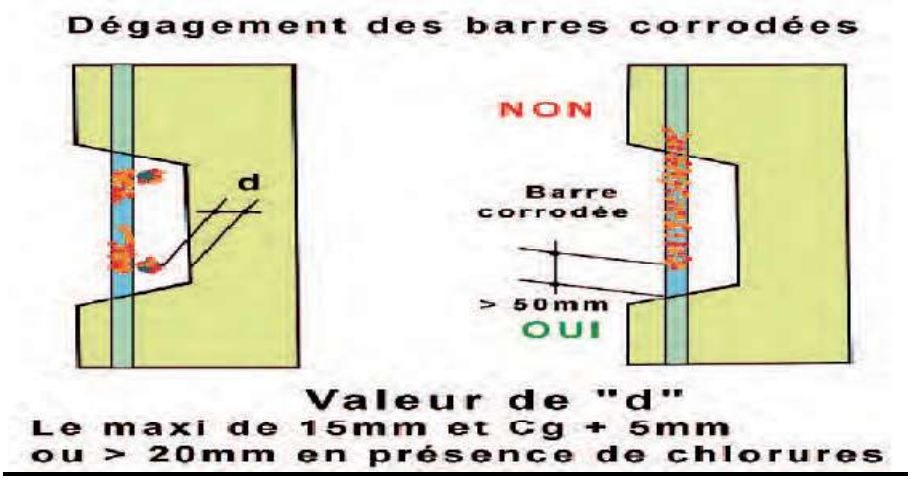


Figure IV.1 : Principe de dégagement et de nettoyage des armatures corrodées

IV.7.2. Types 2 : Ségrégation : Bullage, Nid de cailloux et Fuite de laitance

Le même mode opératoire est préconisé pour ces types de pathologies : **le ragréage** qui est une méthode de réparation locale, et consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation, et qui se fait comme suit :

- ✓ Débarrasser des partis non adhérents
- ✓ Éliminer toutes les traces de laitance
- ✓ Dégager les armatures de toute trace de rouille par sablage ou brossage Puisles recouvrir par un inhibiteur de corrosion
- ✓ Reconstruire un béton avec un mortier adhérent étanche et résistant adapté à l'environnement (situation géographique et caractéristiques climatiques de la zone sont agressifs pour le béton) afin de protéger l'ouvrage.
- ✓ Appliquer le mortier à la truelle en serrant, lisser le mortier à l'aide d'une taloche éponge au polystyrène dès qu'il commence à tirer

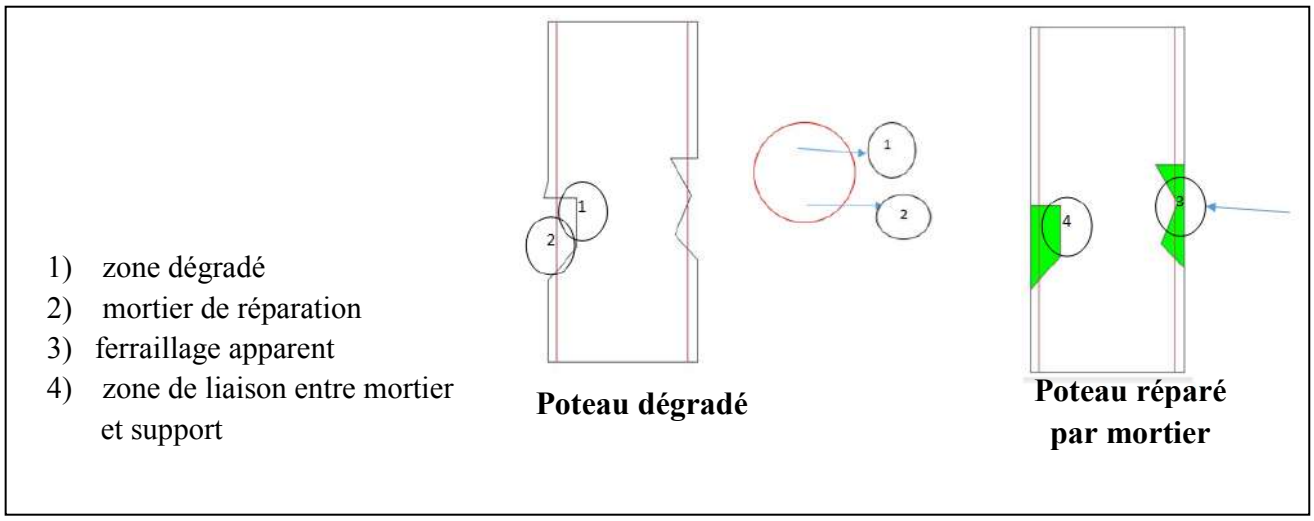


Figure IV.2 : le ragréage

IV.7.3. Type 3 : Fissures

IV.7.3.1. Fissures superficielles : Les épaufrures

- ✓ Ouverture de la fissure à l'aide d'un triangle.
- ✓ Poncez légèrement les bords de la fissure.
- ✓ Dépoussiérez à l'aide d'une brosse métallique suivi d'un nettoyage par pinceau humide à l'intérieur et à l'extérieur de la fissure.
- ✓ Injecter un produit hydrofuge avec le béton de réparation pour protéger contre les infiltrations d'eau et la limitation des effets du gel en respectant le dosage en eau préconisé par le fabriquant.
- ✓ Eviter toute variation d'ouverture des fissures pendant la durée de l'injection et du durcissement du produit d'injection pour éviter de détruire les liaisons en train de se former
- ✓ Attendre le durcissement du produit d'injection avant de recomprimer les fissures

IV.3.2. Fissures semi profondes

- ✓ Par mesure de sécurité, procéder à l'étaiement des éléments de structures portants par des supports métalliques temporaires durant la réparation des éléments structuraux endommagés.
- ✓ Dans le cas d'une fissure plus profonde et plus large, la préparation est identique à une fissure superficielle.
- ✓ L'application d'un hydrofuge peut être appliquée en épaisseur, le retrait au séchage sera plus important.
- ✓ Déborder un peu plus pour obtenir une surface bien uniforme.

IV.7.3.2. Fissures profondes

Les fissures profondes n'ont pas été formellement recensées lors du diagnostic, néanmoins s'il y'a apparition des fissures qui peuvent être qualifié de profondes, les mesures suivantes devront entre appliquées.

- ✓ Par mesure de sécurité, un étaiement par des supports temporaires doit être assuré durant la réparation les éléments structuraux endommagé par les fissures.
- ✓ Pour voir l'état interne de la fissure, un nettoyage est recommandé.
- ✓ Ouverture de la fissure à l'aide d'un disque abrasif ou un marteau piqueur.
- ✓ Dépoussiérer la fissure à l'air comprimé.
- ✓ Percer des trous afin de sceller les injecteurs.
- ✓ Vérifier s'il y a lieu de remplacer les armatures corrodées qui seront de même nature et ces dernières seront mises en place par scellement avec des colles spéciales afin de restituer la situation initiale, et protéger ces armature en utilisant des inhibiteurs contre la corrosion.
- ✓ Sceller les injecteurs en appliquant des résines ou bien hydrofuge destinées à la réparation des fissures.
- ✓ Injecter un durcisseur, en utilisant le matériel approprié.

IV.7.4. Type 4 : Infiltration d'eau

Depuis la réalisation du projet à la fin des années 90, les travaux d'étanchéité n'ont pas été effectués, et sous l'effet des intempéries et des cycles climatiques, les façades et les toitures ont été le plus exposées, des infiltrations d'eaux ont provoqué des dégradations aux niveaux des voiles (murs) et des dalles à l'intérieur de l'ouvrage. (Voir tableaux de localisation des pathologies en annexe 2).

Pour prévenir cette dégradation, la protection de l'ouvrage est fondamentale tout en procédant à l'exécution des travaux d'étanchéité pour les terrasses, qui méritent la plus grande attention ; à cet effet les mesures suivantes devront entre appliquées :

- ✓ Nettoyage des partis non adhérents (les arbustes, herbes ...).
- ✓ Vérification de la pente de la dalle d'une manière à faciliter l'écoulement des eaux.
- ✓ S'assurer que le nombre des évacuations d'eaux pluviales soient suffisantes par rapport à la surface des terrasses.
- ✓ Application de l'étanchéité la mieux adaptée, adéquate, innovante et durable. (les techniques diffèrent selon les objectifs d'utilisation de la terrasse et qui seront conseillées par l'entrepreneur).

- ✓ La forme de pente d'épaisseur variant entre05 cm et 07cm, doit être armée d'un treillis soudé conformément au DTR-E4-1.

Des précautions supplémentaires concernant les joints doivent être prises avant la mise en œuvre de l'étanchéité, à savoir :

- Respecter tous les joints de dilatation et construction de la couverture.
- Poser au droit des joints, un cordon à section circulaire en polyéthylène expansé à alvéoles fermés, dont la fonction est de servir d'appui au traitement, qui sera appliqué postérieurement, tout en évitant que celui-ci reste collé au fond du joint.

IV.7.5. Type 5 : Joint de dilatation

Le joint de dilatation divise le bâtiment en plusieurs sections indépendantes de dimensions limitées et d'une manière régulière. Il a pour fonction d'absorber la dilatation issue des variations des températures, des mouvements de sols et des charges d'exploitations du bâtiment dans le but d'éviter la fissuration.

Le joint doit être sain, propre, exempt d'huile, de poussières et des parties mal adhérente, il doit être solide du point de vue structurel ; la surface sur laquelle le traitement va être appliqué doit être sèche et non humide.

Dans notre projet, les joints ont été détériorés par manque d'étanchéité et absence du couvre joint.

Pour calfeutrer un joint de dilatation, il faut :

- ✓ Appliquer une colle à la spatule en couche mince de part et d'autre du joint.
- ✓ Poser immédiatement une bande de pontage (qui résiste aux mouvements du joint dans plusieurs directions), collée sur les lèvres du joint, en pressant pour faire ressortir la colle par les trous latéraux de la bande.
- ✓ Appliquer une seconde couche de colle sur les bords de la bande en débordant de 2cm.

IV.7.6. Type 6 : Efflorescence

L'efflorescence est une cristallisation des minéraux qui peut se former à la surface,pour son traitement il faut :

- ✓ Brosser les traces d'efflorescence à l'aide d'une brosse métallique.
- ✓ Utiliser une solution anti efflorescent pour l'élimination des sels blanchâtres.
- ✓ Appliquer un produit à base acide pour éliminer efficacement l'efflorescence.
- ✓ Bien homogénéiser le produit et les appliquer autant de fois que nécessaire.

IV.8. Matériaux utilisés et techniques de réparation

IV.8.1. Caractéristiques des matériaux utilisés :

Plusieurs méthodes sont étalées ci-après pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres.

Elles supposent une mise en œuvre attentive, le contrôle des résultats et une surveillance adaptée.

Chaque procédé ou traitement doit comporter les étapes suivantes :

- ✓ **Évaluation** de la structure
- ✓ **Nature et causes** des éventuelles dégradations
- ✓ **Choix** entre les **solutions** possibles sur le plan technique
- ✓ **Compatibilité** entre les **procédés** et les exigences diverses.

IV.8.2. La réfection des bétons :

L'efficacité de toutes les opérations de réparation est conditionnée par la qualité des matériaux et leur mise en œuvre :

1. Ciment : la classe et le dosage du ciment dépendent :

- le dosage de ciment ne doit pas être inférieur à 350kg/m^3 de béton en œuvre pour les bétons et à 450kg/m^3 de sable pour les mortiers.
- l'agressivité du milieu.

2 .Agrégat : les agrégats doivent être propres et résistants et il est préférable d'utiliser des agrégats roulés qui présentent une meilleure mobilité que les concassés.

3. Eau : l'eau doit être saine et dépourvue d'éléments corrosifs, une attention particulaire est à observer pour le dosage en eau qui doit respecter E/C=0.45, et dansle cas où on utilise les adjuvants, il est recommandé de tenir compte de leurs éventuels effets dans la détermination de la quantité d'eau à mettre en œuvre.

4-adjuvants : ils jouent le rôle le plus important dans la réparation de l'ouvrage.

5- Aciers : les aciers qu'on utilisera doivent être conformes aux normes en vigueur.

6- Résines : les résines synthétiques sont des corps à haut poids moléculaire, formés par l'assemblage répétitif d'un ou plusieurs motifs chimique et elles sont présentes sous différentes formes : liquide, plastique et solide.

Pour les travaux de réparation, il est recommandé l'utilisation des résines époxydiques, sous forme liquide, qui sont constitué par le mélange d'une base époxydique et d'un durcisseur, emballé séparément.

Les résines époxydiques sont caractérisées par :

- La stabilité au stockage
- L'excellente adhérence au béton.
- Un retrait faible (évitant les fissures dues au retrait).

La réfection ou bien la réparation des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier, possédant les caractéristiques suivantes :

- Tenue verticale sans coffrage.
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support.
- Adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support.
- Imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs.
- Coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support.
- Bonne protection des aciers.

IV.8.3. Choix des produits

Les principales caractéristiques qui doivent guider dans le choix du produit le plus approprié au travail seront :

- Viscosité et injectabilité
- Durée pratique d'utilisation
- Vitesse de prise
- Propriété mécanique (résistance, élasticité...)
- Adhérence
- Comptabilité ou non avec humidité
- Facilité la mise en œuvre
- Comportement du produit appliqué :
    - Au vieillissement
    - Aux ultra-violets
    - Au gel-dégel
    - A la température
    - Aux agents agressifs

IV.8.4. Méthodes et matériels utilisés

A. Élimination en épaisseur

a) **Burinage** : Outils manuel pneumatique ou électrique légers.

b) **Repiquage** : marteaux léger pneumatique à aiguilles multiple.

c) **Bouchardage** : outils manuel pneumatique ou électrique léger.

B. Élimination de surface

a) **Sablage à sec** : sableuse pneumatique et compresseur.

b) **Sablage humide** : sableuse pneumatique et compresseur

c) **Lavage à l'eau** : pompe électrique

d) **Ponçage** : ponceuse légère électrotative disques abrasifs.

IV.8.5 .Techniques de réparation des éléments structuraux

Après les constatations et l'étude des causes des dégradations de l'ouvrage, il est nécessaire de leur donner une nouvelle durabilité, même dans un environnement agressif ; plusieurs méthodes de réparation, consistent à rétablir les dégradations des structures en basant sur les étapes suivantes :

- ✓ L'élimination complète de la rouille.
- ✓ Le dégagement des armatures du béton dégradé.
- ✓ La protection des armatures par un inhibiteur de corrosion.
- ✓ La reconstitution du béton avec des mortiers adhérents étanches et résistants des armatures.

La protection de l'ouvrage réparé par un système adapté à l'environnement.

IV.9. Recommandations techniques

Compte tenu du constat visuel effectué et des désordres observés lesquels sont à caractère évolutif, il est recommandé de procéder en premier lieu à :

- L'étaiement des éléments structurels dégradés en attendant leur réparation et à la suppression de toutes les parties instables et in adhérentes aux éléments avariés.

Procéder par la suite :

- Décapage du béton dégradé ou fissuré de tous les éléments avariés en béton armé (poteau - poutre - dalle - raidisseur) jusqu'à atteinte des surfaces saines puis procéder au brossage des barres et traitement des armatures atteintes selon le degré de leur corrosion puis la reprise de l'enrobage après nettoyage des surfaces en assurant l'adhérence entre la surface de l'ancien béton avec celle du nouveau béton.
- La réfection de tous les réseaux d'évacuation défectueux, en veillant à ce que toutes les conduites d'évacuation des eaux soient reliées au collecteur principal.

Par ailleurs, il est important de désigner une entreprise qualifiée pour la prise en charge des réparations selon les règles de l'art.

Les missions menées dans le cadre de ce Projet de Fin d'études ont permis de recenser les principales techniques d'investigation d'ouvrages en béton armé utilisées. On a pu voir 'il existait deux types de diagnostic, l'un utilisant des méthodes destructives et l'autre des méthodes non destructives. Il a été souligné l'importance du diagnostic dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé, c'est à ce moment que l'on détermine les pathologies présentes ainsi que leur ampleur. Cela est nécessaire afin de prodiguer les réparations les plus adaptées ainsi que les protections à mettre en œuvre afin de donner les défenses nécessaires à L'ouvrage.

Concernant les différentes techniques de réparation, nous nous sommes appuyés sur des recherches menées sur les projets de réhabilitation divers. Il en est ressorti trois techniques particulières, le ragréage, le béton projeté et l'utilisation de tissus de fibre de carbone .Ces trois techniques ont pour buts principaux de redonner à chaque élément ses caractéristiques géométriques et également de redonner à la structure ses capacités à reprendre les efforts qui lui sont appliqués.

Pour les différents modes de protections, la encore nous avons effectué un travail de recherche sur la réalisation de dossier de consultation des entreprises et de dossier projet bâtiment . On a pu voir les différents modes de protection, leurs utilités, leur mode d'action ainsi que le principe de leur mise en œuvre. Ce pendant, il est nécessaire de souligner le fait que ce n'est pas suffisant de protéger l'ouvrage ; Il faut avant tout travailler sur l'origine des désordres, afin d'arrêter le problème à la source.

Ce projet de fin d'études nous a permis de découvrir de nouveaux aspects de l'ingénierie du génie civil. Durant notre formation, nous avons étudié principalement les différents procédés de construction et les matériaux utilisés dans le neuf, mais peu de connaissances ont été acquises concernant la réhabilitation d'ouvrages existants. Pourtant, ce domaine tend à se développer dans le cadre du développement durable.

BIBLIOGRAPHIQUE

[1] : Processus des réparations minces des ouvrages en béton

[2] : BAROGHEL-BOUNY (V.) et al. – Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – État de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité. Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil, AFGC, Bagneux, 252 p., juil. 2004.

[3]:BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), BELIN (P.), OUNOUGHI (K.), ARNAUD (S.), OLIVIER (G.) et BISSONNETTE (B.). – Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI e siècle. IV – Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 249, pp 49-100, mars-avr. 2004.

[4] :CAPRA (B.) et SELLIER (A.). – Modélisation multiéchelles des réactions alcali-granulats. Actes de la Journée Scientifique AFGC-DRAST sur l'alcali-réaction, ESPCI, Paris, France, 21 oct. 1999.

[5] :BIGAS (J.P.), LAMBERT (F.) et OLLIVIER (J.P.). – Modélisation globale des interactions physico-chimiques régies par des isothermes non linéaires entre ions chlore emortier de ciment Portland. Materials and structures, vol. 29, pp 277-285 (1996).

[6] :Matala S. « Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete», Espoo, Helsinki University of Technology. PhD. 1995

[7] : L'ATTAQUE SULFATIQUE « Durabilité et réparation du béton », Université de Sherbrooke, article d'Internet, GCI 714, pp : 160-169.

[8]: Jacques BARON « Introduction à la durabilité des bétons » - La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des Ponts et C., ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 351-389**.**

[9]: COUSSY (O.), BAROGHEL-BOUNY (V.), DANGLA (P.) et MAINGUY (M.). – Évaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage, dans « Transferts dans les bétons et durabilité ». Numéro double spécial de la Revue Française de Génie Civil, (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris), vol. 5, N° 2-3, pp 269-284 (2001).

–

[10] :Bétons fibrés à ultra-hautes performances - Recommandations provisoires. Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil, **AFGC**, Bagneux, 152 p., janv. 2002.

[11] : https://www.concretecorrosion.net/html/mecanism/lixivi.htm

[12] :BAROGHEL-BOUNY (V.), ARNAUD (S.), HENRY (D.), CARCASSÈS (M.) et QUÉNARD (D.). – Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXIe siècle. III - Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 241, pp 13-59, nov.-déc. 2002.

[13] :BAROGHEL-BOUNY (V.), CHAUSSADENT (T.), CROQUETTE (G.), DIVET (L.), GAWSEWITCH (J.), GODIN (J.), HENRY (D.), PLATRET (G.) et VILLAIN (G.). – Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons – Méthodes de mesure et d'essais de laboratoire – Méthodes d'essai N° 58.Techniques et Méthodes des LPC, LCPC, 88 p., fév. 200

[14]:BAROGHEL-BOUNY (V.), AMMOUCHE (A.) et HORNAIN (H.). – Matrices cimentaires : analyse de la microstructure et propriétés de transfert, dans « Transferts dans les bétons et durabilité ». Numéro double spécial de la Revue Française de Génie Civil (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris), vol. 5, N° 2-3, pp 149- 177 (2001).

[15] :ANDRADE (C.),CASTELLOTE (M.),ALONSO (C.) et GONZALEZ (C.). – Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I : Comparison between several methods of calculation. Materials and structures, vol. 33, pp 21-28, janv.- fév. 2000.

[16]: ACC. Concrete Floors on Ground, Association Canadienne du Ciment, Canada, 2001, 136 p. EB075.03.

[17] : http://www.le-coin-des-bricoleurs.com/le-wiki-dubricoleur/Epaufrure,%C3%A9caillage,_d%C3%A9faut_de_surface

[18] : Comment nettoyer Lichen sur béton http://www.aac-mo.com/comment-nettoyer-lichen-sur-beton.html

[19] : [**HAL**] Ressuage des bétons hydrauliques(Laurent Josserand. Ressuage des bétons hydrauliques. Mechanics. Ecole des Ponts paristech,2002. French.)

[20] : Protection des bétons par application de produits à la surface du parement /Guide technique décembre 2002

[21] : Par micha4125 dans Maçonnerie et carrelage le 20 Février 2012 à 12:38 http://bien-bricoler.maison.com/maconnerie-bien-reparer-les-lezardes-d-un-mur-qui-s-affaissea121371746

[22]: BAROGHEL-BOUNY (V.). – Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétations (LCPC Publ., Paris), 468 p. (1994).

[23] : ANDRADE (C.), ALONSO (C.), ARTEAGA (A.) et **TANNER (P.).** – Methodology

based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life. L'industria italiana del cemento, N° 764, pp 330-339, avril 2001.

[24] : [Baroghel-Bouny, 2005] V. Baroghel-Bouny, Nouvelle approche de la durabilité du béton.Indicateurs et méthodes, Éditions Techniques de l'Ingénieur, Base Structure et Gros OEuvre, Rubrique Bétons Hydrauliques, C 2 245, 2005.

[Tuutti, 1982] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, CBI Research Report, n° 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982

[25] : Dr. Ir. P. Boeraeve Cours de Béton armé Dernière impression le 30/01/2009 21:14:00

[26] : Michel (l.), 2012] Michel (L.), Pathologie, diagnostic, prévention et maintenance des structures. 2012., pp11

[27]: ANDRADE (C.) et SANJUAN (M.A.). – Experimental procedure for the calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration tests. Advances in cement research, vol. 6, no 23, pp 127-134 (1994).

[28]:G. Daufin, J. Talbot. Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. PRE-MIERE PARTIE. GENERALITES SUR LA CORROSION DES METAUX ET ALLIAGES. Le Lait, INRA Editions, 1971, 51 (507), pp.375-398. <hal-00928553>

Département d'Architecture -Annaba- Mr. LAKHAL Ridha Master : Restauration des Patrimoines (Cours : Pathologie des Bétons Armés - Corrosion)

[29]: A. Rosenberg, C.M .Hansson et C .Andrade; Mechanism of corrosion of steel in concrete; Materials Science of Concrete.1, (1989). 285-314.

[31]: A Bentur, S. Diamond et N .Berke; Steel corrosion in concrete - Fundamentals and civil engineering practice; E & FN Spon . (1999). 201.

[31] :J. Dehwah, H.A.F, Maslehuddin et S.A. Austin; Long-term effect of sulfate ions and associated cations on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concrete; Cement & Concrete Composites. 24, (2002). 17-25.

[32] :Département d'Architecture -Annaba- Mr. LAKHAL Ridha Master : Restauration des Patrimoines (Pathologie des Bétons Armés - Corrosion)/ *(*Pathologie des bétons armés – Corrosion des armatures)

[33] : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM « Durabilité des Bétons », Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998), 11-12 déc. 1997.

[34] : Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P., Polder, R. (2004). Corrosion of steel in concrete. Prevention, Diagnosis and Repair, Wiley-VCH, Weinheim. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister .thème etude de l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilite des ouvrages en beton arme

[35]: Shamsad Ahmad « Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review », Cement and Concrete Composites, Volume 25, 2003, pp 459-471.

[36]: MORIANDE « Electrochimie ». Editions Dunod, 2005.

[37]: Metha P.K. «Concrete Structures, Properties and Materials », Prentice Hall, New Jersey, 1986, pp 449.

[38]: Metha S. J. Ford, J. D.Shane and T. O.Mason,« Assignment of features in impedance

[39] : MEKKAOUI ALAOUI Meryem, thèse de doctorat, Etude du comportement de l'acier inoxydable UR45N et l'acier au carbone C38 dans différents milieux simulant le béton, Université Mohammed V, Rabat, 2014.

[40] : Taché, G., et al. (2003). Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Documents scientifiques et techniques, (AFGC /CEFRACOR), 107p.

[41] : Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université libanaise ISAE – Cnam Liban Centre du Liban associé au Conservatoire national des arts et métiers – Paris 'Information et communication pour l'ingénieur Génie Civil' –ENG 222
Sujet: Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé.
Candidat : Joseph Abou Zeid Numéro du dossier : 8254 f

[42] : Document de référence Cahier pratique duMoniteur Réparation du béton. 25mars 2011 Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2011 - 21

[43] : Norme Européenne EN 1504 Guide illustré et simplifié concernant tous les aspects de la réparation des structures en béton