REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

SPECIFICITES DES DEGRADATIONS DANS LES BETONS ANCIENS

Présenté par

BOUNDAOUI Hamza

Proposé et Dirigé par

Mr. ZEMIR Ismail

Promotion 2020



Remerciements

***J**e remercie avant tout mon dieu*
Qui m'a donné la force, la volonté et le courage et
La patience pour terminer ce travail de fin d'étude.
***J**e remercie de tout mon cœur mes parents et toute ma*
Famille Et ma fiancée pour leurs sacrifices, leurs
Encouragements, soutien Jusqu'à ce que j'aie réalisé
Ce travail
***J**e remercie mon **Mr : ZEMIR Ismail**, Il m'a donné*
La possibilité de faire un mémoire sur un sujet très
Intéressant, merci à vous pour vos aides
Et vos conseils avisés.
***E**nfin, mes sincères remerciements et gratitudes*
À toute personne qui a contribué de près ou de loin à
La Réalisation de ce modeste travail



Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon
Exemple éternel, mon soutien moral et Source de joie
Et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour Me voir
Réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi
Mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts la flamme
De Mon cœur, ma vie et mon bon heur,
Ma mère
Que j'adore. Aux personnes dont j'ai bien aimé la
Présence dans ce Jour,
À mes frères ***Nasreddin***, ***Bilal***, ***Aymen***,
Et ***Ma fiancée Rezkia***,
Et ***Mon grand-père*** *et* ***ma grand-mère***
Et toute ma famille ***BOUNDAOUI***
J*e dédie ce Travail dont le grand Plaisir leurs revient en*
Premier lieu pour leurs conseils, Aides et encouragements.
Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui
Et aient Toujours à mes côtés, et qui m'ont
Accompagnaient Durant mon Chemin d'études
Supérieures, mes aimables Amis
Nacir, ***Lamri***, ***Aissa***,
Et collègues d'étude.

RESUME

Les ouvrages en béton armé sont soumis durant leur vie à des désordres, affectant les matériaux de construction et par conséquent leur stabilité. Le béton armé n'est pas seulement menacé par les charges qui lui sont appliquées, mais aussi par l'environnement.

Une évaluation des pathologies et causes de dégradation est menée. Les résultats de cette évaluation, en relation avec les besoins (éventuellement nouveaux) du donneur d'ordres, constituent les informations indispensables à la mise en route du processus de réparation ou de renforcement des bétons anciens afin de les protéger et prolonger leurs durées de vie.

MOTS CLES**: Béton armé, désordres, environnement, pathologies, dégradation, réparation, renforcement.**

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are subjected during their life to disorders, affecting the construction materials and consequently their stability. Reinforced concrete is not only threatened by the loads applied to it, but also by the environment.

An assessment of the pathologies and causes of degradation is carried out. The results of this assessment, in relation to the (possibly new) needs of the principal, constitute the essential information to start the process of repairing or reinforcing old concrete in order to protect it and extend its lifespan

KEYWORDS: Reinforced concrete, disorders, environment, pathologies, degradation, repair, reinforcement.

ملخص

تتعرض الهياكل الخرسانية المسلحة خلال حياتها لاضطرابات تؤثر على مواد البناء وبالتالي على استقرارها. لا تتعرض الخرسانة المسلحة للتهديد فقط من خلال الأحمال المطبقة عليها، ولكن أيضًا بسبب البيئة.

يتم إجراء تقييم لأمراض وأسباب التدهور. تشكل نتائج هذا التقييم، فيما يتعلق بالاحتياجات (ربما الجديدة) للمدير، المعلومات الأساسية لبدء عملية إصلاح أو تقوية الخرسانة القديمة من أجل حمايتها وإطالة عمرها.

كلمات المفتاحية : الخرسانة المسلحة ، الاضطرابات ، البيئة ، الأمراض ، التدهور ، الإصلاح ، التعزيز.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

RESUME

ABSTRACT

ملخص

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE……..……01

Contexte ……...……01

Objectifs …...……02

Structure de mémoire ……...02

CHAPITRE 1 : Pathologie des ouvrages en béton.

1.1Introduction ……..……04

1.1.1. Définitions et Généralités ……...……04

1.2. Description des pathologies du béton armé ……..……04

1.2.1. La ségrégation du béton ……04

1.2.1.1. Conséquences ……...……05

1.2.1.2. Causes ……06

1.2.2. La fissuration ……06

1.2.2.1. Les différents types de fissures ……06

1. Le faïençage ……...……07

2. Les Microfissures ……08

3. Les Fissures ……09

1. Les Différents Types De Fissures ……...09

2. Les Types Des Fissures Les Plus Courants ……...……..11

1.2.3. La Carbonatation Des Bétons ……12

1.2.3.1. Mesure de la profondeur de carbonatation des bétons ……...……12

1.2.3.2. Conséquence de la carbonatation ……..…13
1.2.3.3. Les cause de la carbonatation ……13
1.2.4. La corrosion des aciers dans le béton ……14
1. Processus de la corrosion……..……...15
2. Mécanismes De Corrosion Des Armatures ……..……..……18
3. Formes de la corrosion ……..…….19
4. Les facteurs de la corrosion …….……..…20
5. La dépassivassions des armatures …….……20
1.3. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures ……..…21
1.3.1. L'aspect du parement de l'ouvrage ……..…….21
1.3.2. La sécurité vis-à-vis des usagers ……..…….22
1.3.3. La stabilité de l'ouvrage ……22
1.4. Les pathologies a risque élevé …….…….22
1.4.1. Les lézarde……..…22
1.4.2. Retrait……23
1.5. Pathologies à risque moyen ……..……25
1.5.1. Epaufrure ……...25
1.5.2. Lichen……25
1.5.3. Le ressuage ……26
Conclusion……...…27

Chapitre 2 : Evaluation de l'ouvrage de son environnement et de ses Dégradations

2.1. Introduction ……..…….28
2.2. Définition de la dégradation ……..28
2.3. Les type de dégradations …….……..29
2.3.1. Dégradations mécaniques……..29
2.3.1.1. Surcharge ……...….29
2.3.1.2. Chocs……..30
2.3.1.3. Vibration…….……..……..30
2.3.1.4. Tremblement de terre ……31
2.3.1.5. Explosion ……...…32
2.3.2. Dégradations chimiques…….…32
2.3.2.1. Réactions alcali-agrégats …….…….…….…...….32

2.3.2.2. Exposition a des produits chimiques agressifs ……..……..……...33
2.3.2.3. Action bactérienne ou biologique ……..….33
2.3.2.4. Lixiviation ……34
2.3.3. Dégradations physiques ……..…34
2.3.3.1. Cycles gel / dégel ……..……..34
2.3.3.2. Retrait ……....36
2.3.3.3. Dilatation thermique ……..36
2.3.3.4. Sels expansifs ……37
2.3.3.5. Erosion principes ……..……37
2.3.3.6. Abrasion…….37
2.4. Autres facteurs liés à la dégradation ……38
2.4.1. Les facteur lies à l'environnement ……...…….38
2.4.1.1. L'effet du sol ……..…38
2.4.1.2. Les conditions climatiques.……..…..40
2.4.2. Les facteurs lies au manque d'entretien……41
2.4.2.1. L'absence de nettoyage général …….....41
2.4.2.2. La végétation ……....42
2.4.2.3. L'enceinté d'étanchéité …….……...….43
2.5. Exemple d'expertises ……43
2.5.1. Ouvrages a usage d'habitation …….…….44
2.5.2. Ouvrages publics …….…….46
2.6. Conclusion…….....47

Chapitre 3 : Le diagnostic des causes de dégradations

3.1. Introduction…….…… 47
3.2. Analogie (médecine/génie civil) ……..48
3.2.1. Analogie générale ……..…48
3.2.2. Analogie dans l'approche du diagnostic ……48
3.3. Le processus de diagnostic d'un ouvrage ……50
3.3.1. Les principales étapes d'un diagnostic ……..51
1. Une visite préliminaire ……...……51
2. Collecte des documents ……..…51
3. Préparation de l'intervention …….……51
4. Inspection détaillée …….51

5. Essais en laboratoire ……..……..52
6.Traitement des résultats ……..……52
7. Commentaires et avis de réparation ……...52
3.3.2. Choix des investigations …….……..…..53
3.3.2.1. Investigation non destructive ……54
1. Relevé visuel……...55
2. L'auscultation sonique……56
3. Scléromètre…….56
4. L'analyse du ferraillage…….……..57
5. Le radar …….…….58
3.3.2.2. Investigations Destructives…….……60
1. Carottage D'éléments …….……..…..61
2. Test a la carbonatation …….……..……62
3. Mesure du potentiel de corrosion …….……63
4. Prélèvement d'acier……63
3.4. Les causes fréquentes de dégradations dans les bétons anciens ……..…..64
3.4.1. Les fissurations du béton ……..64
3.4.2. La Corrosion ……..…64
3.5. Cas particulier de la corrosion des armatures dans les bétons anciens……..…65
3.6. Conclusion ……..…..….66

Chapitre 4 : Réparation et protection du béton armé

4.1 Introduction …….……..…….68
4.2. Définition ……..……68
4.3. Stratégie de la réparation……...……69
4.3.1. Préparation de la surface du béton a réparé……...…69
1. Elimination du béton dégradé …….69
2. Nettoyage de la surface ……..….70
3. Humidification de la surface ……..……71
4. Traitement ou remplacement des armatures existantes ……..……71
5. Mise en place du béton de la réparation …….72
6. Reconstitution de la couverture des surfaces réparées ……..…….72
7. Mise en place d'un revêtement de protection superficiel ……...…72
4.3.2. Les Différentes Méthodes De Réparation ……....73

4.3.2.1.Le Ragréage ……...73
4.3.2.2. Le béton projeté ……...…..75
4.3.2.3. Tissus de fibres de carbone ……..……..79
4.4. Cas de réparation …….…..82
4.4.1. Réparation du béton due a la carbonatation ……..82
1. Technique de réparation (carbonatation) ……82
2. Le traitement des armatures ……....82
3. La réparation du béton ……..…..83
4. La finition ……..…….83
4.4.2. Réparation des désordres superficiels ……...……84
1. Traitement des fissures ……...84
4.5. Protection des ouvrages en béton arme ……85
4.5.1. Protection des surfaces ……..87
1. Imprégnation ……..87
2. Inhibiteurs de corrosion ……..…88
3. Les revêtements ……..89
4. Membrane élastomères ……..90
4.5.2. Protection par méthodes électrochimiques ……..……90
1. Protection cathodique ……....91
2. Déchloruration ……..92
3. Ré-Alcalinisation ……..94
4.6. Conclusion……....95
Conclusion Générale
RECOMMANDATION
Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : La ségrégation……..……..04
Figur1.2 :nids de gravier……...……..05
Figur1.3 :remontées d'eau……...……05
Figure1.4 : ressuage dalle de béton……..06
Figure1.5 :micro-ségrégations…….……06
Figure 1.6 : Faïençage à la surface du béton ……..…07
Figure 1.7 : Faïençage typique de la surface d'un pilier de béton dû à la réaction Alcali-granulat……07
Figure 1.8 : Les Microfissures ……...……..08
Figure 1.9 : Emplacement de différent type de fissure……..…10
Figure 1.10 : Fissure Verticale…….…….……11
Figure 1.11 : fissure horizontale…….…….11
Figure1.12 : FISSURES INCLINEES…….11
Figure 1.13 : la mesure de carbonatation……..……12
Figure 1.14 : Les phases de carbonatation……14
Figure 1.15 : les états de corrosion…….……..15
Figure 1.16 : corrosion de l'armature……..…….15
Figure 1.17 : Processus de corrosion……16
Figure 1.18 : Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton ……..……19
Figure 1.19 : Diagramme de Tutti présentant les étapes de dégradation d'une armature de béton armé,(t_d date de Dépassivation, t_f date d'apparition de la première fissure)……..…21
Figure 1.20 : lézardes……..……..23
Figure 1.21 : Epaufrure dans construction……..…..25
Figure 1.22 : Lichen sur la structure……...……..25
Figure 1.23 : ressuage de béton…….……26
Figure 2.1 : les types de dégradation……..…..29
Figure 2.2: fissuration et éclatement Du béton sous charges trop importantes…….……29
Figure 2.3 : Rupture par cisaillement à l'intérieur de la région de charnière en plastique, 1971 Tremblements de terre de San Fernando……...…29
Figure 2.4 : Les différentes dégradations causées par le choc……..……30
Figure 2.5 : les sources de vibration…….…31
Figure 2.6 : Bâtiment effondré lors du séisme de Boumerdès 2003……32

Figure 2.7 : la réaction alcali-agrégat (RAA)……..……..…32
Figure 2.8 : attaque bactérienne ……...…….…….……. 33
Figure 2.9 : La lixiviation d'un ciment de mur…….…34
Figure 2.10 : Action du gel dans les fissures du béton…….35
Figure 2.11 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel……35
Figure 2.12 : Fissuration interne …….……36
Figure 2.13 : Ecaillage de la surface…….36
Figure 2.14 : Abrasion du béton…….. 37
Figure 2.15 : Schéma de tassement d'appuis……..……..38
Figure 2.16 : Remontée capillaire sur un mur…….. 39
Figure 2.17 : l'effet de glissement de terrain……..……. 40
Figure 2.18 : Dépôts de matériaux sur la chaussée et de trottoir d'un pont…….… 41
Figure 2.19 : Végétation sur le tablier d'un pont……...…...41
Figure 2.20 : Etanchéité ancienne……..…..……..42
Figure 2.21 : Dégradation d'un plancher sous les eaux pluviales…….……42
Figure 2.22 : Ecrasement de l'amorce poteau…….…..43
Figure 2.23 : corrosion accélérée des amorces poteaux……...….43
Figure 2.24 : Les Facteurs d'influence Sur La Dégradation Des Ouvrages d'habitation……..44
Figure 2.25 : Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages publics……..….45
Figure 3.1 : Analogie (médecine/génie civil)……...49
Figure 3.2 : Cycle du diagnostic des pathologies et de la maintenance d'un bâtiment……....50
Figure 3.3 : Schéma du choix d'investigation……..…….53
Figure 3.4 : Schéma des investigations non destructives……..……55
Figure 3.5 : l'auscultation sonique des bétons……..56
Figure 3.6 : Scléromètre……...…….57
Figure 3.7 : Détection par fenêtres et résultats…….……58
Figure 3.8 : Le radar……..…60
Figure 3.9 : Schéma des investigations destructives…….60
Figure 3.10 : Carottage……...….61
Figure 3.11 : Carbonatation……..62
Figure 3.12 : Graphique enrobage-carbonatation. L'intersection de la courbe d'enrobage (courbe bleu foncé) avec celle de carbonatation …….63
Figure 3.13 : Mesure du potentiel de corrosion……..……..63
Figure 3.14 : Prélèvement d'acier…….64

Figure 3.15 : tâches de rouille+ fissuration ……...……65
Figure 3.16 : éclatement localisé……...……65
Figure 3.17 : éclatement généralisé……..66
Figure 3.18 : les symptômes de corrosion…….…….66
Figure 3.19 : Modèle conceptuel de corrosion des aciers dans le béton armé : (tiré de Nouvelle approche de la Durabilité du béton. Indicateurs et méthodes, V. Baroghel-Bouny)…….…66
Figure 4.1 : Nettoyage de la surface…….……70
Figure 4.2 **:** Enlèvement des aciers corrodés……71
Figure 4.3 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé……..……73
Figure 4.4 : Dégagement des armatures……...…….74
Figure 4.5 : Gauche à droite ; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par Taloche……..…75
Figure 4.6 : Béton projeté……...……..76
Figure 4.7 : projection par voie humide…….……..76
Figure 4.8 : projection par voie sèche……..77
Figure 4.9 : Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone……82
Figure 4.10 : Tissus de fibre de carbone……...……82
Figure 4.11 : technique de réparation (carbonatation)…….…….82
Figure 4.12 : traitement des armatures……...…...83
Figure 4.13 : réparation du béton……..……...83
Figure 4.14 : La finition de réparation……..84
Figure 4.15 : Résumé des méthodes de protections……...……...86
Figure 4.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion……..…….88
Figure 4.17 : exemple de revêtement des surfaces……...…….89
Figure 4.18 : application de membrane élastomère……..90
Figure 4.19 : Raccordement de la protection cathodique……..91
Figure 4.20 : La protection cathodique au moyen d'anodes sacrificielles ou à courant Imposé ……...…….92
Figure 4.21: Traitement électrochimique en cours……..…….93
Figure 4.22 : Avant et Après Ré-Alcalinisation……...…….95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : les facteurs de la corrosion……..20
Tableau 2.1 : Ouvrages dégradés à usage d'habitation dans la région de Biskra…….44
Tableau 2.2 : Ouvrages publics dégradés dans la région de Biskra……..45
Tableau 4.1 : les avantages et désavantages de déférent type de projection……..…78
Tableau 4.2 : Tableau comparatif (Ragréage / Béton projeté)……..…78
Tableau 4.3 : Comparatif de la fibre de carbone avec l'acier.....…...80

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

A_c (x): Surface de la zone comprimée de la section du béton, en fonction de l'axe neutre x

A_f : Aire de la section du renfort

A_s : Aire de la section d'aciers tendus

A'_s : Aire de la section d'aciers comprimés

b : largeur de la section

d : la hauteur utile de la section

d' : l'enrobage des armatures tendues.

d_1 : l'enrobage des armatures comprimées

E_c : Module de Young du béton

E_f : module de Young de composite

E_s: module de Young de l'acier

e_0 : excentricité due à un chargement excentré

e_i : excentricité due aux imperfections géométriques

e_1 : excentricité totale

F_c : la force dans le béton

F_f : la force de traction du renfort

Fc' : la force de compression des aciers comprimés

F_s: la force de traction des aciers tendus

f_{ck}: la résistance caractéristique du béton obtenue à partir d'un cylindre

f_f: la contrainte dans le composite

f'_s: La contrainte des aciers en phase élastique

f_s: La contrainte élastique des aciers comprimés

f_{yk}: la contrainte limite d'écoulement de l'acier

h: la hauteur de la section

K_1 : coefficient de remplissage

K_2 : coefficient de positionnement.

PRFC : Polymère Renforcé en Fibres de Carbone

t : l'épaisseur de renfort

x : la profondeur de l'axe neutre.

α_b : coefficient adimensionnel représentant l'effort du béton

α_s : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures tendues

α'_s : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées

α_f : coefficient adimensionnel représentant l'effort du renfort

β_b: coefficient adimensionnel représentant l'effort du béton

β_s : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures tendues

β'_s : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées

β_f : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées

γ_c : coefficient de sécurité du béton

γ_s: coefficient de sécurité de l'acier

ε_{cu} : Déformation relative maximale dans le béton

ε_f: Déformation relative du renfort

ε_s: Déformation relative dans les aciers tendus

ε'_s: Déformation dans les aciers comprimés

ε_{yk} : Déformation relative maximale dans les aciers

λ : Elancement du poteau

λ_{lim} : Elancement limite du poteau

ρ_s: Le taux d'armatures

ρ_f : Le taux de renfort

σ_f : Résistance garantie a la rupture en traction du composite

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Contexte:

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde et le 2emme produit le plus utilisé par l'homme après l'eau.

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Le béton est un matériau durable. Ce qui est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agressions auxquelles il peut être exposé

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement, Et au fil du temps, la structure doit résister à de nombreuses attaques ou pressions (physiques, mécaniques, chimiques…), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant…tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps. Et 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.

Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients d'humidité ou de température, pression de cristallisation, exposition aux températures externes).
Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux**.**

Le béton peut constituer un matériau de construction présentant une durabilité exceptionnelle sans qu'il soit nécessaire de recourir à des mesures de protection de surfaces spécifiques, sous réserve que sa composition soit correcte et sa mise en œuvre réalisée avec soin. Au cours des dernières décennies, l'utilisation d'ajouts et/ou d'adjuvants s'est avéré être un choix technologique judicieux pour parvenir à ces résultats. La meilleure solution pour combattre les effets de la corrosion de toute nature est un béton de hautes performances exemptes de fissures et imperméable à l'eau avec une couverture généreuse. La qualité du béton peut être augmentée considérablement par un rapport E/C optimal, sous réserve d'utiliser un super-fluidifiant permettant de préserver une ouvrabilité et une compactibilité satisfaisantes.

Les ingénieurs ont pris conscience de l'importance de l'entretien en même temps qu'ils étaient amenés à entreprendre des opérations souvent très lourdes de renforcement des ouvrages. Mais la pathologie et la réparation ressortissent autant à l'art qu'à la technique, car elles ne sont pas l'objet d'un enseignement spécifique, ce qui oblige l'ingénieur de terrain de se livrer à lui-même face aux problèmes de dégradation urgents.

L'expertise des ouvrages est une discipline qui se base sur une profonde connaissance sur le comportement des matériaux, c'est donc un art qui mérite la même valeur que de celui de construire. Donc il doit être intégré dans la formation de l'ingénieur pour que ce dernier puisse reconnaître et éviter les défauts touchants les structures.

Objectifs :

L'objectif de ce travail est d'arriver à regrouper les Spécificités des dégradations dans les bétons anciens, et faire apparaître leurs causes ainsi éviter et faire une protection pour les constructions qui construira dans le future, et réparer les constructions anciens.

Structure de mémoire :

Le sujet est développé selon le plan suivant :

Le premier chapitre est concerne les Pathologie des ouvrages en béton.

Le deuxième chapitre décrit Evaluation de l'ouvrage De son environnement et de ses dégradations.

Le troisième chapitre consiste le diagnostic des causes de dégradations.

Le quatrième chapitre expose la Réparation et protection du béton armé.

Enfin, une conclusion générale qui reprend les principales recommandations et Les propriétés des bétons anciens

Chapitre 1 :
Pathologie des ouvrages en béton

Chapitre 1 : Pathologie des ouvrages en béton

1.1 Introduction :

A côté des phénomènes d'altération du béton armé qui peuvent être aggravés par une mise en œuvre défectueuse (enrobage insuffisant, mauvais choix de liants hydrauliques, de granulats ou d'adjuvants etc.), la pathologie des ouvrages en béton armé se manifeste principalement par la fissuration excessive, la déformation exagérée ou la rupture d'éléments.

1.1.2. Définitions et Généralités :

Pathologie :

Ce terme est depuis peu utilisé en bâtiment. L'étude des désordres et surtout l'étude statistique, systématique et ordonnée des désordres et des sinistres sont en effet, relativement récentes **[1]**. D'après le Robert : « Science qui a pour objet l'étude et la connaissance des causes et symptômes des maladies ». Si l'on applique cette définition au bâtiment, les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravant, donnent lieu à des sinistres ; ces derniers pouvant conduire à la ruine des ouvrages. Si l'on applique cette définition au bâtiment, les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravant, donnent lieu à des sinistres ; ces derniers pouvant conduire à la ruine des ouvrages.

D'après le Littré : « Science qui traite de tous les désordres survenus soit dans la disposition des organes, soit dans les actes qu'ils remplissent » **[2]**. La transposition de ce terme au bâtiment est assimilable à la notion de transformation, réparations après désordres ou sinistres et, à la limite, reconstruction.

1.2. Description des pathologies du béton armé :

1.2.1. La ségrégation du béton :

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (déchargement, pompage, mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos **[3]**.



Figure 1.1 : La ségrégation

1.2.1.1. Conséquences :

Outre l'aspect esthétique extérieur, elle affecte la solidité des ouvrages en causant des problèmes de résistance et de porosité.

Selon l'étendue et le volume de la ségrégation, des reprises doivent être effectuées pour réparer la partie en cause. Il peut être nécessaire d'enrober les parties en cause à l'aide de mortier, de résines spécifiques ou de béton minéral.

Dans les cas les plus importants, la destruction de l'ouvrage est nécessaire **[5]**.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur sa résistance et sa durabilité **[3].**

Elle peut résulter d'une séparation entre :

1. Les différentes fractions granulaires
2. Les granulats et la pâte de ciment
3. Les fines et l'eau de gâchage.

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

1. Les "nids de gravier" : concentrations locales de gros granulats (fig. 1.2)
2. Les "remontées d'eau", appelées aussi "veines de sable" : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage (fig. 1.3)
3. Le "ressuage" : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces horizontales du béton, il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses (fig. 1.4)
4. Les "micro-ségrégations" (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité (fig1.5)



Figur1.2 : nids de gravier**.**



Figur1.3 : remontées d'eau**.**



Figure1.4 : ressuage dalle de béton**.**



Figure1.5 : micro-ségrégations**.**

1.2.1.2. Causes :

Si le béton est trop vibré lors de sa mise en œuvre ou trop liquide (trop d'eau dans la formulation), les agrégats de diamètres les plus importants ont tendance à couler et ceux de faibles diamètres à remonter si tous les granulats sont de même densité. Dans ce cas, c'est l'action combinée de la gravité et de la vibration qui engendre la séparation **[4]**.

1.2.2. La fissuration :

Un béton fissuré est ce béton qui présente des fentes visibles. Contrairement à la croyance populaire, le béton est un matériau qui peut facilement se casser lorsqu'il est soumis à une force de traction **[6]**.

1.2.2.1. Les différents types de fissures :

Les fissures en façade d'une maison ou d'un immeuble peuvent avoir différentes formes et localisations. Il est important de parfaitement les caractériser pour comprendre leurs origines **[7].**

1. **Causes :** [24]

Plusieurs des facteurs suivants, ou leur combinaison peuvent être la cause de la fissuration :

1. Le tassement du béton
2. Les différentes formes de retrait :
    1. Le retrait plastique
    2. Le retrait endogène (d'auto dessiccation ou chimique)
    3. Le retrait de séchage (de dessiccation ou hydraulique)
    4. Le retrait thermique
3. Les mouvements de la structure.
4. L'application de charges imprévues.
5. La nature des granulats utilisés **[24]**.

1. **Le faïençage : [23]**

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 (fi gure1.7). 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 **[23].**



Figure 1.6 : Faïençage à la surface du béton.



Figure 1.7 : Faïençage typique de la surface d'un Pilier de béton dû a la réaction alcali-granulat

.

1. **Cause :**

1. **Cure inadéquate :**

La principale cause du faïençage provient d'un séchage trop rapide de la pâte de ciment en surface qui entraîne du retrait.

Ce phénomène se produit lorsque la période de cure humide est suivie d'un séchage ou lors d'un retard dans l'application de la cure **[23].**

2. **Aplanissage excessif :**

Lors de la finition, un aplatissage excessif cause une ségrégation en surface. Cet apport d'un surplus de pâte peut provoquer le faïençage **[23].**

3. **Ajout d'eau :**

L'ajout d'eau lors de la mise en place d'un mélange de béton augmente son affaissement. Le surplus d'eau de ressuage affaiblit la mince couche de surface, entraînant à la fois une plus faible résistance à la traction et un retrait plus élevé **[23].**

4. **Mise en place sur une surface absorbante :**

La mise en place du béton sur une surface très sèche favorise la perte rapide de l'eau du mélange par absorption. La prise prématurée qui s'en suit peut provoquer la fissuration et, par conséquent, le faïençage **[23].**

5. **Ajout de ciment lors de la finition :**

Lors de la finition, ne jamais saupoudrer la dalle de ciment ou de sable pour absorber le surplus d'eau lors de la finition. Ceci aura pour effet d'augmenter la concentration en particules fines et créer du faïençage **[23].**

2. Les Microfissures :

1. Définition Générale :

Les microfissures sont facilement reconnaissables. Elles apparaissent sur les revêtements des façades et sont repérables à l'œil nu. On parle de microfissures lorsque leur largeur est comprise entre 0,2 mm et 2 mm et de profondeur importante. Les microfissures sont multiformes : elles peuvent être horizontales, verticales ou en escalier**.**



Figure 1.8 : Les Microfissures.

Remarque : les microfissures ne doivent pas être confondues avec les fissures superficielles (faïençage). Ces dernières sont purement esthétiques et ne présentent aucun danger pour la construction et ses occupants. Elles se reconnaissent par leur forme caractéristique en toile d'araignée sur la couche superficielle de la façade.

On distingue deux types de microfissures :

1. **Les fissures de retrait :**

Sont liées à l'absence ou à l'insuffisance de revêtement de protection contre les intempéries et plus particulièrement contre l'humidité.

Ce type de fissure peut également être provoqué par le retrait du matériau **[8].**

2. **Les fissures structurelles :**

Elles sont le plus souvent de plus grande ampleur et laissent présager un mouvement des fondations avec un risque parfois élevé d'effondrement. Le sens des fissures est un critère

essentiel pour déterminer leurs causes. Ainsi, la présence de fissures obliques et verticales est symptomatique d'un désordre des fondations **[8].**

2. Cause :

Les microfissures sont toujours liées à une rupture du matériau en raison d'une résistance insuffisante.

Les microfissurations de retrait sont engendrées par une mauvaise appréciation des quantités (en particulier trop d'eau) lors de la réalisation de l'enduit, ou à un séchage trop rapide en raison des conditions atmosphériques (vents, fortes chaleurs). Un enduit trop épais peut également être à l'origine de ces microfissures.

Concernant les microfissures structurelles, elles sont provoquées par des tassements différentiels du terrain et des fondations ou des vibrations. Le mouvement des fondations peut être lié à la nature instable du sol (sol argileux, terrain en remblais, etc.), à une charge sur des fondations déséquilibrées ou à une capacité portante insuffisante des fondations. Ces dernières peuvent également bouger en cas de vibrations liées au passage d'engins de construction à proximité **[8].**

3. Les Fissures :

Ouverture linéaire, au tracé plus ou moins régulier, de largeur de 0,2 à 2 mm Elle concerne toute l'épaisseur des enduits à base de liants hydrauliques et, parfois, tout ou partie de l'épaisseur des éléments de béton ou de maçonneries sur lesquels ces enduits sont appliqués. On distingue les fissures réparties sur la façade et celles localisées aux points singuliers de la paroi : acrotères, chaînage, jonctions avec dalles, etc.

1. Les différents types de fissures : [1]

1.1. Microfissurations de retrait (en mailles larges) des enduits ou bétons :

Elles sont dues soit à un excès d'eau de gâchage, soit à un mauvais dosage de l'enduit ou à une épaisseur trop importante de celui-ci, ou encore à une mauvaise adhérence **[1].**

1.2. Microfissures ou fissures horizontales ou verticales :

Elles sont généralement dues à des maçonneries composées de matériaux divers, ayant chacun un comportement hygrothermique différent **[1].**

1.3. Fissures en général obliques ou verticales partant des angles des baies (fissures en moustache) :

Elles sont dues à la dilatation des appuis de baie ou aux résistances plus faibles de la maçonnerie aux angles d'ouverture **[1].**

1.4. Fissures verticales situées aux angles de la construction :

Elles sont dues au défaut de chaînage vertical **[1]**.

1.5. Microfissures des joints de maçonnerie :

Elles sont dues soit à l'utilisation de blocs non stabilisés, soit au montage défectueux de la maçonnerie (joints trop larges ou mal dosés, ou délais trop courts entre le montage et l'enduction) **[1].**

1.6. Fissures (voire lézardes) obliques dans les parois béton ou de maçonnerie :

Elles sont dues à une instabilité de terrain ou de l'assise de la construction entraînant des mouvements importants de la structure **[1]**.

1.7. Fissures verticales à la jonction de deux bâtiments contigus et indépendants (agrandissement...) :

Elles sont dues à l'absence de joint de dilatation **[1]**.

1.8. Fissures horizontales situés soit au droit du plancher, soit au 1er ou au 2e rang d'éléments de maçonnerie en dessous du plancher :

Elles sont également dues à une déformation ou à une rotation du plancher sur le chaînage périphérique **[1]**.

1.9. Faïençage superficiel (en petites mailles) de la couche superficielle de l'enduit :

Il est dû à un excès de talochage ou à un séchage de la surface trop rapide **[1]**.



Figure 1.9 : Emplacement de différent type de fissure.

2. Les types des fissures les plus courants : [1]

1. Les fissures verticales :



Figure 1.10 : Fissure Verticale.

1.1. Les Causes :

La cause principale est le **tassement différentiel [1].**

2. Les Fissures Horizontales :



Figure 1.11 : fissure horizontale.

2.2. Les cause :

La cause de ce cas pathologique est le mouvement différentiel d'un plancher ou reprise de maçonnerie mal faite et mal mise en place **[1]**.

3. Les fissures inclinées :



Figure1.12 : FISSURES INCLINEES.

3.1. Les cause :

1. La mauvaise mis en place de la maçonnerie

2. Tassement différentiel d'un côté par rapport à l'autre **[1]**.

1.2.3. La carbonatation des bétons :

La carbonatation est une réaction chimique entre le ciment et le dioxyde de carbone (CO2) ou le monoxyde de carbone (CO) générée, entre autres, par les appareils de chauffage utilisés pour le bétonnage par temps froid. Lorsque ce phénomène se produit, la surface s'empoussière, ce qui peut influencer le faïençage

La carbonatation est un phénomène naturel de vieillissement du béton. Cependant, son apparition, puis, son évolution peuvent avoir des conséquences sur la pérennité des ouvrages. Le LERM dresse le portrait de ce phénomène **[9]**.

1.2.3.1. Mesure de la profondeur de carbonatation des bétons :

La mesure de la profondeur de carbonatation du béton s'effectue en laboratoire sur les cassures fraîches des carottes prélevées sur l'ouvrage (fendage suivant une génératrice). Immédiatement après fendage, pour éviter la carbonatation de surface, on pulvérise une faible quantité d'eau distillée ou déminéralisée sur la tranche pour l'humidifier. Puis après absorption de l'eau par le béton on pulvérise l'indicateur coloré de pH (de préférence la phénolphtaléine, mais on peut aussi utiliser la thymol phtaléine).

Mesure de la zone décolorée où le pH passe de 13 (initialement) à environ 9 (avec la phénolphtaléine) ou environ 10 (avec le thymol phtaléine). De manière plus précise, la phénolphtaléine est incolore pour un pH inférieur à 8,2 et rose soutenu pour un pH supérieur à 9,9, et la thymol phtaléine est incolore pour un pH inférieur à 9,3 et bleu pour un PH supérieur à 10,5.

Pour la mesure :

Le fendage libérant les deux faces, il peut être intéressant d'utiliser deux indicateurs colorés différents, l'un à base de phénolphtaléine (virage pH~9), l'autre à base de thymol phtaléine (virage pH~10) **[9].**

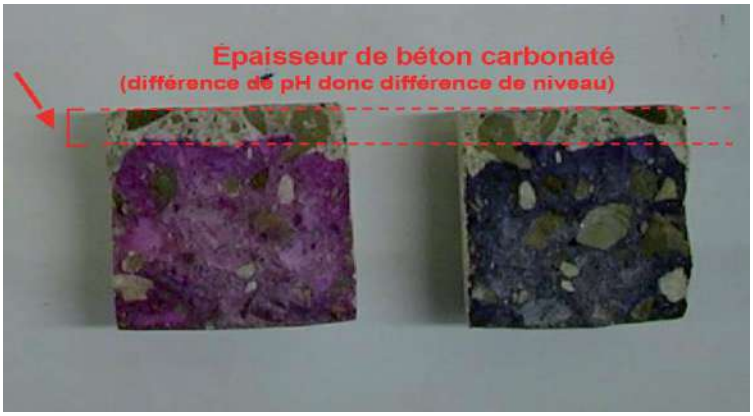


Figure 1.13 : la mesure de carbonatation.

1.2.3.2. Conséquence de la carbonatation :

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure. Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusion elle limitant les phénomènes de transfert **[10]**.

1.2.3.3. Les causes de la carbonatation :

Le CO_2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment (avec une prédominance de H_2CO_3, HCO_3- ou CO_3^{2-} suivant la gamme de pH.

Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) est notamment affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes.

Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible.

La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO_2dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des

C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO_2 (0,03 %). La concentration en CO_2 venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration).

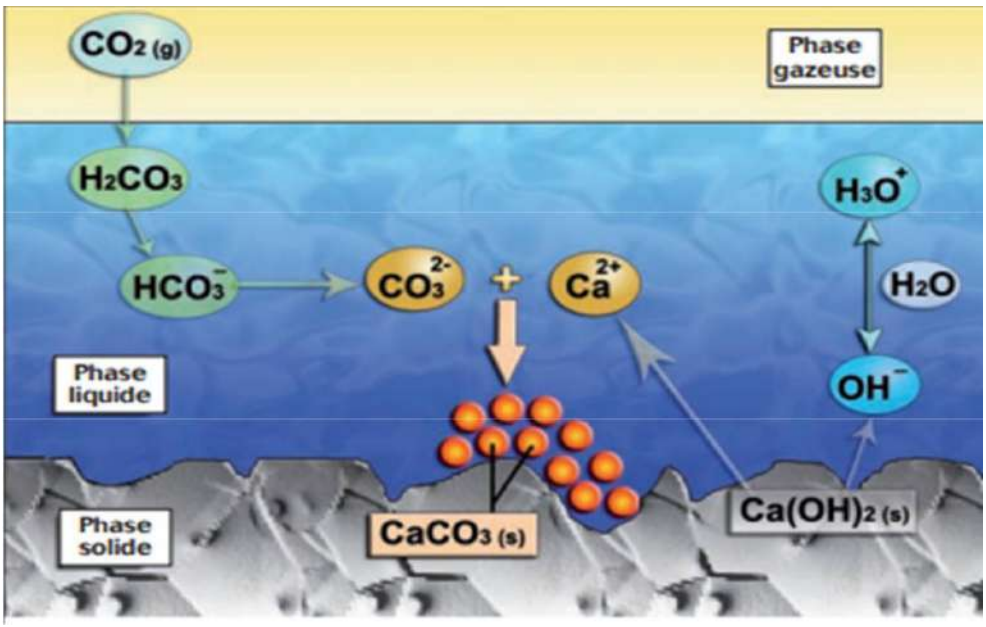


Figure 1.14 : Les phases de carbonatation.

1.2.4. La corrosion des aciers dans le béton :

Le béton d'enrobage a pour principale fonction de protéger physiquement et chimiquement l'acier vis-à-vis de la corrosion : il constitue d'une part une barrière à franchir par les espèces agressives (le dioxyde de carbone et les ions chlorure notamment) avant de pouvoir atteindre le premier lit d'armatures et d'autre part un milieu environnant basique, assuré par un pH de l'ordre de 13,5, favorisant la passivation de l'acier. En effet, lors du gâchage, les minéraux contenus dans le ciment, et en particulier les silicates C_2S et C_3S, s'hydratent et conduisent à la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H), à l'origine de la résistance de la matrice, et d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ (ou portlandite CH). La solubilité de la portlandite dans l'eau est de l'ordre de 22 $mmol.l^{-1}$ à 25 °C, soit environ 1,6 $g.l^{-1}$, ce qui correspond à un pH de 12,6. Dans le ciment on trouve également en quantité mineure des sulfates alcalins, qui peuvent réagir avec la portlandit

$$Ca(OH)_2 + K_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2KOH \qquad \text{Eq 1.1}$$

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2NaOH \qquad \text{Eq 1.2}$$

La solution interstitielle s'enrichit progressivement en bases alcalines NaOH et surtout KOH qui fournissent les ions OH- à l'origine du pH élevé du liquide interstitiel. Le pH de la solution interstitielle est ainsi compris entre 13 et 13,5. Dans ces conditions, l'armature est

protégée par passivation et est recouverte d'une fine pellicule d'oxyde de fer de type Fe_3O_4 et Fe_2O_3 **[19]**.

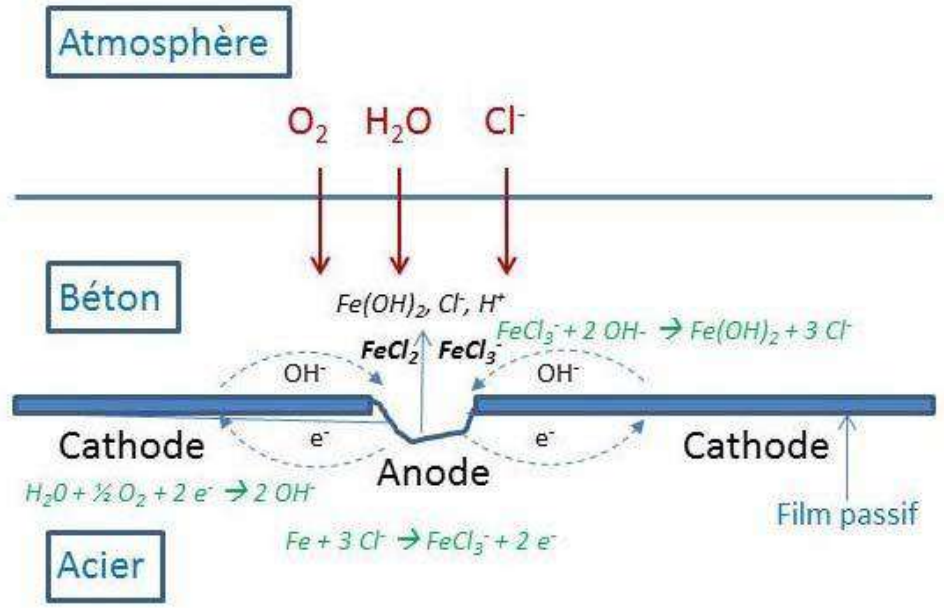


Figure 1.15 : les états de corrosion.

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

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

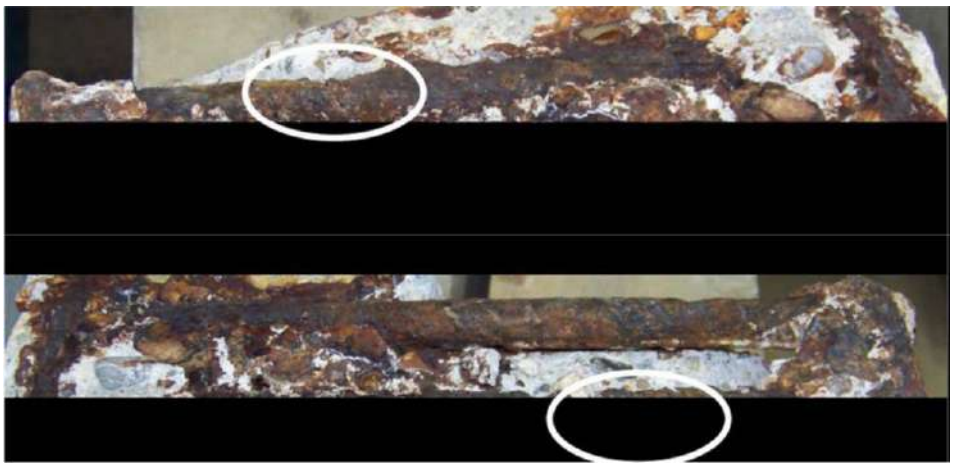


Figure 1.16 : corrosion de l'armature.

1. Processus de la corrosion : [17]

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné

lorsqu'il exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées **[17]**.

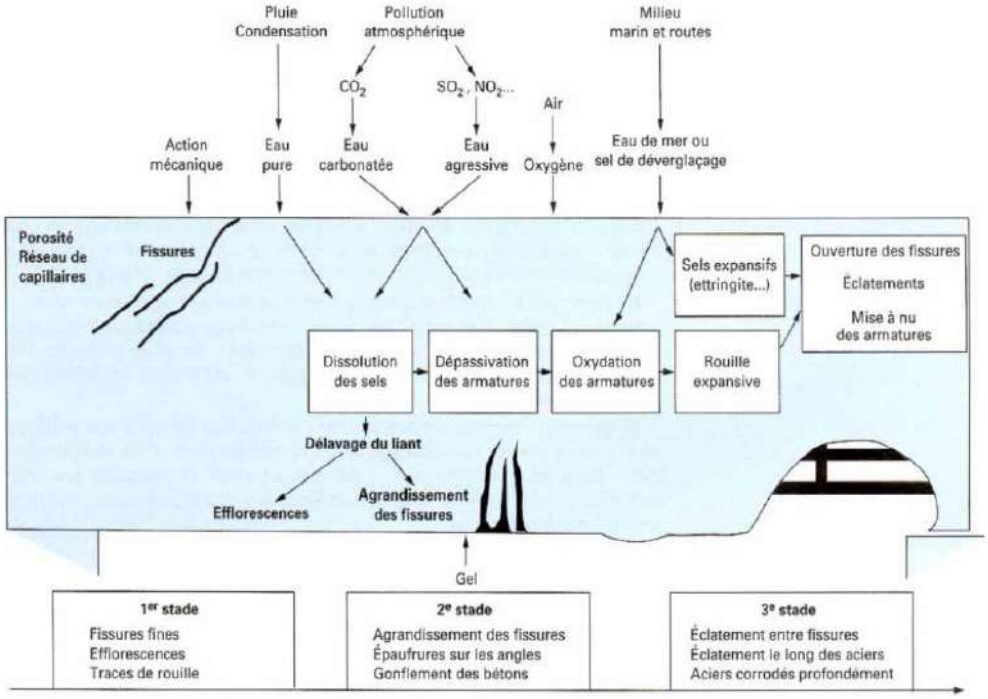


Figure 1.17 : Processus de corrosion.

En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

1. **Corrosion chimique (Sèche) :**

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc ne pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO_2 et sulfureux SO_2, hydrogène sulfureux Sli_2 etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO_2. On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire. L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :

A solide + B gaz $\longrightarrow$ **AB solide** Eq 1.3

Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peu considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (A1 dans Ccl4) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température **[17]**.

2. Corrosion Biochimique :

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

1. Chimique par production de substances corrosives telles que CO_2, H_2S, H_2SO_4, NH_3 ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal **[17]**.
2. Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates pat l'intermédiaire d'hydrogène.

$$\mathbf{SO4^{2-} + 8\ H \longrightarrow S_2 + 4\ H_2O} \qquad \text{Eq 1.4}$$

L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes **[17]**.

$$\mathbf{S^{2-} + Fe^{2+} \longrightarrow Fe\ S} \qquad \text{Eq 1.5}$$

3. Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène **[17]**.

3. Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation :

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérant et continu à la surface de métal **[17]**.

Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement). La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau **[17]**.

4. Corrosion Electrochimique :

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :

A solide + B liquide ⟶ AB solide Eq 1.6

En général il n'existe pas un métal idéalement pur, il contient toujours des hétérogénéités physiques ou chimiques dont le potentiel de corrosion est en général différent de celui de la matrice. C'est à dire les métaux ne sont pas monophasés lorsqu'ils sont plongés dans le réactif. Même pour un alliage, si ces éléments d'addition sont en solution solide, on ne peut pas les considérer comme parfaitement monophasés, car ils présentent toujours des inclusions. Oxydes, sulfures etc. ou bien des régions écrouis. Donc les légères différences de propriétés chimiques ou physiques entre les différentes parties du métal déterminent une électrode composite (cellule électrochimique) qui contient des microcathodes et des microanodes en court-circuit, c'est à dire formant des couples électriques (piles).

Lorsqu'une électrode composite est plongée clans un électrolyte, ce qui est toujours réalisé, elle est donc le siège d'un phénomène de corrosion électrochimique et les anodes sont attaquées avec une vitesse qui dépend de l'intensité du courant débité par les piles locales **[17]**.

2. Mécanismes De Corrosion Des Armatures : [18]

La corrosion de l'acier dans un béton est un phénomène électrochimique. Elle résulte de la différence de potentiel électrique due aux hétérogénéités du matériau et du milieu environnant. L'armature joue le rôle à la fois d'anode, de cathode et de conducteur électrique, la solution interstitielle de béton étant l'électrolyte. Ce phénomène peut se dérouler en deux étapes **[18]**.

1. Première étape :

En présence d'un électrolyte (solution interstitielle du béton), l'acier s'oxyde en ions ferreux (Fe^{2+}) selon la réaction suivante :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad \text{Eq 1.7}$$

Les ions ferreux Fe^{2+} en solution peuvent s'oxyder en ions ferriques Fe^{3+}, Pour compenser la charge échangée lors de la réaction anodique (Eq 1.7) la réaction cathodique de réduction de l'oxygène dissous se produit sur la même électrode (Eq 1.8) générant un courant égal (en valeur absolue) à celui de la réaction anodique :

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \text{Eq 1.8}$$

En milieu fortement alcalin (béton sain), les ions hydroxyle (OH-) dans la solution interstitielle se combinent aux ions ferreux (Fe2+) et précipitent en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque la concentration en ions ferreux (Fe2+) est assez élevée**[18]** :

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \qquad \text{Eq 1.9}$$

2. Deuxième étape

L'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$ peut réagir avec l'eau et l'oxygène présents à la surface de l'armature pour former de l'oxyde ferrique hydraté (Fe_2O_3, H_2O) ou de la magnétite hydratée (Fe_3O_4, H_2O), ou bien évoluer en goethite (α-FeOOH) ou lépidocrocite (γ-FeOOH) selon les différentes réactions suivantes **[18]**:

$$3Fe(OH)_2 + ½\ O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 3H_2O \qquad \text{Eq 1.10}$$

$$2Fe(OH)_2 + ½\ O_2 \rightarrow 2FeOOH + H_2O \qquad \text{Eq 1.11}$$

Liu et Weyer, ont schématisé le mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton comme présenté sur la figure suivent

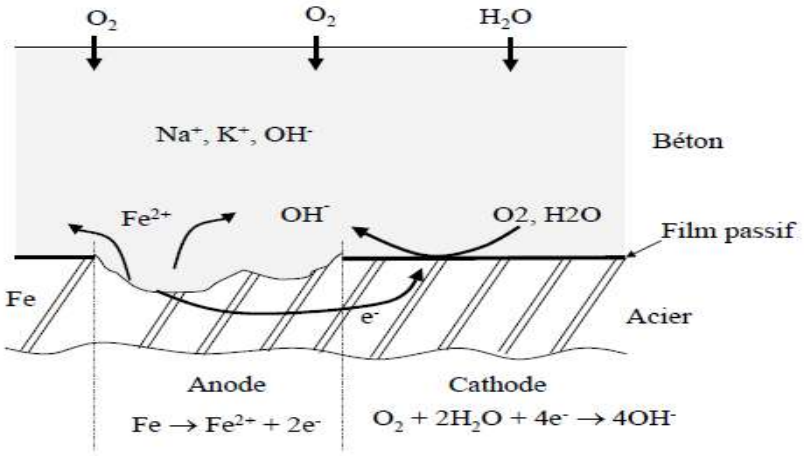


Figure 1.18 : Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton.

3. Formes de la corrosion :

La corrosion des aciers dans les ouvrages en béton armé est de deux types :

1. Corrosion localisée par piqûres : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont de petite taille et se trouvent à des endroits fixes et si la surface des zones cathodiques excède largement celle des zones anodiques. Cette attaque est généralement observée en présence de chlorures.
2. Corrosion généralisée : cette corrosion est uniforme et se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires. Cette corrosion est généralement causée par la carbonatation du béton **[22].**

4. Les Facteurs De La Corrosion :

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

1. Facteurs définissant les modes d'attaque.
2. Facteurs définissant les conditions d'emploi.
3. Facteurs dépendant du temps.
4. Facteurs métallurgiques **[22].**

Tableau 1.1 : les facteurs de la corrosion **[22].**

Facteurs définissant les modes d'attaque	Facteurs dépendant du temps	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs métallurgiques
-concentration de réactif -teneur en oxygène -PH du milieu -Température -Impuretés -Particules solides	-Métaux ne subissant pas le vieillissement -Tensions mécaniques -Températures -Modification des enduits de protection -Conditions d'entretien	-Etats de surface -Moyens de protection -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Sollicitations mécaniques -Procédés d'assemblage. -Conditions d'entretient	-Composition du métal ou de l'alliage -Procédé d'élaboration -Traitements thermiques -Additions protectrices -Impuretés

5. La Dépassivassions Des Armatures :

La dépassivassions ou la rupture du film passif se produit suite à la diminution de l'alcalinité de la solution interstitielle du béton. Ainsi, les oxydes et/ou les hydroxydes protecteurs initialement formés à la surface de l'acier deviennent moins stables, ce qui le rend susceptible à la corrosion. Souvent la dépassivassions des armatures se produit par l'action de deux agents : le dioxyde de carbone CO2 (carbonatation) et les ions chlorure. Par ailleurs, des études récentes ont montré l'influence non négligeable des ions sulfate sur la passivation des armatures métalliques.

Selon Tuutti, la corrosion des armatures dans le béton se déroule en deux phases (Figure 1.19)

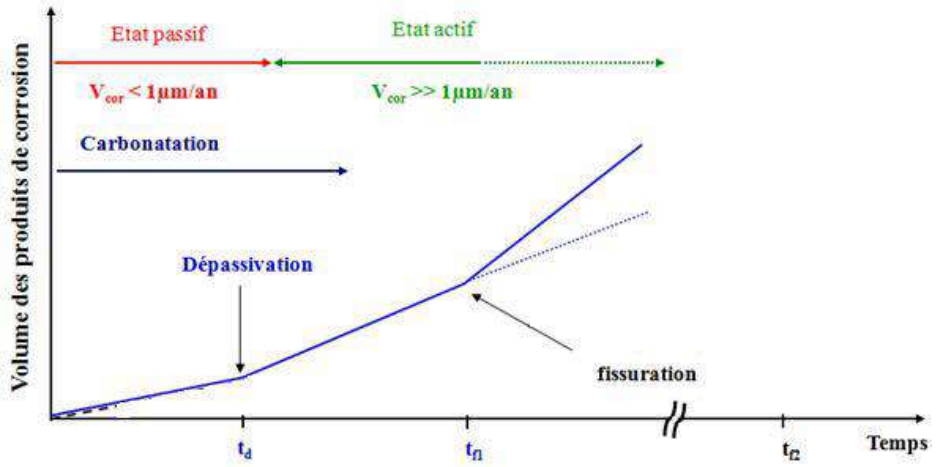


Figure 1.19 : Diagramme de Tutti présentant les étapes de dégradation d'une armature de béton armé, (t_d date de Dé-passivation, t_f date d'apparition de la première fissure).

1. La première étape est caractérisée par un état passif de l'armature métallique. Lors de cette période, la couche d'oxydes formée à la surface est stable et la vitesse de corrosion est faible. Les espèces agressives pénètrent dans le béton pour atteindre un seuil de concentration suffisant au niveau de l'acier susceptible d'entrainer sa dépassivassions. Cette dépassivassions, survenant à un temps td, peut être engendrée par la carbonatation et/ou la pénétration des ions chlorure.
2. Une deuxième étape où la corrosion est dite « à l'état actif » suite à la modification de la composition de la solution interstitielle au voisinage de l'armature. Les oxydes et hydroxydes produits par des réactions d'oxydation à la surface de l'acier commencent à s'accumuler. La formation de ces produits d'oxydation expansifs va alors entraîner un gonflement qui finira par provoquer la fissuration de l'enrobage de béton à un temps t_{f1}. Un tel comportement conduit à une accélération de la corrosion de par la création de nouveaux chemins préférentiels pour les agents agressifs **[20].**

1.3. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :

1.3.1. L'aspect Du Parement De l'ouvrage :

Les efflorescences et les tâches de rouille qui sont la conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage du béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Parfois, ce point est considéré comme étant de peu d'importance par le gestionnaire des ouvrages mais par contre ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire car des éclats de béton peuvent se produire **[21]**.

1.3.2. La Sécurité Vis-à-vis Des Usagers :

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage ou l'exploitent. Leur prévention et leur élimination doivent par conséquent être traitées avec grand soin **[21]**.

1.3.3. La Stabilité De L'ouvrage :

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

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

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage. Ce document ne traite que du matériau et laisse de côté les problèmes de structures **[21]**.

1.4. Les pathologies à risque élevé :

1.4.1. Les lézarde :

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 **[11]**.



Figure 1.20 : lézardes.

1.4.2. Retrait : [12]

Contraction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire

(Bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraits ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture :

Faïençage des enduits, microfissuration du béton.

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

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

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

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

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

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et 1e retrait d'auto-dessiccation **[12]**.

1. **Le retrait de plastiquées :**

En relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements **[12]**.

2. **Le retrait de dessiccation :**

Est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due ˆa la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en Ouvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation **[12]**.

3. **Les retraits thermiques :**

Est lie au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques déshydratation du ciment. Ce retour ˆa la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre, Jusqu'a quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente) **[12]**.

4. **Le Retrait D'auto-Dessiccation :**

Est lie à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en Fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction. Le Chatelier (le volume des hydrates formes est

plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires **[12]**.

1.5. Pathologies à risque moyen :

1.5.1. 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 **[13]**.



Figure 1.21 : Epaufrure dans construction.

1.5.2. 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 **[14]**.



Figure 1.22 : Lichen sur la structure.

1.5.3. 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.

1. **Type de ressuage :**

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

1. Ressuage visible dû à la restitution d'eau à la surface de l'élément de construction après le compactage de mortiers ou de bétons.
2. 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 **[15]**.



Figure 1.23 : ressuage de béton.

2. Les raisons du ressuage des bétons :

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

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

1. Granulats avec du domaine de 2,6 à 2,7 kg/dm^3
2. Ciment 3,0–3,2 kg/dm^3
3. Eau 1,0 kg/dm^3

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce que ces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage **[15]**.

3. Dispositif de mesure du ressuage :

Le ressuage est mesuré de façon classique par l'observation directe d'un échantillon. En effet. On peut voir apparaître une ligne de séparation entre l'eau et la pâte dans le haut d'un contenant transparent. Le ressuage normal est caractérisé par une vitesse de déplacement constante de la surface du solide. Suivi d'une diminution graduelle de la vitesse jusqu'à l'arrêt complet du ressuage **[15]**.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert différents types de maladies tangibles Ce qui est, dans la plupart des cas, la principale cause de la rupture des structures et dégradation du béton. Nous avons également vu les causes et les types (dangereux et moins dangereux) de ces Maladies. Sérieusement, il est pris en compte pour le neutraliser Par conséquent, le moins dangereux, il devient dangereux, s'il n'est pas pris en compte Réformes possibles ultérieurement.

Chapitre 2 :

Evaluation de l’ouvrage De son environnement et de ses dégradations

Chapitre 2 : Evaluation de l'ouvrage De son environnement et de ses dégradations

2.1. Introduction :

Les bâtiments sont soumis à un processus permanent de dégradation physique à cause de leur usage et sous l'action de l'environnement extérieur. Ils sont, malgré leur aspect et leurs différents composants très sensibles à l'action des facteurs climatiques (du soleil, de la pluie, du froid ou la chaleur) et de toutes les autres actions naturelles. L'action des usagers est aussi l'une des causes de la détérioration progressive de leurs différents éléments.

Traditionnellement les matériaux de construction étaient recherchés dans la nature, à proximité du lieu de la construction, notamment la pierre, le sable, la terre et le bois. A titre d'exemple, la pierre calcaire est la plus utilisée dans la construction en Algérie.

C'est un matériau dur, résistant bien aux efforts de compression, mais sensible aux efforts dynamiques produits par l'usage, les surcharges imprévues et les tremblements de terre. Le bois est aussi un matériau excellent et nécessaire, car il permet de reprendre les efforts de flexion et de traction.

Cependant, tous ces matériaux sont sensibles aux effets de l'âge, à l'action de l'eau et des autres facteurs climatiques.

Les éléments en béton armé sont très présents dans notre vie, que ce soit des activités, ou autre ouvrage en béton armé, ils remplissent tous une ou plusieurs fonctions bien précises

Les structures en béton armé sont souvent affaiblies par les pathologies qui les affectent durant leur vie, ceci et du a l'environnement qui n'a pas été pris en considération, la pathologie qui affecte le béton et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées **[25].**

2.2. Définition de la dégradation :

La dégradation du béton désigne Le cancer du béton causée par la présence de contaminants ou des conditions atmosphériques humides, se traduisant par
la rouille des barres de renfort en acier, et un certain nombre de défaillances concrètes, notamment la carbonatation du béton ou la réaction alcali-granulat se traduisant par une diminution des propriétés mécaniques du béton et/ou son gonflement caractéristique, pouvant aller jusqu'à l'éclatement **[26].**

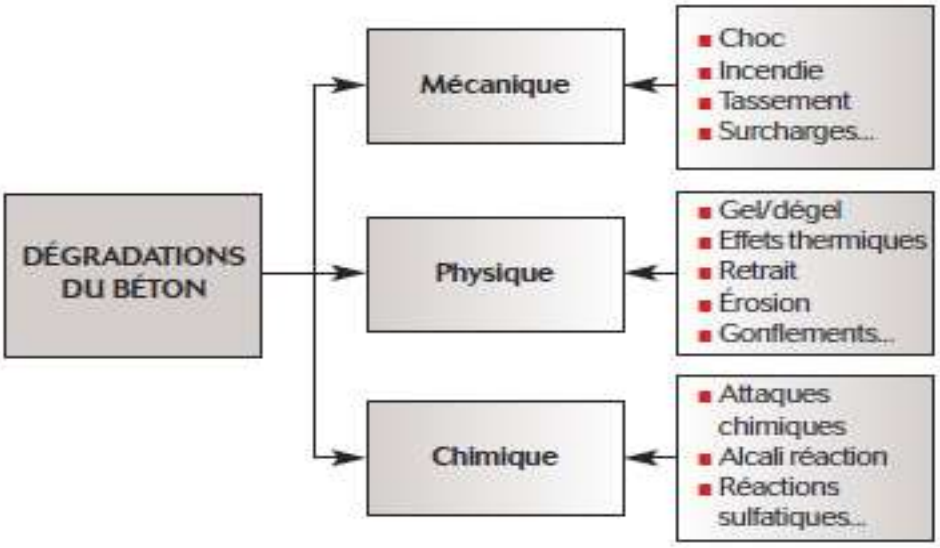


Figure 2.1 : les types de dégradation.

2.3. Les type de dégradations :

2.3.1. Dégradations mécaniques :

2.3.1.1. Surcharge :

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton **[46].**



Figure 2.2: fissuration et éclatement

Du béton sous charges trop importantes.

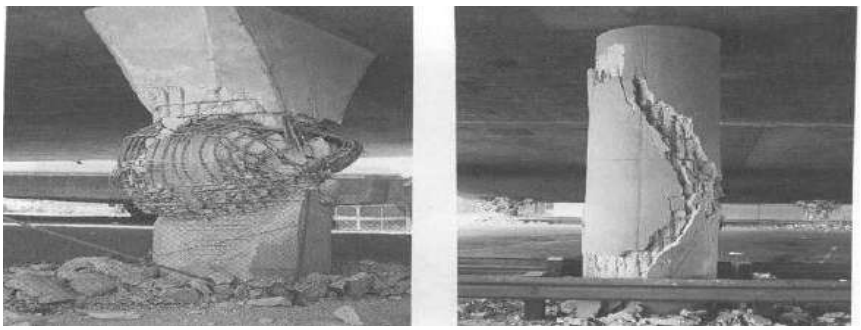


Figure 2.3 : Rupture par cisaillement à l'intérieur de la région de charnière en plastique, 1971 tremblements de terre de San Fernando.

2.3.1.2. Chocs :

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

Exemples : piles de pont, sols d'ateliers, éléments bétons préfabriqués, Ets… **[45].**

Il s'agit le plus souvent d'une attaque mécanique concrétisé par des chocs, dont les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, chocs de bateaux ou d'objets flottant contre les piles en rivière ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenu constituent une autre source de chocs non négligeable

Un dommage dû aux ondes de choc est caractéristique, les éléments du béton sont épaufrés et laissent généralement à nu le cadre d'armatures, les cassures sont fraiches et non altérées, les armatures ne sont pas corrodées, en plus, les épaufrures résultantes sont profondes et ils n'ont pas l'aspect d'un écaillage, de plus, l'ouvrages est généralement soumis à des impacts (quais ou pont) ce qui fait qu'un tel dommage est immédiatement suspect **[46].**



Figure 2.4 : Les différentes dégradations causées par le choc.

2.3.1.3. Vibration :

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

- **Les sources des vibrations :**

Les vibrations engendrent 3 types d'effet :

1 : Effet sur les personnes et la production (inconfort, effet sur la santé).

2 : Effet sur les matériels sensibles (appareil de mesure, équipement médicaux).

3 : Effet sur les bâtiments (dégradation de structure, fissuration) **[45].**

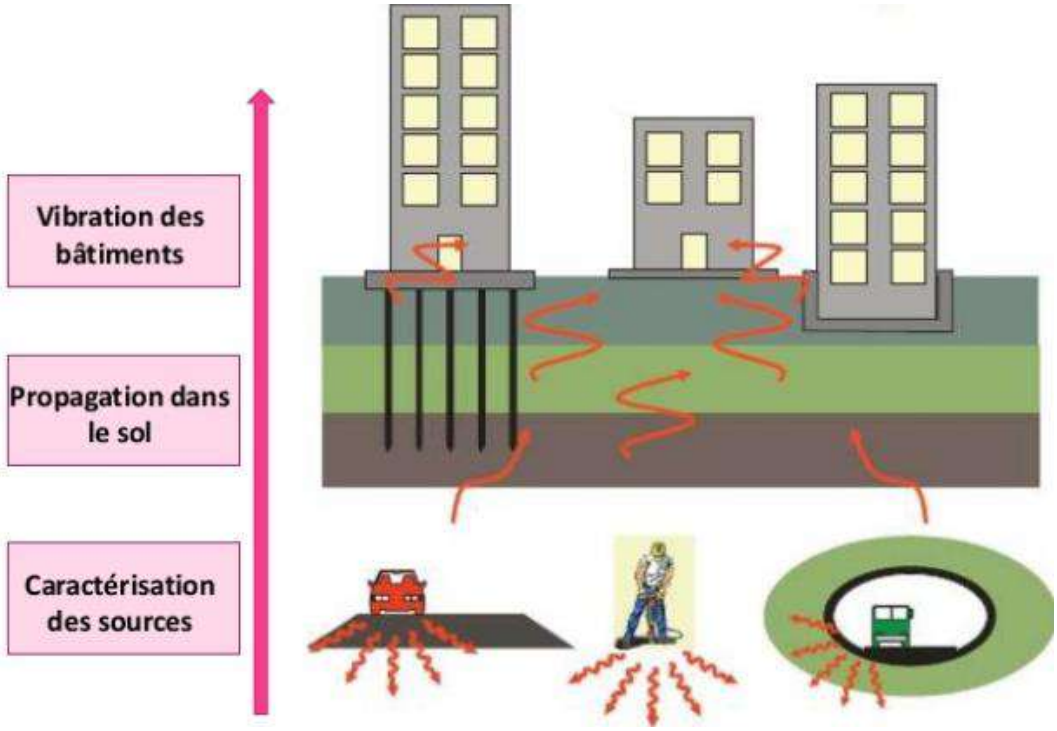


Figure 2.5 : les sources de vibration.

2.3.1.4. Tremblement de terre :

-Un Tremblement de terre c'est quand la terre tremble

-Un Tremblement de terre peut être causé lorsque les plaques tectoniques bougent **[27].**

Parmi les dommages mécaniques qui touchent la durabilité des ouvrages en béton et béton armé en Algérie, les tremblements de terre. Les nombreux séismes survenus à travers plusieurs régions du pays attestent de l'ampleur du phénomène (zones à forte sismicité).

Par ailleurs, le risque est d'autant plus élevé que la plupart des villes, où se concentre la plus grande partie du parc bâti se situent dans les régions les plus exposées.

Le séisme est un facteur qui a une forte influence sur la durabilité des ouvrages en provoquant des fissures et microfissures ce qui va faciliter la pénétration des agents agressifs et par conséquent contribuer à la dégradation des structures



Figure 2.6 : Bâtiment effondré lors du séisme de Boumerdès 2003.

2.3.1.5. Explosion :

L'explosion provoque des catastrophes énormes car dans la plupart des cas elle entraîne l'incendie qui peut mettre le tout en proie par les flammes, l'effet de l'explosion peut être néfaste pour les constructions se trouvant à quelques centaines de mètres du lieu affecté (éclats des vitres, dislocations et fissurations des maçonneries), le cas d'exemple : l'explosion survenue le : 19/01/2004 au complexe GL1K produisant du gaz naturel liquéfié et se trouvant dans la zone industrielle de Skikda (source d'information: Organisme de Contrôle Technique des Constructions Agence de Skikda) **[44].**

2.3.2. Dégradations chimiques :

2.3.2.1. Réactions Alcali-Agrégats :

La réaction alcali-agrégat (AAR) est une réaction dans le béton entre les hydroxydes alcalins, qui proviennent principalement du ciment Portland et de certains types de granulats. Deux types d'AAR sont actuellement reconnus :

Ce sont la réaction alcali-silice (ASR) et la réaction alcali-carbonate (ACR). Comme leur nom l'indique, ces types de réactions diffèrent en ce qu'elles impliquent des soit des phases siliceuses ou carbonatées dans les agrégats **[28].**



Figure 2.7 : la réaction alcali-agrégat (RAA).

2.3.2.2. Exposition a des produits chimiques agressifs :

1. Attaques des acides : Le béton résiste mal aux acides ou des composés qui peuvent se transformer en acide. Plusieurs acides organiques et inorganiques peuvent arriver dans l'eau de mer ou dans les eaux souterraines qui contiennent des composés de soufre ferreux comme une conséquence d'activité bactériologique.

2. Réactions sulfatiques : Les sulfates présentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton, ils peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. Ils peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire, également appelée sel de Candlotou

Trisulfo-aluminate de calcium. Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout sont organisées en un réseau de mailles, on parle de faïençage. L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10à 15ans) **[29].**

3. Attaque au sel : L'attaque par le sel se produit lorsque la surface extérieure de la structure en béton est exposée à de l'eau contenant du sel. Une fois que l'eau s'évapore, le sel reste à la surface du béton et provoque des pressions et des dommages **[30].**

2.3.2.3. Action bactérienne ou biologique :

Ce phénomène se rencontre essentiellement dans les réseaux d'égouts et les stations d'épuration **[31].**

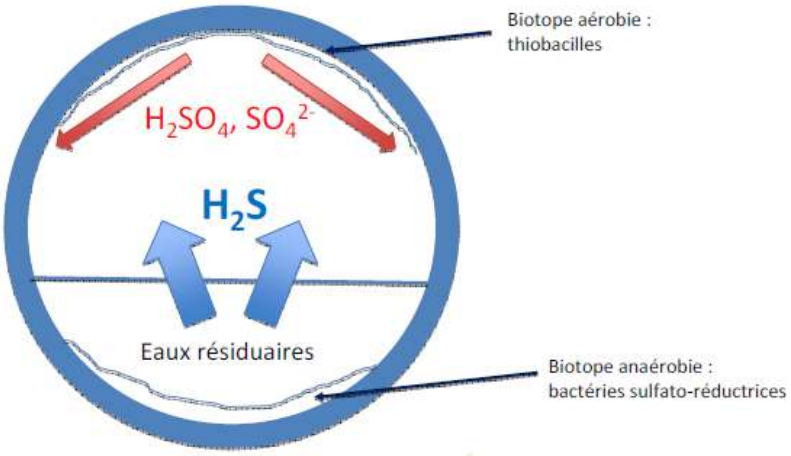


Figure 2.8 : attaque bactérienne.

Ce type se produit en présence de bactéries du type Thiobacillus qui oxyde l'hydrogène sulfuré gazeux (H_2S) que se condense sur les parois en acide sulfurique

(H_2SO_4), ce dernier attaquant la portlandite pour former du gypse qui réagit à son tour avec les aluminates du ciment pour donner de l'ettringite **[29].**

2.3.2.4. Lixiviation :

La lixiviation est le résultat d'une attaque par l'eau qui conduit à la dissolution des hydrates de pâte de ciment **[32].**

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

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca_2^{+} + 2OH^{-}$$

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres.

Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/ précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment) **[33].**



Figure 2.9 : La lixiviation d'un ciment de mur.

2.3.3. Dégradations physiques :

2.3.3.1. Cycles gel / Dégel :

Tous les bétons ne sont pas sensibles aux cycles de gel-dégel. Seuls les bétons dits "gélifs" s'altèrent. Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

L'action du gel est une des causes principales de détérioration des ouvrages en béton et des soutènements dans les régions nordiques d'Europe, d'Amérique, d'Asie mais

également dans certaines régions algériennes (infrastructures routières, remontées mécaniques,
Cornières …) **[34].**

Les dégradations se manifestent sous forme de fissurations internes ou d'écaillage et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses...), susceptibles d'être saturées en eau et donc plus sensibles à l'action du gel **[34].**

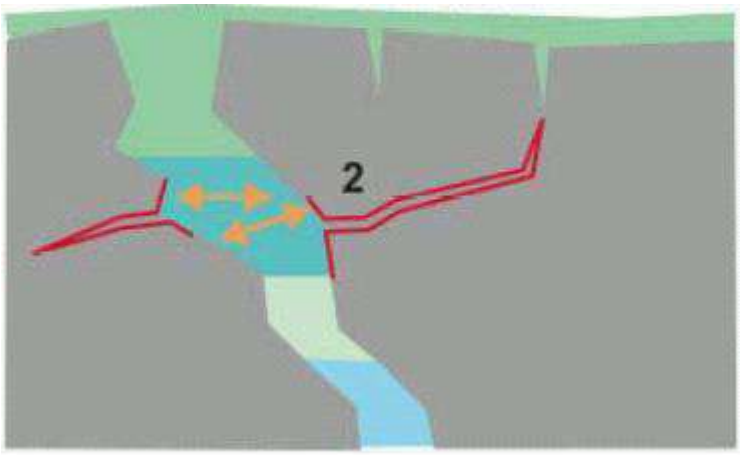


Figure 2.10 : Action du gel dans les fissures du béton.



Figure 2.11 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel

Les dégradations occasionnées par le gel sont de deux types :

- Une fissuration repartie dans la masse du béton, provoquée par un mécanisme de gel interne, (figure 2.13).
- Un délitage de la zone superficielle, appelé écaillage, qui résulte d'un gradient thermique important au voisinage de la surface, (voir figure 2.13).

Ces deux types de dégradations, qui peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, sont dus à des mécanismes distincts, 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 **[35 et 36].**



Figure 2.12 : Fissuration interne.



Figure 2.13 : Ecaillage de la surface.

2.3.3.2. Retrait :

Le retrait est un phénomène qui existe de façon systématique au sein d'un béton et se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement (retrait plastique, retrait de séchage, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation). Ceci engendre des fissurations superficielles de formes et directions quelconques et peuvent être avec le temps des causes principales de la dégradation.

2.3.3.3. Dilatation Thermique :

Lorsque le béton est soumis à des variations de température, des d´déformations additionnelles sont ajoutées à celles déjà causées par les phénomènes (Gonflement, Retrait). Le paramètre qui caractérise la capacité d'un matériau à se déformer sous une variation de la température est le coefficient de dilatation thermique (CDT).

Chaque matériau a un coefficient de dilatation thermique qui lui est propre. Pour béton durci et bien hydraté, des recherches ont ´été effectuées afin de trouver la valeur de son coefficient de dilatation. Dans la documentation technique, le CDT de référence du

béton durci se situe entre 0,9 et 16 μm/m/C° selon le type de granulat utilisé Dans la majorité des cas, les granulats utilises ont un CDT entre 5 et 13 μm/m/C° **[37 et 38].**

2.3.3.4. Sels expansifs :

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 **[44].**

2.3.3.5. Erosion Principes :

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement **[39].**

2.3.3.6. Abrasion :

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

L'abrasion du béton est essentiellement due à un manque de compacité du béton à la mise en œuvre. La fissuration de surface résulte d'un manque d'étanchéité au niveau des joints de coffrage ou de la reprise de bétonnage (Fig2.13) **[40].**



Figure 2.14 : Abrasion du béton.

2.4. Autres facteurs liés à la dégradation :

2.4.1. Les facteur lie à l'environnement :

2.4.1.1. L'effet du sol :

1. **Le tassement**

Tous les sols se déforment sous les charges qui leur sont appliquées, avec des amplitudes qui peuvent aller de quelques millimètres à quelques mètres. La prévision de ces déplacements est demandée par les nouvelles normes de calcul, pour vérifier qu'ils seront acceptables par les ouvrages à construire.

L'amplitude des déformations du sol dépend de la nature et de l'état du sol et des charges appliquées. Ces charges sont limitées par les conditions de stabilité qu'il faut respecter lors de la conception des ouvrages. En pratique, les fondations superficielles de bâtiments sont construites sur des sols relativement résistants et subissent des déformations faibles ce n'est pas le cas pour plusieurs constructions en Algérie que l'on peut habituellement estimer par un calcul linéaire. Les déformations les plus importantes sont celles des massifs d'argiles molles saturées, qui peuvent durer pendant des périodes longues (quelques mois à quelques dizaines d'années). Dans ce cas, on utilise une loi de déformabilité non linéaire pour évaluer l'amplitude finale du tassement et des déformations horizontales, et l'évolution du tassement au cours du temps est analysée en tenant compte de l'effet de la perméabilité limitée du sol sur la vitesse de déformation (consolidation) et de la viscosité du sol (fluage) **[41].**

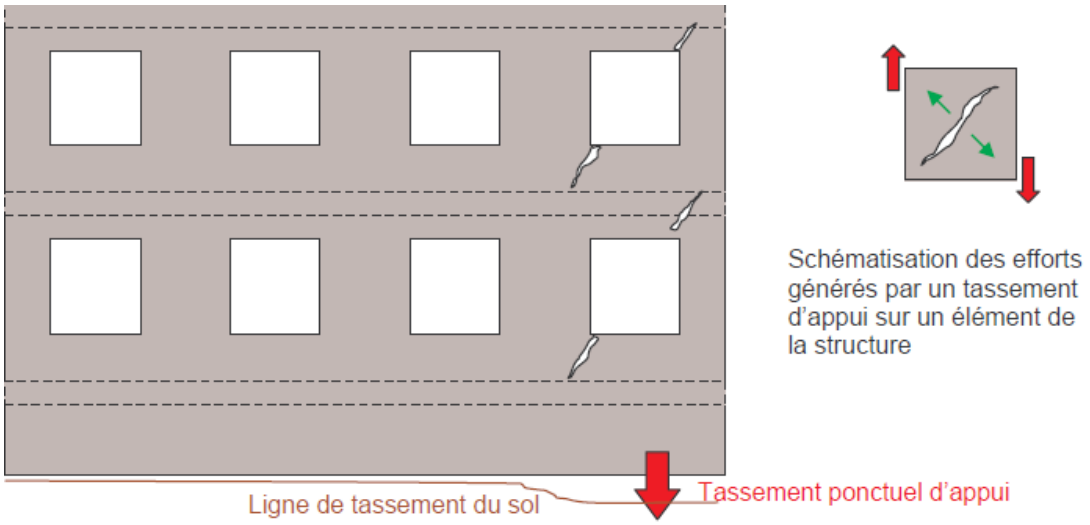


Figure 2.15 : Schéma de tassement d'appuis.

2. Remontée Capillaire :

Le terme capillaire désigne un canal tubulaire de très petit diamètre (environ celui d'un cheveu, d'où son nom) qui permet à l'air ou à l'eau de circuler à travers les matériaux, sous l'effet des forces de capillarité. Les capillaires peuvent former des réseaux très ramifiés ; le plus souvent, ils relient entre elles les petites cavités internes qui donnent à un matériau son caractère plus ou moins poreux et absorbant.

La remontée capillaire correspond au phénomène de montée des eaux dans les capillaires des matériaux et des murs dont la base est située en milieu humide (exactement comme dans une éponge sèche que l'on pose sur une mince flaque d'eau).

En pratique, l'ascension capillaire dans un mur peut atteindre 1,50 mètre de haut, mais rarement plus. Le remède est la mise en place ou la reconstitution d'une coupure de capillarité au pied du mur **[41].**



Figure 2.16 : Remontée capillaire sur un mur.

3. Les glissements de terrain :

Parmi les problèmes urbains dont souffre actuellement un problème majeur, le glissement de terrain. En effet est affecté par de nombreux glissements qui ont dans le passé causé des dégâts importants aux constructions et menacent aujourd'hui sérieusement d'autres quartiers à stabilité précaire en donnant ainsi une image hideuse dans les villes **[41].**



Rupture d'un mur sous



Décline d'un bâtiment sous

Figure 2.17 : l'effet de glissement de terrain.

4. Le gonflement :

Le gonflement du sol surtout dans le terrain de nature argileuse peut cause dans quelques cas à des tassements différentiel au niveau des semelles des fondations qui cause résultats des fissures dans la structure.

2.4.1.2. Les conditions climatiques :

1. La Météo :

1.1. La Température :

Les effets de la température se manifestent de nombreuses façons.

On peut distinguer deux types d'actions selon qu'elles affectent directement les propriétés des matériaux ou le comportement mécanique des constructions.

1.2. Les Effets Du Vent :

L'action du vent sur les structures se manifeste de nombreuses manières : cela va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à la pression dynamique appliquée aux structures et à leur mise en mouvement éventuelle, pouvant provoquer des phénomènes de flottement ou de galop dans le cas de structures souples (ponts à câbles) **[41].**

2. L'humidité :

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

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton augmente mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton n'augmente mais en contrepartie la diffusion de l'oxygène vers les armatures se fait de plus en plus difficilement. L'humidité relative la plus favorable à l'apparition de la corrosion est de 70 à 80%.

La corrosion des aciers, dans le cas des structures ou des parties de structures immergées, ne constitue généralement pas un problème majeur puisque l'oxygène ne parvient que très difficilement à atteindre les armatures **[41].**

3. Effet De L'oxygène :

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

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

2.4.2. Les Facteurs Lies Au Manque d'entretien :

2.4.2.1. L'absence De nettoyage général :

1. Nettoyage des chaussées et des trottoirs d'un pont en béton armé :



Figure 2.18 : Dépôts de matériaux sur la chaussée et de trottoir d'un pont.

Dégradation :

Dépôts de matériaux en bordure de chaussée ou dans les caniveaux, gênant l'évacuation des eaux et entraînant la stagnation et les risques d'infiltration dans l'ouvrage.

Dépôts également en rive (au pied des parapets) pouvant servir de support à l'enracinement de la végétation **[41].**

2.4.2.2. La végétation :

2. **Sur le tablier d'un pont en béton armé**



Figure 2.19:Végétation sur le tablier d'un pont.

Dégradation :

La végétation peut :

- Prendre naissance dans les endroits encombrés de salissures (terre, sable, boue, etc.…).
- Créer des zones privilégiées de rétention d'humidité.
- Obstruer des évacuations d'eaux.
- Porter atteinte à l'étanchéité.
- Exercer une action chimique d'affaiblissement des liants.
- Fixer des dépôts qui perturbent l'écoulement de l'eau

2.4.2.3. L'enceinté D'étanchéité :

Le renouvèlement d'étanchéité permet l'infiltration des eaux plurielles et les neiges liquides par les pores de plancher de terrasse.

Cette infiltration peut causer des amorçages de béton ainsi la corrosion des armatures ; voir la (Figure 2.19) qui traduit ce problème **[42].**



Figure 2.20 : Etanchéité ancienne.



Figure 2.21 : Dégradation d'un plancher sous les eaux pluviales.

2.5. Exemple D'expertises :

L'expertise des ouvrages en béton armé dans la région de Biskra a montré que la mauvaise durabilité des structures en béton est due aux multiples facteurs d'influence qui diffèrent selon le type d'ouvrage et son milieu environnant.

L'objectif de ce travail est d'arriver à rassembler les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé dans la région étudiée, et faire apparaître leurs fréquences. **[43].**

2.5.1. Ouvrages à usage d'habitation :



Figure 2.22 : Ecrasement de l'amorce poteau.



Figure 2.23 : corrosion accélérée des amorces poteaux.

Tableau 2.1 : Ouvrages dégradés à usage d'habitation dans la région de Biskra **[43].**

Ouvrage	Année de réalisation	R+n	Année de dégradation	Cause principale de dégradation	Facteurs d'influence sur la dégradation
90 logements à Biskra	1975	R+2	1994	**Corrosion**	-Mauvaise qualité de béton. -Sol agressif. -Défauts de conception (étanchéité). -Absence d'entretien.
114 logements à Biskra (cité Izdihar)	1978	R+3	1995		
130 logements à Sidi Okba	1990	R+2 et R+1	1997		
100 logements à Zeriba	1989	R+4	1993	**Tassement de sol**	-Sol agressif -Absence d'entretien
20 logements à El Kantara	2000	R+1	2003		

L'histogramme ci-dessous figure (2.20) met en évidence la prépondérance de trois facteurs (manque d'entretien 30%, mise en œuvre 25% et climat et l'environnement 20%), les autres interviennent mais assez peu.

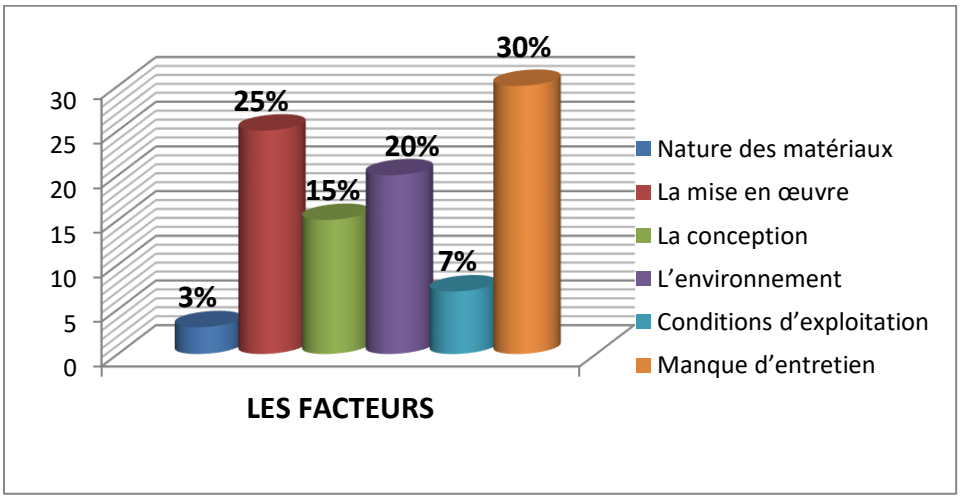


Figure 2.24 : Les Facteurs d'influence Sur La Dégradation Des Ouvrages d'habitation.

2.5.2. Ouvrages Publics :

Tableau 2.2 : Ouvrages publics dégradés dans la région de Biskra **[43].**

Ouvrage	Année de réalisation	R+n	Année de dégradation	Cause principale de la dégradation	Facteurs d'influence sur la dégradation
Lycée M. Bedjaoui à Al Alia	1985	R+1 et	1994	Corrosion	-Mauvaise qualité du béton. -Mauvaise conception. -Sol agressif -Absence d'entretien.
CEM Khaoula la ville de Biskra	1978	R+1	2000	Tassement de sol	-Sol agressif -Absence d'entretien
Brigade de gendarmerie a Zeribet El Oued	1989	R+2	1993		
Groupe scolaire à Beb El- Darb	2000	R+1	2000	Dégradation générale	-Mauvaise qualité de béton -Défauts de mise en œuvre et de conception
Mosquée el Ghaid Maidha	Années 70	RDC	1989	Corrosion	-Mauvaise qualité de béton -Défauts de conception et absence d'entretien

Dans les ouvrages publics, On constate d'après l'histogramme ci-dessus figure (2.24), la prépondérance de quatre facteurs (manque d'entretien 15%, mise en œuvre 30%, climat et l'environnement 25% et la conception 20%), La natures des matériaux et les conditions d'exploitation interviennent mais assez peu.

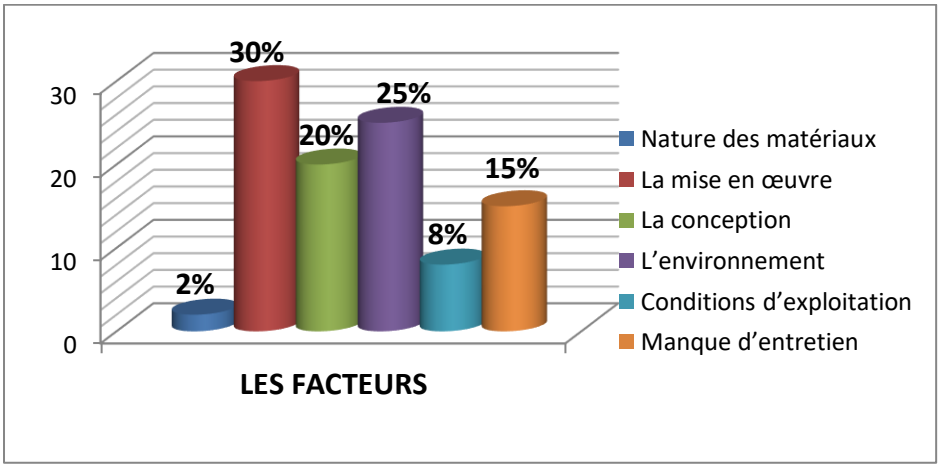


Figure 2.25 : Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages publics.

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.

Chapitre 3 :

Le diagnostic des causes de dégradations

Chapitre 3 : Le diagnostic des causes de dégradations

3.1.Introduction :

Depuis plus d'un siècle, une grande majorité des ouvrages sont construits en béton armé.

Les pathologies observées sur ce matériau composite sont complexes et variées et sont très fréquemment en relation avec l'eau.

L'étude d'ouvrages anciens encore utilisés et confrontés à l'action de l'eau constitue donc un des points essentiels de la problématique de pérennisation des constructions du génie civil.

De manière générale et encore plus particulièrement dans le cadre de la politique de développement durable actuelle, ils doivent donc être pérennisés. Cette démarche ne peut se faire qu'au moyen d'une bonne compréhension des mécanismes de vieillissement qui l'affectent, résultat de la réponse de l'ouvrage aux contraintes auxquelles il est soumis.

L'action de l'eau sur les constructions, tant au niveau de leurs fondations qu'en superstructure, constitue l'une des principales causes d'apparition de désordres, aussi bien du point de vue structurel qu'esthétique. Les problématiques liées à l'eau proviennent à la fois de

1. Son action mécanique **:**
    - Erosion des matériaux constitutifs de l'ouvrage en raison d'un courant.
    - Charge statique apportée par l'accumulation d'eau**.**
2. Ses caractéristiques chimiques et intrinsèques**.**
    - Transport d'ions ou de composés chimiques « agressifs » pour les matériaux**.**
    - Variation de volume lors des changements d'état.
    - Pouvoir corrosif vis-à-vis des aciers.

Ce patrimoine national est donc vieillissant ce qui nécessite un entretien et un suivi régulier. Cependant, la maintenance des ouvrages de ce patrimoine bâti est très onéreuse. Une démarche scientifique rigoureuse est donc nécessaire pour réduire ce budget par la mise en place d'outils visant à optimiser et fiabiliser le diagnostic structural des ouvrages. Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour une évaluation à grand rendement. En effet, le CND permet de donner des informations quantitatives sur la totalité de la surface auscultée et de limiter ainsi le nombre de prélèvements **[48].**

3.2. Analogie (Médecine/Génie Civil) : [61]

3.2.1. Analogie Générale :

Considérons la table d'analogie suivante entre ces deux sciences :

Médecin……...Ingénieur, Ingénieur Expert

Spécialiste ……...……Ingénieur Expert Chevronné

Maladie ……. Dégradation, Fissures, Dommages

Thérapeutique……. Réparation, confortement

Ordonnance……Rapport d'expertise

Homme après accident …….....Structure après un séisme

3.2.2. Analogie Dans L'approche Du Diagnostic :

Tout comme nous avons pu établir l'analogie sur les acteurs et concepts entre la médecine et le génie civil nous pouvons aussi formuler une équivalence entre les deux processus de diagnostic comme le décrit la (figure 3.1) **[61].**

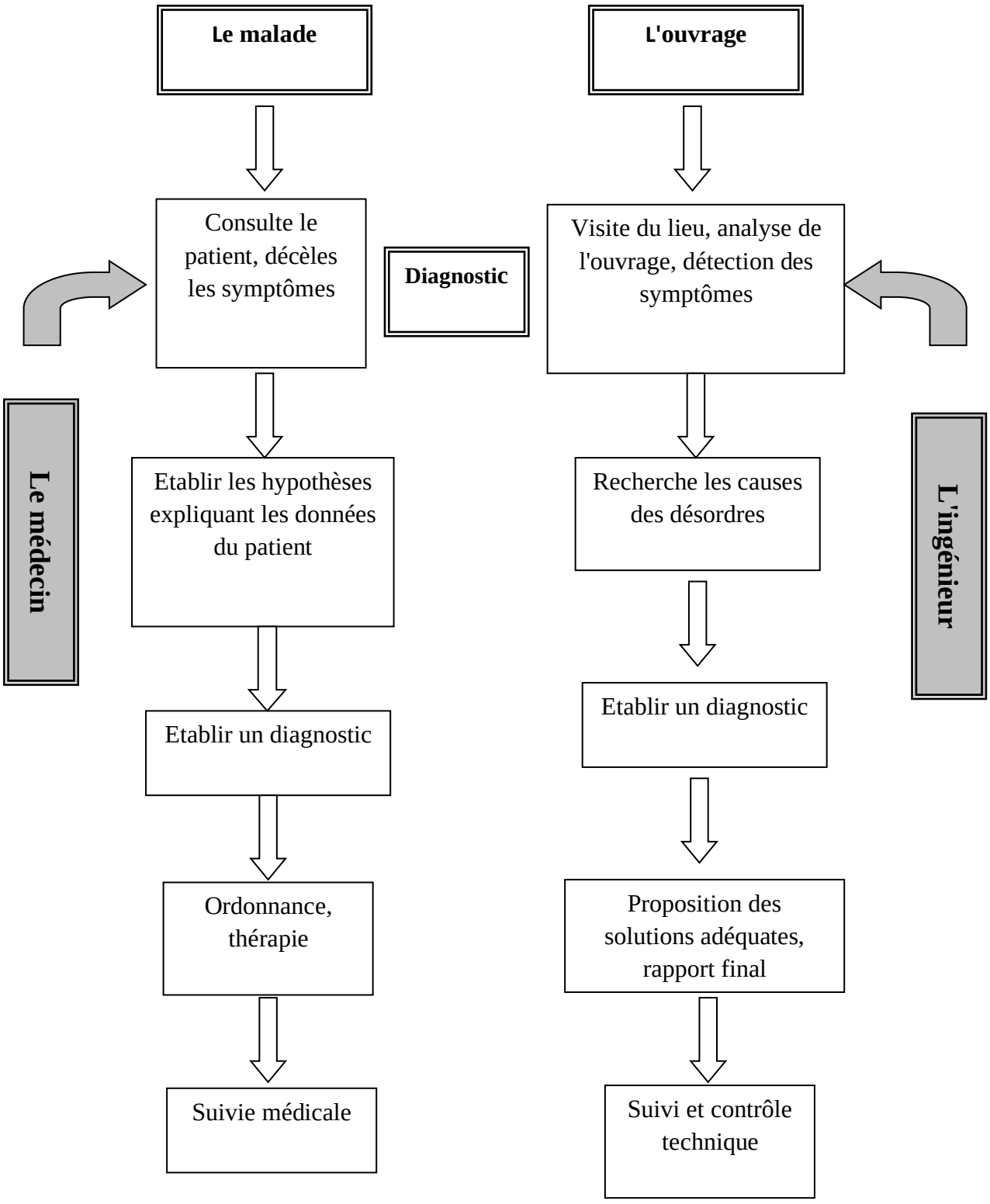


Figure 3.1 : Analogie (médecine/génie civil).

3.3. Le processus de diagnostic d'un ouvrage :

Iln'existepasunedémarchetoutefaitepourmeneruneopérationdediagnosticmais il ya un schéma de principe qui se dégage tel qu'indiqué à la

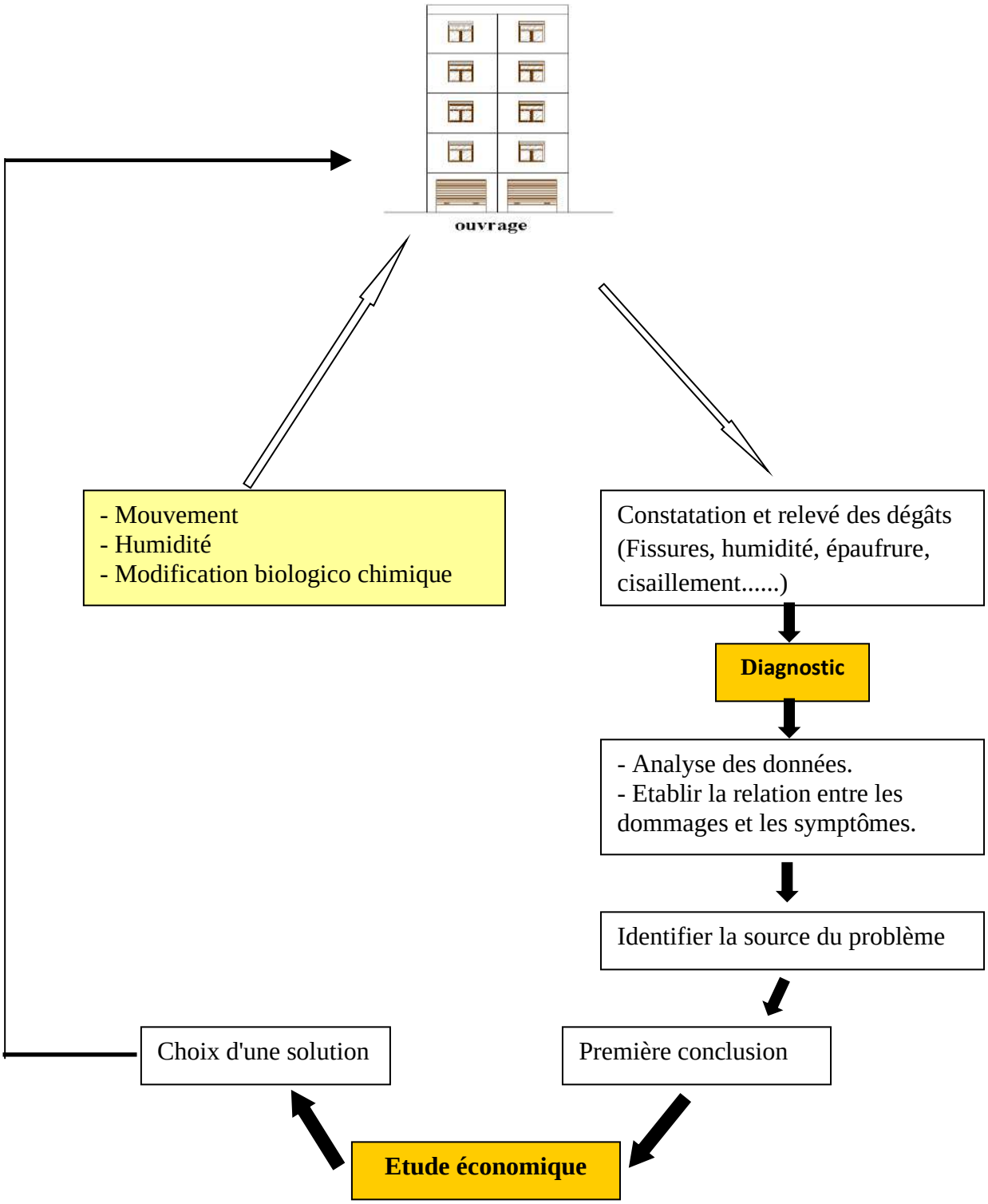


Figure 3.2 : Cycle du diagnostic des pathologies et de la maintenance d'un bâtiment.

3.3.1. Les principales étapes d'un diagnostic : [61]

Le diagnostic d'une structure se compose de différentes étapes clés décrites ci-dessous :

1. Une visite préliminaire :

Elle 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 partie dégradées.

Suite à cette visite, l'ingénieur charge d'affaire peut déjà se faire une idée de l'origine des dégradations observées et peut ainsi proposer un programme d'investigations à réaliser, son coût ainsi que sa durée. La détermination des surfaces inspectées plus en détails et les techniques d'auscultation utilisées tiendront compte de l'accès, de l'environnement ainsi que des contraintes d'exploitation de la structure **[61].**

2. Collecte des documents :

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

- Date de construction afin de connaitre le code selon lequel la structure a été calculée et Les Dispositions constructives de l'époque.
- L'historique de la structure.
- Les plans de coffrage et de ferraillage.
- Les rapports d'éventuelles études antérieures
- L'orientation de la structure **[61].**

3. Préparation De L'intervention :

A partir de la visite sur site et de l'étude des documents collectes on peut déterminer précisément le nombre et le type de mesures à réaliser pour répondre au mieux à la demande du client. Avant l'intervention il faut déjà avoir détermine quelles informations sont importantes pour réaliser la mission, quelles sont a priori les dégradations que l'on veut mettre en évidence **[61].**

4. Inspection Détaillée :

Une 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 tels que :

-la présence d'anciens revêtements ou de produits d'imprégnation,

- l'apparence de la surface du béton, présence de stalactites, d'efflorescences, de traces de Rouille,

- la présence de fissures (avec leurs ouvertures et leurs orientations, réseau).
-les détériorations de la peau du béton (épaufrures, feuilletage, éclatements…).
- la détection des zones sonnant le creux.
- les zones ou le béton et les armatures ont été désorganises (cas d'un incendie…).
- la présence d'armatures (passives ou actives) apparentes, corrodées ou non.
- le relevé des déformations de la structure.
- la détection des traces d'humidité.
- etc.… **[61].**

Généralement il faut aussi relever la géométrie de la structure, espacement des éléments porteur, épaisseur de dalle, géométrie d'un plancher hourdis par exemple. Dans de nombreux cas les Structures diagnostiquées sont anciennes, de ce fait on ne dispose plus des plans.

Suite à l'inspection visuelle on choisit des zones représentatives des désordres observes sur Lesquelles on va effectuer des mesures. Celles-ci peuvent être de type non destructif par exemple la Détection de l'enrobage des armatures par un procède électromagnétique. Elles peuvent également Consister en des prélèvements de carottes et d'échantillons en vue d'analyses en laboratoire.

Les investigations destructives seront limitées au maximum pour ne pas endommager la structure **[61].**

5. Essais en laboratoire :

Si des échantillons ont été prélevés dans les zones représentatives des états de dégradation, ceux-ci sont envoyés en laboratoire pour analyse chimique ou microstructurale afin de qualifier le béton.

Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure elles sont écrasées afin de connaitre la Resistance a la compression du béton.

6. Traitement des résultats :

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

7. Commentaires et avis de réparation :

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

- L'origine probable des désordres, leur étendue, et leur probable évolution

- Si la structure garantit toujours la sécurité des personnes et des biens qu'elle abrite (Bâtiments) ou qu'elle ne menace pas de s'écrouler.
- Les zones à traiter en priorité
- Des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage, maintien, renforcement ou suivi, conseil sur des Eventuels compléments d'étude
- Des recommandations relatives aux éventuelles méthodes de réparation les mieux adaptées Il est à rappeler que le rapport de diagnostic doit être compréhensible pour un non initie.

3.3.2. Choix des investigations : [59]

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres.

Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre mission. Ces différents paramètres sont les suivants :

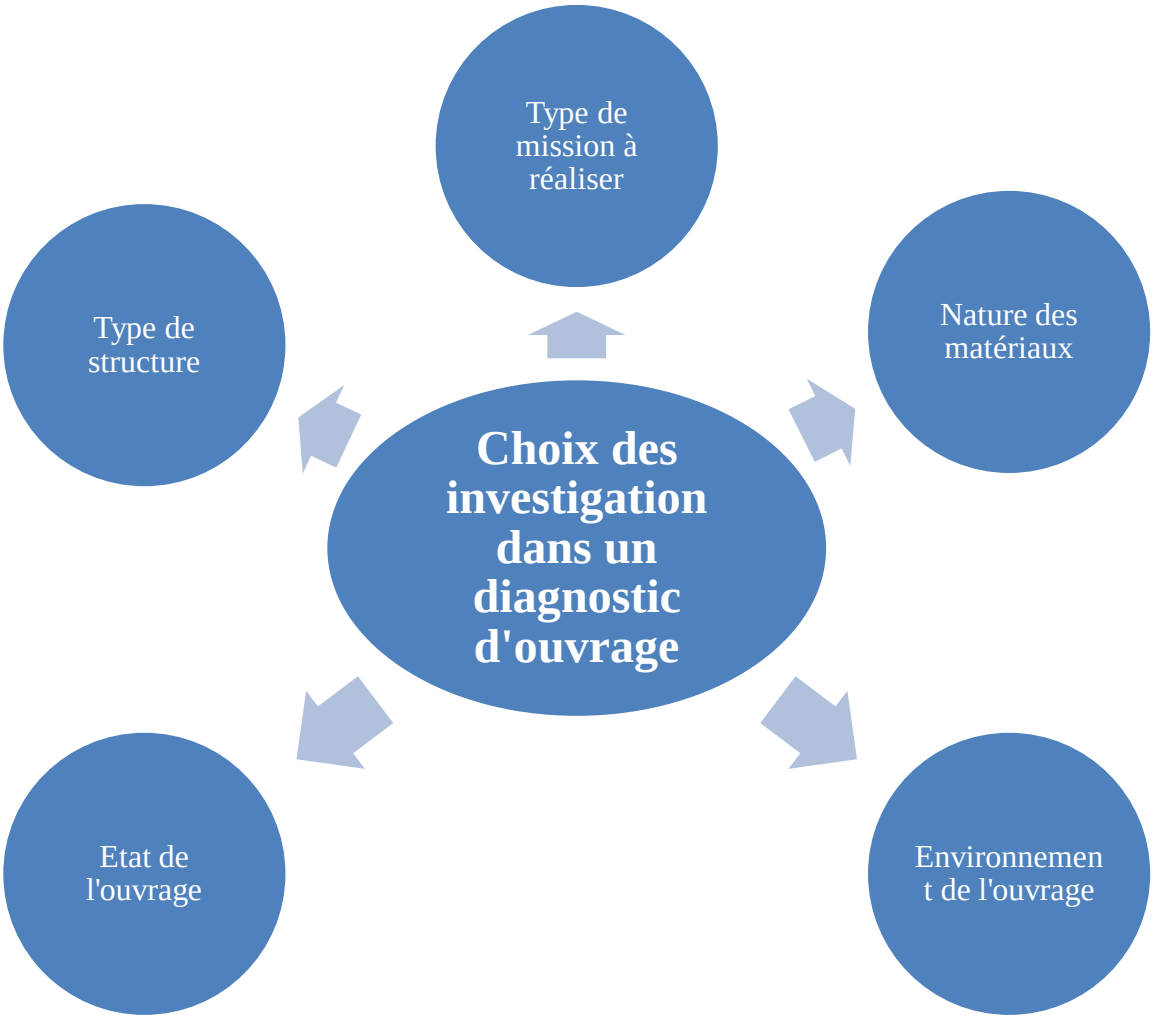


Figure 3.3 : Schéma du choix d'investigation.

Le choix des investigations dépend de :

1. **Type de mission à réaliser :**

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes **[59].**

2. **Nature des matériaux :**

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre **[59].**

3. **Type de structure :**

Géométrie et taille de l'ouvrage

4. **Etat de l'ouvrage :**

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton **[59].**

5. **Environnement de l'ouvrage :**

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être un frein à la réalisation d'investigations et nécessiter l'utilisation de moyens spécifiques (nacelle, échafaudages, etc.) **[59].**

3.3.2.1. Investigation non destructive :

Le principe des investigations non destructives réside dans le fait qu'on ne touche pas directement à la structure. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic sans risques de porter atteinte à son intégrité **[59].**

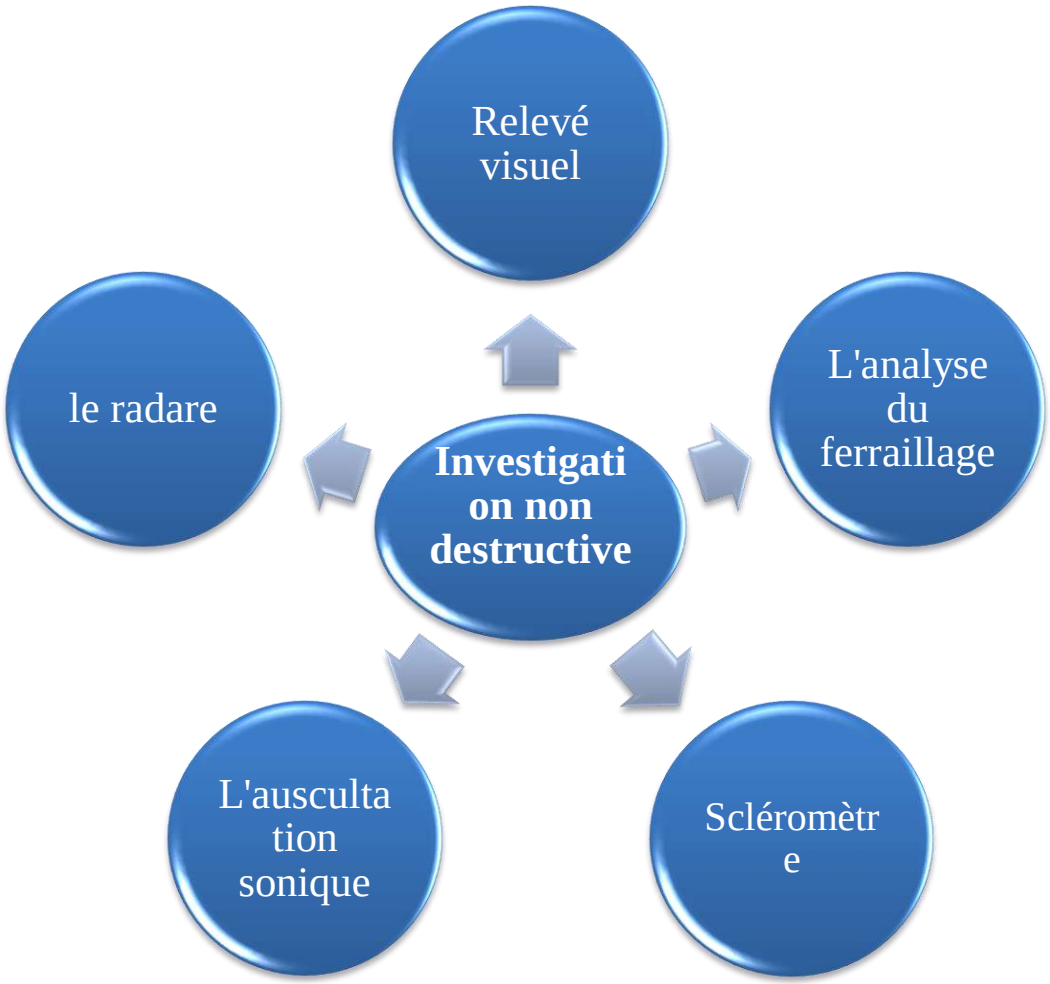


Figure 3.4 : Schéma des investigations non destructives.

1. Relevé Visuel :

Le principe du diagnostic visuel est d'aller sur le site et de répertorier les différents défauts que présentent les structures. Ces défauts, pour les ouvrages en béton armé peuvent être très nombreux **[55].**

Les principaux désordres 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 ainsi que les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds ainsi que la présence d'aciers apparents.
- Les zones de ségrégation **[55].**

Tous ces éléments doivent être répertoriés sur des plans, accompagnés d'un reportage photographique des principaux désordres. Cette première étape permet de définir la gravité des troubles mais aussi de permettre de classer les différents éléments selon leur priorité **[49].**

2. L'auscultation sonique :

L'auscultation sonique est une méthode utilisée pour caractériser la qualité du béton. Le principe de l'essai repose sur la mesure de la vitesse de propagation du son dans le matériau.

On mesure la propagation d'une première impulsion d'un train d'ondes généré par un transducteur, entre deux points déterminés du béton. On peut, à partir du temps de propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre les deux transducteurs par le temps mesuré.

Deux méthodes de mesure sont possibles : soit la mesure en transparence, qui fournit une information sur la qualité du béton « à cœur », soit la mesure en surface, qui concerne la couche externe, sur une épaisseur de 6 à 8 cm de béton environ.

Pour les mesures en transparence, le principe est que la vitesse de propagation du son est moindre dans le vide. Si le béton est poreux ou de mauvaise qualité, il y aura plus d'air dans le matériau. Ainsi la vitesse de propagation mesurée sera plus faible. Pour ce qui est des mesures en surface, elles permettent de déterminer la présence d'une bicouche ou bien la profondeur d'une fissure **[50].**



Figure 3.5 : l'auscultation sonique des bétons.

3. Scléromètre :

Le principe de l'essai scléromètrique 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, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice scléromètrique"Is" d'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée, de l'élément considéré.

Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influer sur les résultats, tels que l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton. Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée **[56].**



Figure 3.6 : Scléromètre.

4. L'analyse Du Ferraillage :

Les mesures de reconnaissance du ferraillage (position et enrobage) peuvent se faire à l'aide d'un pachomètre. La profondeur d'auscultation de cet appareil est de l'ordre de 10cm suivant le béton et le réseau d'armature. Il existe deux types de mesures : soit par détection linéaire, consistant à détecter les aciers perpendiculaires à la trajectoire du pachomètre, soit par imagerie, permettant de détecter les aciers présents dans un carré de soixante centimètres de côté **[51].**

La première méthode permet par exemple de connaitre l'espacement des cadres d'une poutre. Alors que la deuxième permet de déterminer le clavetage des aciers au niveau d'une jonction poteau/poutre. Cependant, pour les deux types de mesure, les résultats donnent les enrobages et l'espacement du ferraillage. Il peut être utile, lorsque cela est possible, de dégager quelques armatures afin de calibrer l'appareil. L'inspection

des armatures dégagées permet de confirmer leur nature, et de mettre en évidence d'éventuels désordres ou pertes de section en zone altérée **[51].**

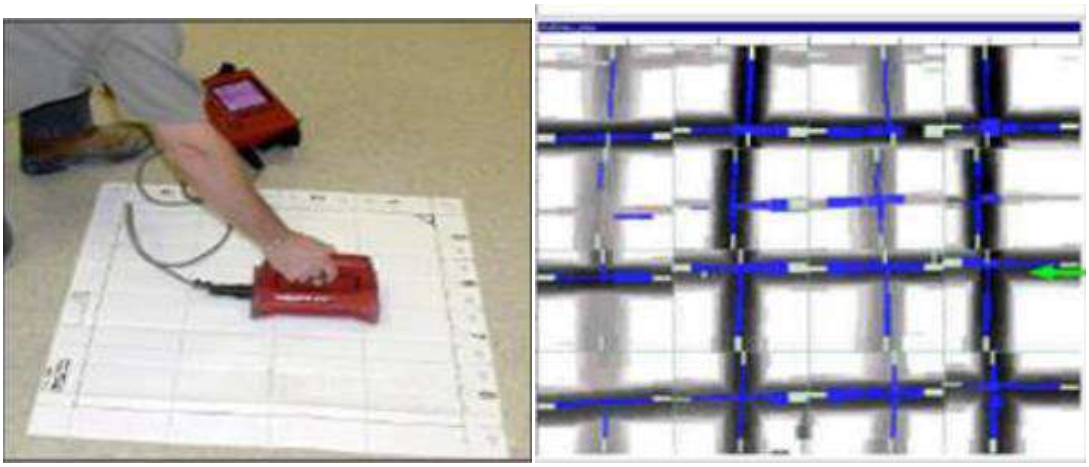


Figure 3.7 : Détection par fenêtres et résultats.

5. Le Radar :

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

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

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

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

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

1982), détecter des armatures, des câbles précontraints, des défauts (vides, fissures, délaminages) dans le béton.

Elle permet d'estimer l'épaisseur du béton d'enrobage, la dimension d'éléments (plancher, voile, mur, etc.). Cependant, le positionnement en profondeur dépend forcément de la connaissance de la vitesse d'ondes électromagnétiques dans le matériau étudié. Les études académiques récentes se sont développées afin d'évaluer des propriétés physiques et chimiques du matériau telles que les teneurs en eau et en chlorure, notamment pour le béton d'enrobage (Laurens 2001, Klysz 2004, Sbartaï 2005, Ihamouten 2011).

Plusieurs synthèses ont été effectuées pour préciser les avantages ainsi que les limitations du le technique radar (Bungey 2004, Clemeña 2004, Hugenschmidt 2012). Un avantage principal est l'auscultation totalement non destructive et rapide à grande échelle et en profondeur (dépendant de la permittivité du milieu). L'équipement portable permet une utilisation facile et une présentation immédiatement des résultats sous forme d'image radar (coupe-temps). Par contre, le traitement des données nécessite une personne qualifiée. Les caractéristiques des ondes électromagnétiques sont souvent exploitées, soit en vitesse, soit en amplitude de l'onde directe ainsi que les différents échos. Il est important de noter que la vitesse et l'amplitude dépendent de la permittivité diélectrique du matériau qui est dépendant des teneurs en eau et en chlorures des bétons. Les valeurs relatives de la partie réelle de la permittivité diélectrique (Tableau 1.1) sont définies par rapport à celle de l'air conformément à la norme ASTM D4748. Cette valeur est souvent appelée « constante diélectrique » …

Le technique radar est souvent utilisé sur des ouvrages réels, plus particulièrement pour inspecter le revêtement des tunnels, ou détecter le délaminage sur des ponts en béton armé à l'aide de système mobile et moderne, par exemple le système HERMES (High Speed électromagnétique Roadway Mapping and Evaluation System) (IAEA 2002). Ces applications sont présentées dans les normes ASTM D4748, ASTM D6087, ASTMD6429-99, ASTM
D6432-99. Les nouvelles applications concernent l'évaluation de la variabilité spatiale des bétons in situ pour détecter des zones de probabilité de dégradation (SENSO 2009, EvaDéOS2012). Cette technique peut être également utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres mesures CND plus locales (résistivité électrique, ultrason) pour améliorer l'évaluation des propriétés des bétons (ex. saturation, porosité, résistance mécanique) **[62].**



Figure 3.8 : Le radar.

3.3.2.2. Investigations Destructives :

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour 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 **[52].**



Figure 3.9 : Schéma des investigations destructives.

1. Carottage D'éléments :

Le carottage d'éléments en béton armé peut avoir différentes utilités. On y a recours principalement pour effectuer des essais de résistance à la compression sur les carottes prélevées, afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des éléments. Il est aussi possible d'analyser chimiquement le prélèvement afin de connaitre les constituants du béton tels que le type de ciment utilisé, le rapport E/C estimé, la taille des granulats. En ce qui concerne les dallages, il est parfois nécessaire de devoir carotter l'élément afin de réaliser des essais géotechniques tels que le pénétromètre dynamique ou bien un prélèvement de sol en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol en place. Cela a lieu généralement lorsque l'ouvrage change de destination, quand les charges d'exploitation changent ou si une restructuration du bâtiment est envisagée.

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. Ce ci 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 la quelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure **[57].**



Figure 3.10 : Carottage.

2. Test a la carbonatation :

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

La phénolphtaléine est un composé organique de formule $C_{20}H_{14}O_4$. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact.

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

(Milieu acide) à la forme déprotonée (milieu basique) **[53].**

Le dioxyde de carbone atmosphérique qui pénètre à travers la porosité du béton, depuis la surface du parement, réagit avec les constituants alcalins contenus dans le béton. Au fur et à mesure de sa pénétration, ce processus conduit à une réduction de la valeur du pH d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Ceci a pour effet de diminuer voire supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion. Le degré d'avancement de la carbonatation (profondeur de carbonatation) de la matrice cimentaire est directement lié aux caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, âge, …) ainsi qu'aux conditions environnementales (humidité, température, …) **[49].**

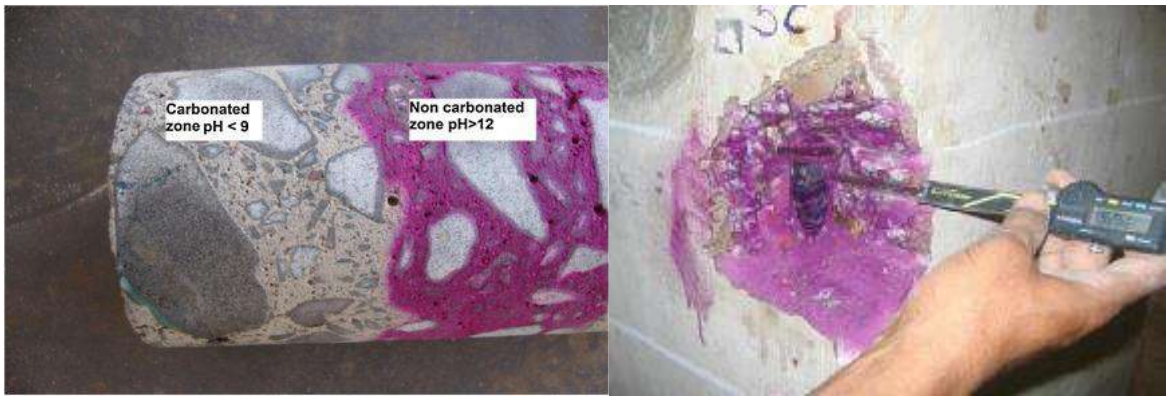


Figure 3.11 : Carbonatation.

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

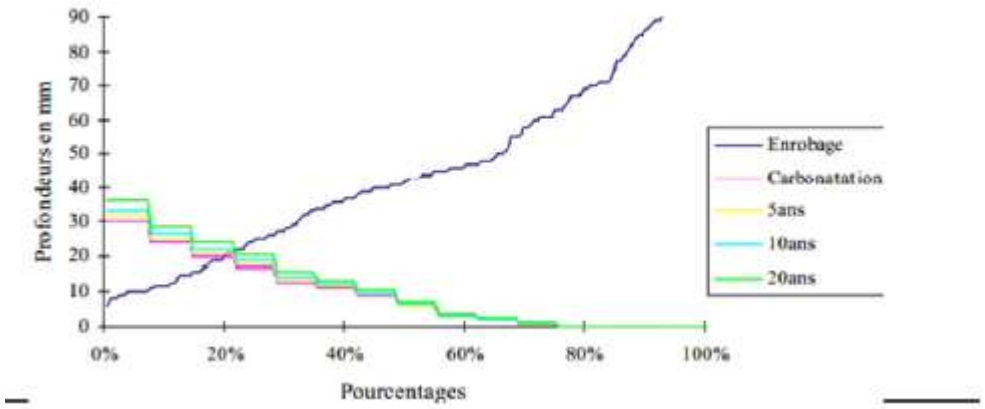


Figure 3.12 : Graphique enrobage-carbonatation.

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

3. Mesure du potentiel de corrosion :

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que sur des ouvrages ayant un ferraillage continu et n'ayant pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant. Le principe de l'essai est de mettre à nu une armature puis la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance. Une électrode de référence est placée sur le parement étant elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre.

Elle est dite de référence car elle a un potentiel constant dû à un équilibre électrochimique. Les résultats obtenus permettent de déterminer la probabilité de corrosion des armatures.



Figure 3.13 : Mesure du potentiel de corrosion.

4. Prélèvement d'acier :

En cas de recalcule d'une structure, il est important de connaitre les aciers présents dans un ouvrage.

Le prélèvement d'acier permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité **[51].**



Figure 3.14 : Prélèvement d'acier.

3.4. Les causes fréquentes de dégradations dans les bétons anciens :

3.4.1. Les fissurations du béton : [60]

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

1. Les causes directes externes : avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.

2.Les causes dues aux propriétés des matériaux : avec par exemple le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.

3. **Les causes externes indirectes** : à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.
4. **Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures** : les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche **[60].**

3.4.2. La Corrosion :

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé.

Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, la dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé **[60].**

3.5. Cas particulier de la corrosion des armatures dans les bétons anciens :

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 d'élimination dans le lit des armatures peut se produire, sans signes apparents de corrosion.



Figure 3.15 : tâches de rouille+ fissuration



Figure 3.16 : éclatement localisé



Figure 3.17 : éclatement généralisé

Figure 3.18 : les symptômes de corrosion (V. Baroghel-Bouny et al., 2008)**.**

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).

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. Le graphique de la figure 3.13 ci-dessous illustre les différents stades de dégradation du béton **[54].**

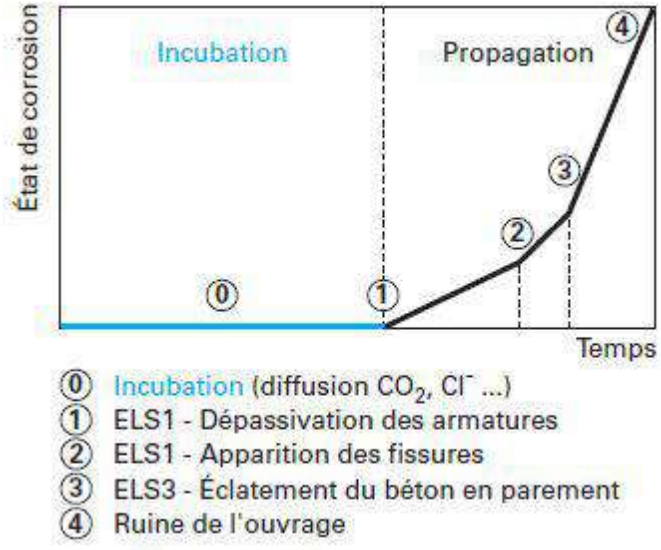


Figure 3.19 : Modèle conceptuel de corrosion des aciers dans le béton armé : (tiré de : nouvelle approche de la Durabilité du béton. Indicateurs et méthodes, V. Baroghel-Bouny).

Conclusion

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage

ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Chapitre 4 :
Réparation et protection du béton armé

Chapitre 4 : Réparation et protection du béton armé

4.1 Introduction :

Aujourd'hui, la plupart 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.

Une fois les causes ainsi que les pathologies diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir des travaux de réhabilitation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques et mécaniques initiales. Afin de retarder ou de limiter de nouvelles pathologies similaires, il est possible de protéger la structure. Il existe un grand nombre de protections, elles sont à choisir selon les différentes pathologies, mais aussi sur la durée de pérennisation espérée.

Elles vont du simple revêtement s'appliqué sur le parement, aux traitements électrochimiques. Il est aussi possible de ne pas prévoir des travaux, mais seulement s'intéresser à l'évolution des pathologies. C'est le cas par exemple pour des fissures, il peut être utile de vérifier si son ouverture est continuelle dans le temps, dans ce cas il sera nécessaire de prévoir des travaux de confortement. Ou bien si l'ouverture de la fissure dépend de l'évolution de la température, auquel cas il est possible de laisser l'ouvrage en l'état sans craindre une dégradation de l'ouvrage. 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.

4.2. Définition :

La réparation d'un élément en béton fait généralement intervenir deux matériaux très différents. D'une part, il y a le substrat, qui date normalement de plusieurs années et qui est considéré stable du point de vue volumétrique. D'autre part, il y a le matériau d'apport ou de réparation qui subira d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre. Deux types de réparation peuvent être effectués : une reconstruction partielle ou une réparation mince. Dans le premier cas, l'état de la structure est tel que ses capacités sont réduites et elle n'est plus sécuritaire. Une partie importante de béton, qui est détérioré, doit alors être enlevée. La reconstruction partielle peut exiger l'utilisation d'étaiements afin de pouvoir enlever le béton de façon sécuritaire et des barres d'armatures sont ajoutées dans la partie reconstruite. Dans le second cas, la

réfection se limite à enlever le béton détérioré sur une profondeur de quelques millimètres, soit entre 25 et 100 mm, et à le remplacer par un nouveau béton, avec ou sans ajout d'armature, afin de retrouver l'aspect esthétique de la structure d'origine **[63].**

4.3. Stratégie de la réparation :

4.3.1. Préparation de la surface du béton a réparé :

Après le passage obligé du diagnostic, la réparation proprement dite peut être abordée et le processus comporte plusieurs phases qui ont chacune une finalité bien précise.

Il convient tout d'abord de distinguer les réparations qui visent des éléments de structure dont la dégradation nuit à la résistance et pourrait mettre en cause la stabilité, des réparations qui visent des éléments de façade, dont la dégradation n'est susceptible de compromettre la stabilité que très rarement mais la conservation d'aspect est souvent primordiale.

Dans le premier type, auquel se rattache nombre de réparations concernant des ouvrages de génie civil, il s'agit non seulement de rétablir la protection des éléments de la structure, mais aussi de rétablir, voire renforcer, la résistance de cette dernière.

1. Elimination du béton dégradé :

Il s'agit d'éliminer les éclats de béton en cours de formation.

L'opération consiste à repérer à l'oreille, en frappant la surface du béton, les zones qui

« Sonnent creux » et donc qui sont affectées d'une fissure interne engendrée par la poussée des armatures oxydées **[64].**

Le principal écueil à éviter est la création d'une micro fissuration parasite dont le nettoyage de surface ultérieur n'assure pas avec certitude l'élimination des micros - éclats.

Il est conseillé de dégager sur toute leur périphérie les parties défectueuses pour faciliter la tenue du mortier de réparation, de ménager une contre - dépouille à la périphérie des trous obtenus par élimination des éclats de béton, ce qui permet d 'éviter aussi les bords «en sifflet» qui favorisent le « grillage » de périphérie du mortier de réparation **[65].**

Lorsque la zone est carbonatée ou attaquée par les chlorures s'étend jusqu'aux armatures, Il faut enlever complètement le périphérique des armatures jusqu'à l'apparition du béton sain.

Il existe de nos jours une grande variété de technique pour éliminer le béton dégradé. Les techniques les plus fréquemment employées pour démolition de surface sont :

1.1. L'hydro –Démolition :

C'est la technique la plus efficace et la moins traumatisante pour le support (peu ou pas de microfissuration), cette technique utilise des jets d'eau à très haute pression pour enlever le béton détérioré en surface, cette pression peut être ajusté en fonction de profondeur de démolition ou en fonction de la qualité du béton à enlever.

1.2. Marteau piqueur :

A l'aide d'un marteau de masse moins de 14 kg avec un grand nombre de coups (1000 à 2000 coups/mn), il donne une bonne qualité de surface avec peu de vibration. Le rendement varie en fonction de la qualité du béton, de la présence des armatures et de l'opérateur.

1.3. La brise béton :

C'est un gros marteau hydraulique de masse comprise entre 15 à30 Kg, mais son utilisation provoque dans la plupart du temps des fissurations et trop de bruit, à cause de la grande vibration.

1.4. Projection des particules :

Le jet de sable, le jet de billes sont des techniques qui permettent l'enlèvement d'une mince couche (quelques millimètres).

- **Le jet de sable** consiste un flot de particules de sable entraînées à haute vitesse par un jet d'air comprimé. Les chocs usent le béton permettent un meilleur contact entre l'ancien et le nouveau béton.
- **La projection des biles** consiste à projeter à haute vitesse des billes d'acier **[65].**

2. Nettoyage de la surface :

Le nettoyage de la surface est nécessaire pour enlever les débris, les huiles et les poussières, il permet d'obtenir une surface propre afin d'avoir une adhérence entre le matériau de réparation et le vieux béton (support), le mode de nettoyage varie selon les techniques de préparation de surface employées auparavant, la méthode de nettoyage doit être compatible avec le produit de réparation qui sera mis en œuvre après. (Figure 4.1) **[70].**



Figure 4.1 : Nettoyage de la surface.

3. Humidification De La Surface :

Après nettoyage de la surface, et dans le cas d'un produit qui exige un support d'application humide, il est souvent conseillé d'humidifier le parement de béton pour faciliter l'accrochage des produits de ragréage à base de liant hydraulique, et pour éviter l'effet de dessiccation du produit de réparation (retrait). L'humidification est généralement réalisée par arrosage ou par aspersion d'eau vers le support de façon qu'il soit saturé et qu'il conserve son aspect humide pendant plusieurs heures avant la réparation. Par la suite, on va voir l'effet de mouillage de substrat sur la durabilité des réparations **[70].**

4. Traitement Ou Remplacement Des Armatures Existantes : [70]

Les armatures existantes devant être intégrées au béton neuf doivent être débarrassées de toute trace de corrosion, huiles, saleté, et de tous corps étrangers. A cet effet, on procède par grattage par frottement à la brosse métallique manuelle ou mécanique ou par projection (sablage ou grenaillage). La répartition des contraintes qui en résulte doit être étudiée. A la réparation du parement de structure en béton armé, on trouve en général les aciers apparents ont perdu leur couche de passivation, et certain ont entamé leur processus de corrosion. Cependant il faut assurer soit une nouvelle protection des aciers lors de la réparation, soit de remplacement des aciers fortement corrodés par d'autres aciers neufs. (Figure 4.2). Pour les armatures qui ne présentent que de légères traces de rouille (corrosion active) on ne doit pas les accepter surtout en présence de chlorures, la décision devrait être prise après une bonne évaluation d'un expert, et avec l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion **[70].**



Figure 4.2 **:** Enlèvement des aciers corrodés.

4.1. Décapage des armatures existantes :

Lorsque les armatures sont corrodées ou portent des traces de rouille elles doivent être débarrassées de tout ce qui pourrait nuire à leur adhérence avec le béton rapporté. Leur décapage est alors indispensable et peut être réalisé par sablage par grenaillage, par jet d'eau à haute pression où a la brosse métallique suivant l'ampleur des travaux **[70].**

4.2. Remplacement des aciers :

Parfois il est nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers passifs dans le cas des ragréages, lorsque les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est possible de souder de nouvelles armatures sur les aciers existants ou utiliser des coupleurs mécaniques **[70].**

5. Mise en place du béton de la réparation :

C'est la phase finale de la stratégie de la réparation. Après avoir identifié les causes de dégradations, les méthodes et les matériaux de réparation, et après le nettoyage et l'humidification de la surface à réparer, le béton de réparation, alors sera mis en place selon les techniques exigées généralement par un cahier de charge afin d'obtenir une réparation de qualité **[66], [67].**

6. Reconstitution de la couverture des surfaces réparées :

Il s'agit de combler les vides laissés autour des surfaces voisines par la purge du béton dégradé, au moyen d'un remplissage adhérent présentant, vis-à-vis des futurs agents de détérioration, une résistance meilleure que celle du béton qu'il remplace. Le tout afin d'éviter une réapparition rapide des mêmes désordres aux même endroits.

Le plus souvent cette fonction est assurée non pas par un béton, mais par un mortier. Soit un mortier ordinaire de ciment, soit un mortier à base de liants hydrauliques.

7. Mise en place d'un revêtement de protection superficiel :

Dans le cas d'une intervention localisée, des raisons d'esthétique imposent pratiquement la mise en place d'un revêtement d'aspect pour uniformiser l'apparence de

l'ouvrage. Il est donc souhaitable de profiter de la nécessité de ce revêtement pour lui conférer des propriétés autres que celle du simple aspect et notamment une protection du support vis-à-vis des échanges gazeux (carbonations) et hydriques et de souplesse vis-à-vis d'éventuelles amorces de fissuration **[66], [67].**

4.3.2. Les différentes méthodes de réparation :

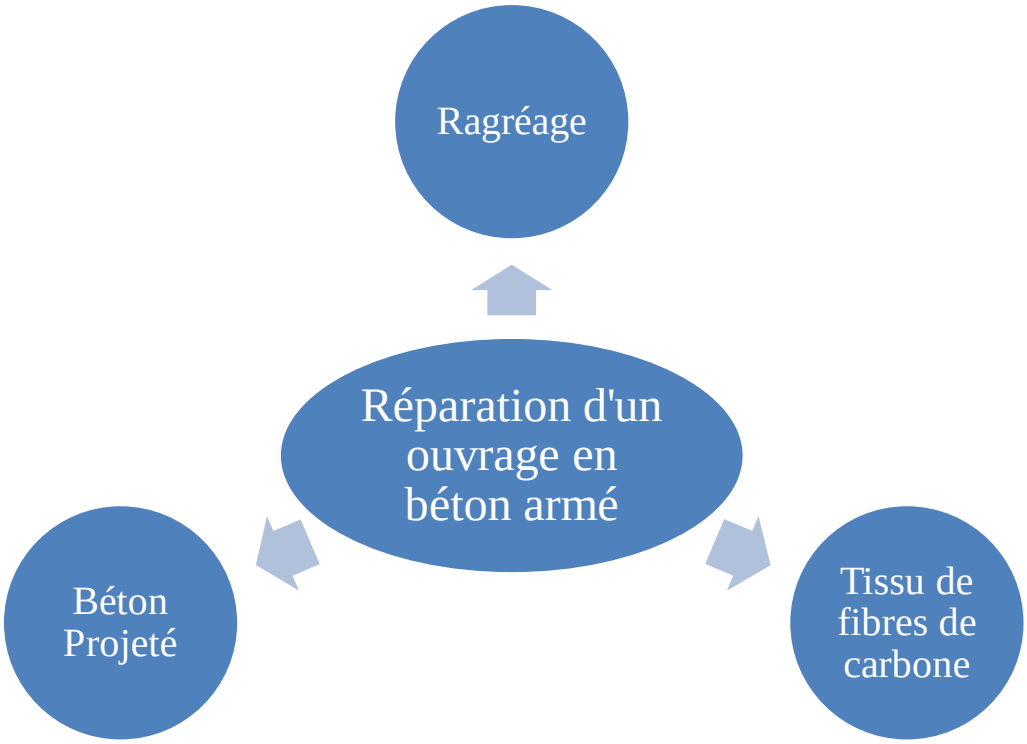


Figure 4.3 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé.

1. **Le Ragréage :**

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier **[68].**

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

La préparation de surface est une étape très importante pour la pérennité des réparations, (comme décrit ci-dessus4.4).

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

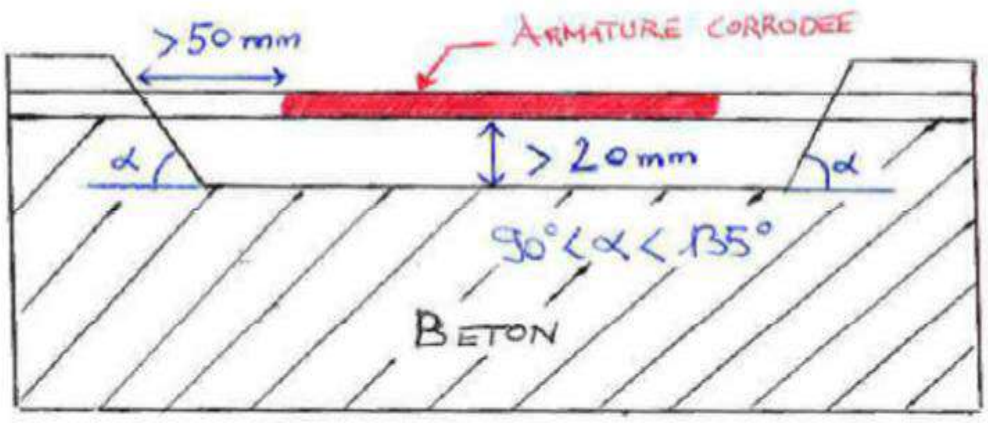


Figure 4.4 : Dégagement des armatures.

Une fois les étapes précédentes réalisées, il est possible de commencer le ragréage. Il s'agit de reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide d'un mortier de réparation convenablement choisi par une entreprise possédant les compétences nécessaires. Il peut être intéressant de choisir de mettre des inhibiteurs de corrosion directement dans la formulation de ce mortier afin de limite au maximum l'apparition de corrosion dans les zones réparées **[69].**

1.1. Mode opératoire :

Selon « Weber » (une entreprise de solutions pour la construction et la rénovation) :

- Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant
- Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer.
- L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produit 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



Figure 4.5 : Gauche à droite ; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche.

1.2.Caractéristiques des matériaux :

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

- Tenue verticale sans coffrage.
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support.
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs.
- De coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support.
- De bonne protection des aciers.

Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque «NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique » **[69].**

2. Le Béton projeté :

2.1. 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.

La méthode du béton projeté est une alternative au ragréage. Elle est généralement utilisée lorsque les surfaces de béton à reprendre sont assez importantes. Ceci s'explique par le fait que ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.

Lorsque les surfaces à réparer sont assez faibles, on privilégiera plutôt le ragréage, plus adapté aux petites surfaces.



Figure 4.6 : Béton projeté.

2.2. Technique de projection :

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires **[71].**

1. **Procédé par voie humide**

Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance.

Le procédé par voie humide est surtout utilisé lorsque les volumes à produire sont importants.

Le contrôle de la qualité est plus simple avec ce procédé, puisqu'en utilisant un béton conventionnel, le dosage des constituants du mélange est connu

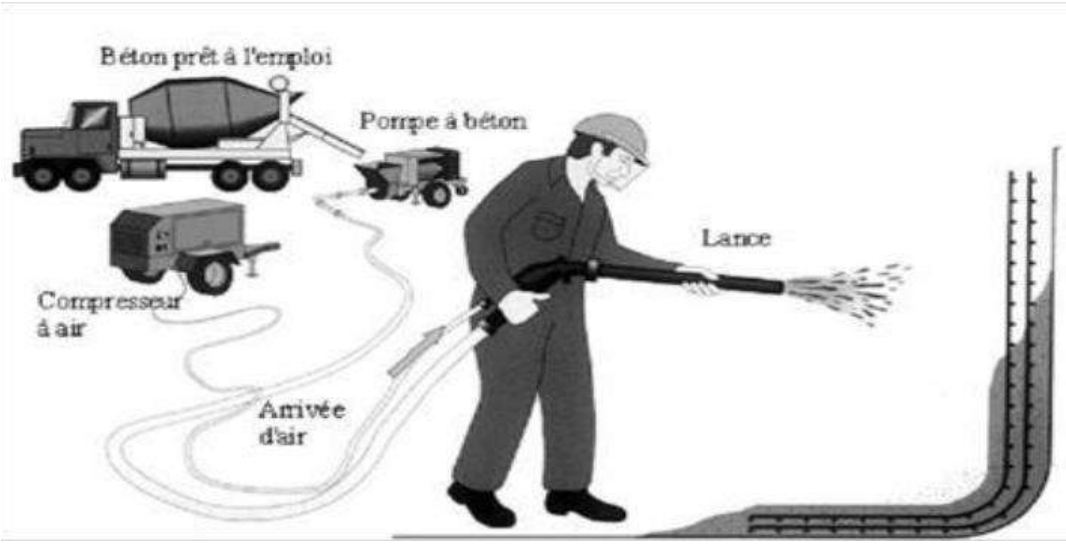


Figure 4.7 : projection par voie humide.

1. Procédé par voie sèche :

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est adire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance. L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance par l'entremise d'une bague perforée, cette bague permet le mélange de l'eau avec les matériaux.

Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface.

La Figure 4.8présente l'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie sèche.

Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux. En effet, comme le contact du ciment et de l'eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible dans l'appareillage si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées peuvent être facilement obtenues avec ce procédé puisqu'il permet d'atteindre de faibles rapports eau/liant.

Le désavantage du procédé sec est que 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

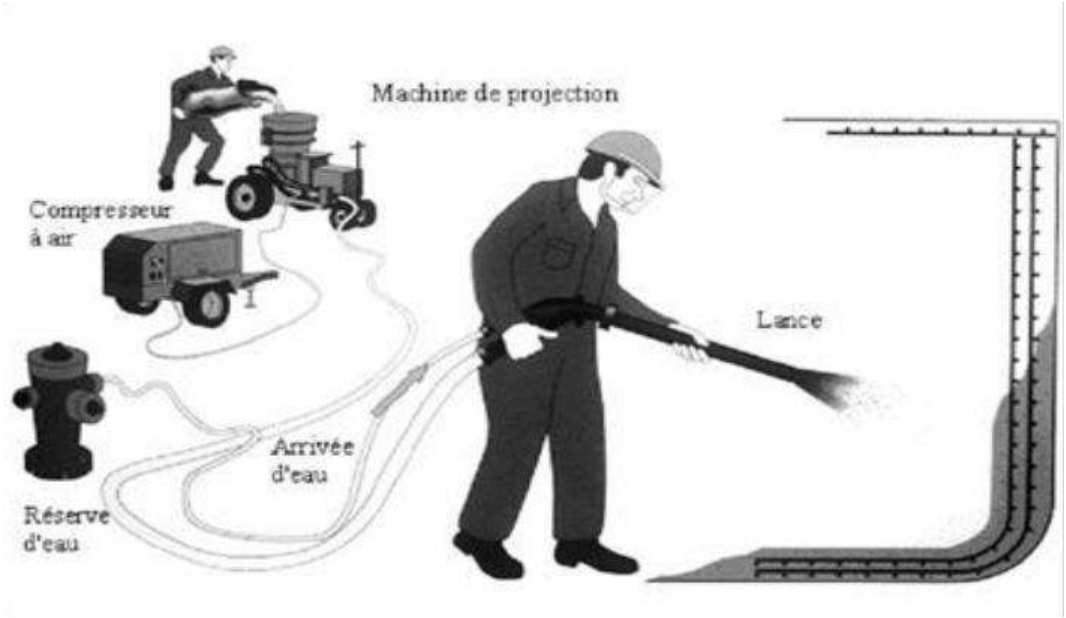


Figure 4.8 : projection par voie sèche.

2. Comparassions entre les deux méthodes de projection :

Tableau 4.1 : les avantages et désavantages de déférent type de projection

	Avantages	Désavantage
Projection par voie sèche	- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm) - Un dosage relativement faible en ciment. - Un faible rapport E/C. - Un compactage énergique - Une bonne adhérence sur le support. - Une pénétration en grande profondeur dans les pores. - Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise	- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement. - Production de poussières
Projection par voie humide	- Composition uniforme de la couche projetée - Pas de rebondissement violent. - Pas de production de poussières.	- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire. - Compactage faible. - Nécessité d'accélérateurs de prise.

3. Etude comparative (Ragréage avec passivant v/s Béton projeté) : [72]

Tableau 4.2 : Tableau comparatif (Ragréage / Béton projeté) **[72].**

	Remplacement du béton par ragréage avec passivant	**Remplacement du béton par béton projeté**
Avantages	- Petites destructions localisées de béton, pas de risque de déstabilisation de la structure.	- Mise en place du mortier de réparation plus rapide -Béton moins poreux, donc moins sensible aux

	Adapté aux petites surfaces	chlorures. Adapté aux grandes surfaces.
Inconvénients	-Beaucoup de main d'œuvre nécessaire. - Délais plus long. - Nécessite un revêtement imperméabilisant.	-Risque de déstabilisation suite à une enlevée importante du béton. - Surcharges possibles => recalcule de la structure. - Pas adapté aux petites surfaces.
Contraintes phase travaux	- Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée	-Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentué
Durée de vie estimée	- Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. - Limité par rapport à la présence de chlorures. - Améliorée si protection Complémentaire	- Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. - Limité par rapport à la présence de chlorures. Améliorée si protection complémentaire.

3. Tissus de fibres 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.

3.1.Matériaux :

Le renforcement par des PRF-carbones peut être appliqué sur différents types de structures tels que le béton armé, le bois, les structures métalliques.

Tableau 4.3 : Comparatif de la fibre de carbone avec l'acier **[72].**

Propriétés	Unité	Fibre de Carbone		Aciers	
		Torayca H.R. T 300/T 300J/T 700SC	*Composites carbone*	*E 235*	*HR*
Densité	-	1.75 à 1.80	1.53	7.85	7.85
Propriétés mécaniques (sens longitudial)					
Traction					
Contrainte de rupture	Mpa	3530 à 4900	1760 à >2500	315	1860
Module	Gpa	230	125 à 165	210	210
Limite d'elasticité	Mpa	3530 à 4900	1760 à >2500	235	1600
Allongement à la rupture	%	1.5 à 2.1	1.1 à 1.9	23	3 à 7
Compression					
Contrainte de rupture	Mpa	-	1370 à 1570	315	1860
Module	Gpa	-	125 à 165	210	210
Propriétés mécaniques (sens transversal					
Traction					
Contrainte de rupture	Mpa	-	80	315	-
Module	Gpa	-	7.8 à 8.8	210	-
Limite d'elasticité	Mpa	-	65 à 80	235	-
Allongement à la rupture	%	-	0.9 à 1.1	23	-

Le tableau suivant montre les différentes propriétés mécaniques et physiques des fibres de carbone et des aciers usuelles.

Les PRF sont légers, non corrosif, et présentent une résistance élevée à la traction. L'intérêt de leur utilisation se trouve dans : **[73].**

- 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 **[73].**

Les principaux inconvénients des PRF sont les suivants :

- Une anisotropie marquée.
- Un comportement fragile à la rupture.
- Un prix élevé comparé à l'acier.

3.2.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. Laforce 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.

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.



Figure 4.9 : Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone.

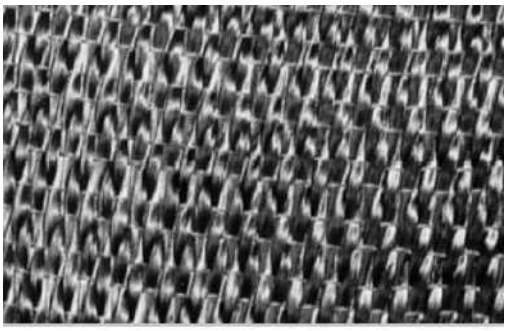


Figure 4.10 : Tissus de fibre de carbone.

4.4. Cas de réparation : [73]

4.4.1. Réparation du béton due a la carbonatation :

L'armature est le point faible du béton armé. En effet, elle met en péril sa pérennité. La corrosion des parties métalliques constitue un danger potentiel pour la stabilité et la conservation des bâtiments. Ce phénomène se traduit par l'apparition de différentes altérations en surface extérieure (fissures, taches de rouille, épaufrures…) **[73].**

1. Technique de réparation (carbonatation) :

Après avoir élaboré un diagnostic adéquat la réparation peut débuter. Le pourtour de la surface à réparer devra comporter des arêtes franches (meule) pour la propreté de la réparation. Les zones de béton dégradées doivent être enlevées pour retrouver la surface saine du béton. Des marteaux piqueurs et/ou l'hydro-démolition sont habituellement employés **[73].**



Figure 4.11 : Technique De Réparation (Carbonatation).

2. Le traitement des armatures :

Après l'enlèvement des parties friables (toutes les parties non adhérentes) et le dégagement des armatures (manuellement ou mécaniquement), les opérations de brossage et de grattage pour éliminer la rouille peuvent s'opérer. Un inhibiteur de rouille est possible et peut être appliqué. En cas de diminution sensible de la section des aciers, il y aura lieu

de renforcer ou de remplacer. L'épaisseur de recouvrement minimale des armatures devra être respectée dans tous les cas car celle-ci est un facteur important pour sa protection **[73].**



Figure 4.12 : Traitement Des Armatures.

3. La réparation du béton :

Après le traitement des armatures nous pouvons appliquer le béton de réparation. Le type de béton nécessaire est choisi soigneusement en fonction du caractère de réparation désirée. Le produit de réparation choisi sera appliqué une fois les surfaces bien nettoyées. Une application du mortier par couches successives de 5 à 50 mm maximum doit être réalisée en le comprimant fortement à l'aide d'une truelle. Il est important de bien damer le mortier autour des barres de l'armature afin d'éviter des inclusions d'air **[73].**



Figure 4.13 : Réparation Du Béton.

4. La Finition :

Possibilité d'appliquer une peinture définitive avec propriété de protection du béton contre la carbonatation et/ou talochage traditionnel des parties réparées.

La qualité finale et la pérennité des travaux de réparation sont conditionnées par le soin apporté à la réparation des supports ainsi qu'à la qualité de mise en œuvre des produits.

D'une manière générale, il est indispensable de se reporter à la réglementation et aux normes en vigueur, ainsi qu'aux spécifications techniques contenues dans les fiches techniques **[73].**



Figure 4.14 : La Finition de réparation.

4.4.2. Réparation des désordres superficiels :

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- Une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution.
- Le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion la reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel où
  mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton.
- La mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :

- Produits et systèmes à base de liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères
- Produits et systèmes à base de résines synthétiques.
- Produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques.

Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement **[73].**

1. Traitement des fissures :

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration :
Ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes…), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives…), tracé, géométrie, exposition aux

intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes…), présence d'eau libre ou sous pression… de l'état et du type de support et des délais imposé pour la remise en service de l'ouvrage.

1.1. Injection : Elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est au moins comprise entre 0.1 et 0.2 mm

L'injection par un produit souple per met son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques.

L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

1.2. Cachetage : Il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

1.3. Calfeutrement : Il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple (mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou d'empêcher la pénétration de matières solides, mais sans bloquer les mouvements de la fissure.

1.4. Pontage : Il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée…) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou empêcher la pénétration de matières solides en laissant libres les mouvements de la fissure.

1.5. Protection Généralisée : Ce traitement consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support. Les guides FABEM 2 et FABEM 3 précisent les diverses recommandations pour procéder à la préparation et la réalisation de chaque technique d'injection.

Le choix des produits à utiliser est fonction de l'ouverture des fissures, de la présence éventuelle d'eau et de l'activité des fissures.

Produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques **[73].**

4.5. Protection des ouvrages en béton arme :

Une fois diagnostiqué puis réparé, il est utile de prévoir une protection de l'ouvrage afin de rendre durables les réparations pour éviter une réapparition rapide de nouvelles pathologies semblables **[74].**

Le schéma suivant recense les principales catégories de méthodes existantes :

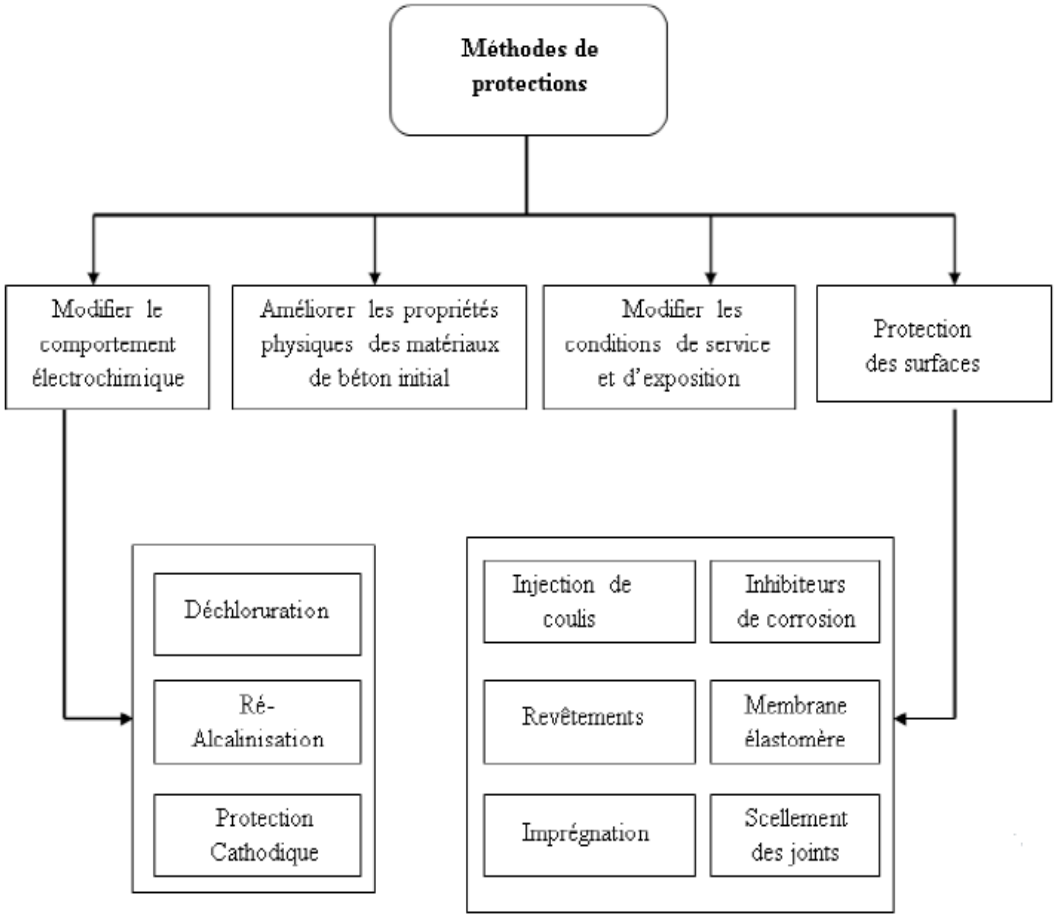


Figure 4.15 : Résumé des méthodes de protections.

Ces méthodes permettent soit de ramener au béton ces caractéristiques mécaniques et chimiques initiales, soit de le protéger contre les attaques structure. Dans le but de rallonger sa durée de vie ainsi qu'augmenter ses capacités à absorber ces attaques et la vieillesse.

Dans un premier temps, le procédé de protection le plus logique sera d'éviter ces problèmes en supprimant les sources de ceux-ci, et en renforçant le matériau faible ; modifier les conditions de service et d'exposition, Améliorer les propriétés physiques des matériaux de réparation ou du béton initial (figure 4.15, les deux premières méthodes). Puisqu'on est en face des ouvrages déjà construits puis réparés, on ne s'intéressera pas dans cette partie à ces méthodes de protection nécessitantes une analyse en stade de pré construction mais on se dirigera vers des procédés de protection des surfaces et à la modification du comportement électrochimique des matériaux, en stade de post-construction et souvent de post réparation **[74].**

4.5.1. Protection des surfaces :

Un grand nombre de méthodes de protection en usage utilisent une barrière qui isole ou modifie l'état de service agressif. L'isolation et modification de l'état de service permet au béton protégé de durer plus longtemps et/ou d'améliorer sa performance. Les barrières appliquées sont une vaste catégorie de revêtements, produits d'étanchéité, membranes, scellement des joints et des techniques d'injection de coulis **[74].**

1. Imprégnation :

C'est le traitement d'une surface de béton avec un matériau qui pénètre ultérieurement dans les pores de la structure. Il y a trois types de base : hydrophobe, de remplissage partiel et de remplissage complet. Chaque type modifie le comportement de la surface y compris la transmission de vapeur d'humidité et l'absorption du liquide.

L'imprégnation des surfaces en béton est une technique courante qui est généralement utilisé pour contrôler le flux de l'humidité entrant et sortant de béton. Les techniques d'imprégnation nécessitent une surface propre capable d'absorber des solutions avec des pores et capillaires ouverts, qui peuvent être obtenus par décapage abrasif, hydro décapage ou grenaillage des surfaces en béton.

L'imperméabilité des surfaces en béton peut être réalisée en revêtant les surfaces des pores avec un composé hydrophobe. Les silanes et siloxanes3 sont les plus communs. Lorsque ces composés sont absorbés dans la structure des pores (mais ne les remplit pas), une réaction chimique se produit entre les scellant et le silicate de la structure en béton. Ils produisent une barrière efficace contre l'infiltration de l'eau et des agents agressifs, tout en permettant à la vapeur d'eau de passer.

Un autre procédé d'imprégnation de la surface de béton comporte des composés qui sont absorbées dans la structure de pores et remplient, ou partiellement remplient, les passages dans le béton. Il existe deux types de matériaux utilisés : d'une part, ceux qui réagissent avec les constituants de la matrice de ciment (tels que le silicate de sodium), et d'autre part, ceux qui réagissent et durcissent seuls (comme l'époxy, méthacrylate et polyester).

Les avantages offerts par ces enduits protecteurs sont les suivants :

- Résistance au gel-dégel augmenté
- Réduction de l'infiltration de l'eau et des produits chimiques agressifs, tels que les Chlorures **[12].**

2. Inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques permettant de réduire L'exposition à la corrosion, même tout le processus de corrosion entièrement **[75].**
En général, le mécanisme de l'inhibiteur est un ou plusieurs des trois qui sont citées Ci-dessous :

1. L'inhibiteur est chimiquement adsorbé sur la surface du métal et formes un film mince de protection à effet inhibiteur ou par combinaison entre les ions d'inhibiteur et de la surface métallique.
2. L'inhibiteur entraîne une formation d'un film de protection d'oxyde de métal
3. L'inhibiteur réagit avec un composant corrosif potentiel présent dans les milieux aqueux et le produit est un complexe **[74].**

Il existe différentes catégories d'inhibiteurs de corrosion. Il est possible de les classifier selon leur mode d'action, à savoir :

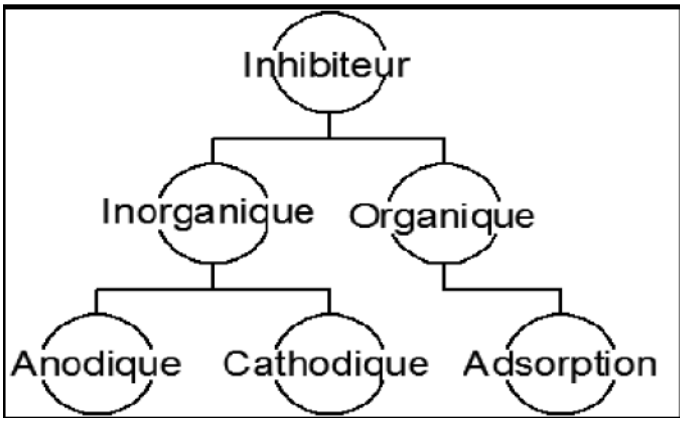


Figure 4.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion.

Les inhibiteurs anodiques réagissent avec les cations métalliques produits sur l'anode, formant généralement, des hydroxydes insolubles qui se déposent sur la surface métallique en tant que film insoluble et imperméable à l'ion métallique. De l'hydrolyse des inhibiteurs se traduit par des ions OH-. Les chromates, nitrates, tungstates, molybdates sont des exemples d'inhibiteurs anodiques.

Les inhibiteurs cathodiques agissent soit en ralentissant la réaction cathodique elle-même ou en formant une barrière de précipités insolubles sur le métal. Ainsi, limitent le contact métallique avec l'environnement, ce qui empêche l'apparition de la réaction de corrosion. Pour cette raison, l'inhibiteur cathodique est indépendant de la concentration, par conséquent, ils sont beaucoup plus sûrs que l'inhibiteur anodique.

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs, agissent comme cathodiques, anodiques ou comme inhibiteurs cathodiques et anodiques en même temps. Néanmoins,

d'une manière générale, agissent par l'intermédiaire d'un processus d'adsorption de surface, désignée comme une filmogène. Ces inhibiteurs accumulent un film protecteur hydrophobe par adsorption des molécules sur la surface métallique, ce qui fournit une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte. Ils doivent être solubles ou dispersibles dans le milieu environnant le métal **[74].**

3. Les Revêtements :

Les revêtements protecteurs de béton comprennent une grande variété de produits chimiques. Des formulations sont disponibles pour répondre à diverses conditions d'exposition et de services. Pour développer une spécification de la méthode et du matériel, les étapes suivantes doivent être suivies :

1. Déterminer les objectifs de protection
2. Déterminer les conditions de service et d'exposition
3. Déterminer l'environnement d'installation
4. Déterminer la gamme de conditions exigées par les matériaux choisis
5. Déterminer tout traitement de fissure requise
6. Déterminer les méthodes d'assurance qualité pour la préparation de surface, adhérence,
   épaisseur et qualité des matériaux.

Il est important que ces matériaux aient une élasticité suffisante pour résister aux fissures.

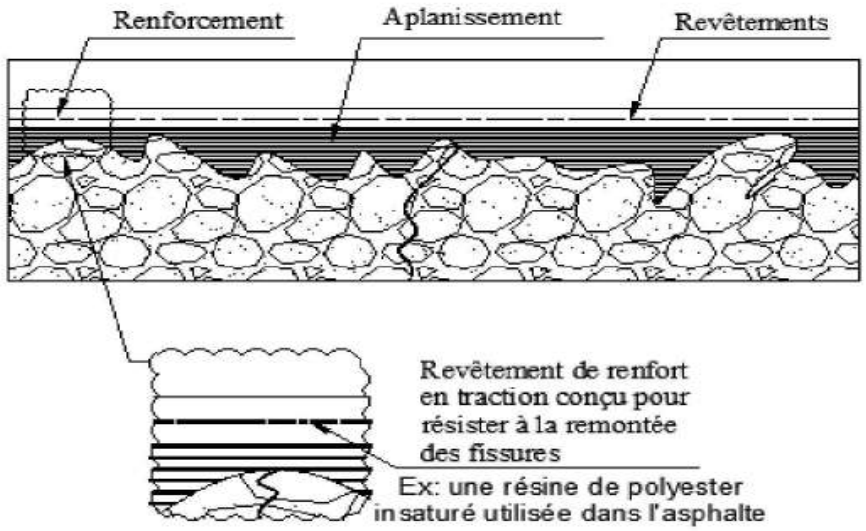


Figure 4.17 : exemple de revêtement des surfaces.

Les méthodes d'application de ces revêtements sont définies par le DTU 42.1. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique) **[74].**

4. Membrane élastomères :

Les membranes élastomères sont des liquides thermodurcissables, liquides de polymère durci ou de matériaux effectués. Leur fonction principale est de minimiser l'absorption de liquide par le béton. Les membranes élastomères diffèrent des revêtements en raison de la capacité de la membrane à se déplacer et de fléchir sans rupture. Leurs applications typiques comprennent: les ponts de circulation, toitures terrasses, et étanchéité sous-sol.

Les membranes élastomères sont conçues pour protéger le béton contre l'intrusion de liquide dans ou à travers les fissures de béton, et, dans certains cas, les joints. Les membranes typiques utilisées sont des matériaux en feuille ou liquides.
La capacité d'un matériau ou d'un système particulier à s'allongé dans les conditions de service et d'exposition prévue est une fonction de :

1. Capacité d'allongement.
2. Épaisseur de la membrane.

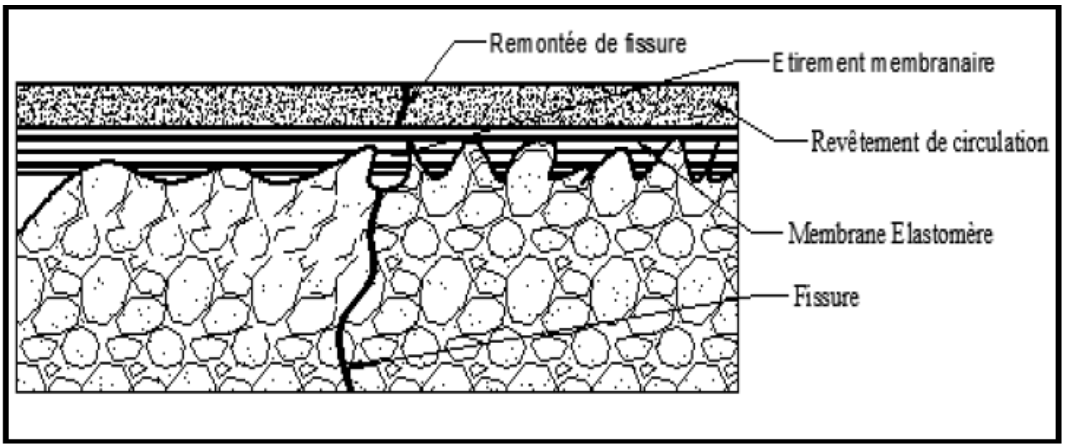


Figure 4.18 : application de membrane élastomère.

4.5.2. Protection par méthodes électrochimiques :

Cette partie présente les principales techniques électrochimiques utilisées pour réduire la corrosion dans les structures de béton armé : Protection cathodique (PC), Déchlorurassions (DC), Ré-alcalinisation (RA).

Toutes les méthodes de maintenance électrochimiques ont en générale le même principe et méthode d'application pratique. Les principales différences sont la quantité de courant circulant à travers le béton et la durée du traitement.

Par l'intermédiaire d'un conducteur externe, dite anode ; un courant continu est dirigé à travers le béton de l'armature qui est ainsi amenée à agir en tant que cathode dans une cellule électrochimique. Le résultat final de la circulation du courant est d'arrêter la

corrosion par répassivassions des armatures par polarisation de l'armature à un potentiel plus négatif (PC), ou en enlevant les ions agressifs (DC), ou en rétablissant l'alcalinité de la solution

Interstitielle (RA) **[74].**

1. **Protection cathodique :**

La protection cathodique est basée sur le changement du potentiel de l'acier à des valeurs plus négatives, pour que le métal agit comme cathode et ainsi de réduire le courant de corrosion à des valeurs négligeables.



Figure 4.19 : Raccordement de la protection cathodique.

1.1. Avantage :

Dans l'application de la protection cathodique, deux méthodes principales sont utilisées, à Savoir :

- anodes sacrificielles : un métal très actif (anode) est relié à la barre d'armature et placé dans le même électrolyte. L'anode polarise le métal vers des valeurs cathodiques.
- courant imposé : une anode inerte est raccordée à l'armature et un courant continu est appliqué pour décaler le potentiel vers des valeurs cathodiques

Les procédés cathodiques produisent une alcalinité sur la surface des armatures. A l'intérieur du béton, le courant est transporté par les ions proportionnellement à leur concentration. Les ions positifs se déplacent dans la même direction que le courant (de l'anode à la cathode), et les ions négatifs dans la direction opposée. Ainsi dans un béton contaminé par des chlorures, la circulation du courant présente une réduction de la teneur en chlorure à la surface des armatures ou une réduction de la pénétration de chlorure dans le béton.

Ces effets sont avantageux dans le sens où ils favorisent une augmentation du rapport OH^- / Cl^- et favorisent ainsi les phénomènes de passivation.

C'est pourquoi cette méthode est particulièrement adaptée lorsque la corrosion est causée par la contamination de chlorure **[74].**

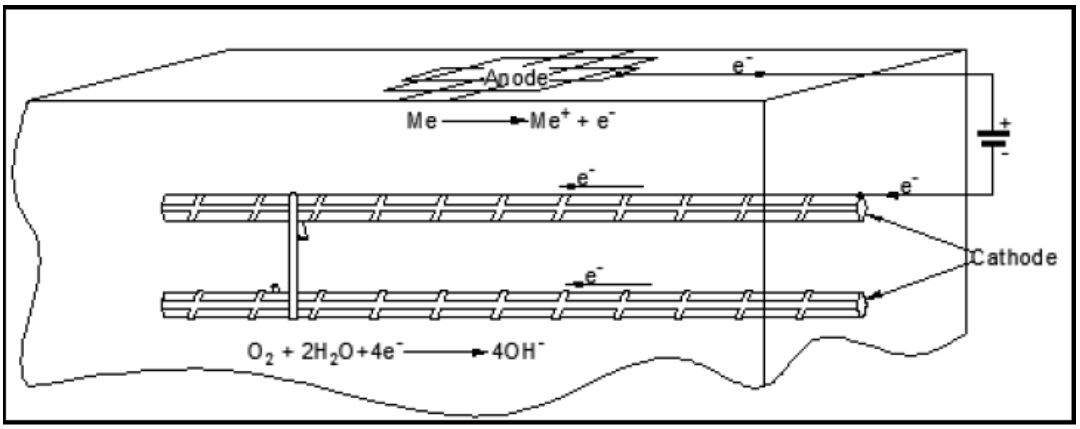


Figure 4.20 : La protection cathodique au moyen d'anodes sacrificielles ou à courant imposé.

1.2.Désavantage :

- La perte d'adhérence entre le béton et renforts :

À des potentiels très négatifs, lorsque des densités de courant élevées sont appliquées, une perte d'adhérence entre les barres d'armature et le béton peut se produire. De nombreuses incertitudes demeurent quant à ce phénomène. Pour une polarisation à long terme, un potentiel limite inférieure est indiquée (-1,1 V par rapport à l'électrode au calomel saturée10).

- Fragilisation par l'hydrogène :

L'effet potentiellement néfaste le plus important est la fragilisation de l'acier par l'hydrogène atomique généré en réaction cathodique. Certains types d'aciers à haute résistance utilisés dans la construction précontrainte peuvent être soumis à la fragilisation par l'hydrogène si leur potentiel a des valeurs à laquelle le dégagement d'hydrogène peut avoir lieu. Dans les milieux alcalins (pH> l2), avec renforcement protection cathodique, le dégagement d'hydrogène ne peut se produire à potentiel plus négatif que -950 mV environ (par rapport à ECS). Par conséquent, pour éviter le risque de fragilisation par l'hydrogène de l'acier sensibles qu'il convient de fixer un potentiel de limite inférieure de -900 mV (par rapport à ECS).

2. Déchloruration :

La déchloruration est un procédé simple de sorte que les ions chlorure sont éliminés du béton contaminé par migration. Une anode noyée dans un support d'électrolyte, solution aqueuse, est fixé à la surface du béton. L'anode est de préférence un maillage de fil de titane ou une maille d'acier d'armature. L'anode et l'acier d'armature dans le béton

(cathode) sont connectés aux deux bornes d'un courant continu tel que l'anode est chargée positivement et l'armature est négative **[74].**



Figure 4.21: Traitement électrochimique en cours.

2.1. Avantage :

Les ions chlorure étant ions négatifs migrent vers l'électrode positive, l'anode. Comme c'est externe au béton, les ions chlorure quittent le béton et se concentrent autour de l'anode. Ainsi, la teneur en chlorures du béton est réduite, en particulier sur et autour de l'acier d'armature chargé négativement où le béton à toutes fins pratiques devient libre de chlorures.

En même temps, la production électrolytique d'ions hydroxyle au niveau de la surface des armatures résulte en un pH élevé généré autour de l'acier. Par conséquent, lorsque le processus est terminé et l'installation est retiré, l'acier d'armature sera libre des chlorures et le béton sera fortement alcalin. Il en résulte une repassivation de l'acier d'armature.

La déchloruration peut être adaptée pour les structures ayant une valeur architecturale telles que les monuments, puisque la surface du béton reste inchangée après le traitement **[74].**

2.2. Désavantage :

Lors de l'extraction de chlorure, des ions hydroxyle sont formés autour de l'acier d'armature, en augmentant localement le pH et les ions de sodium et de potassium s'enrichissent dans l'acier. Ces changements pourraient stimuler une alcali-réaction. Pour l'application pratique de la déchloruration sur les structures avec des granulats potentiellement sensibles, il est recommandé d'évaluer la réactivité potentielle de l'agrégat en considérant sa source géologique et d'étudier chimiquement le béton. Si une expansion nuisible se trouve dans les tests représentatifs, la déchloruration ne doit pas être recommandée.

3. Ré-Alcalinisation :

La ré-alcalinisation est une méthode pour arrêter la corrosion des armatures induite par carbonatation. Le pH du béton autour de l'acier augmente, et la passivation de la solution interstitielle du béton est restaurée.

La technique consiste à faire passer un courant à travers le béton à l'armature par un treillis appliqué à l'extérieur de l'anode qui est attaché à la surface du béton et noyé dans un électrolyte **[74].**

Dans l'application classique, une pâte de cellulose pulvérisée avec une solution molaire de carbonate de sodium est utilisée comme électrolyte.

L'électrode extérieure (anode) et l'armature agissant comme cathode à l'intérieur sont connectées à une source de courant continu. Pendant le traitement, l'électrolyte est transporté dans le béton carbonaté. Le mécanisme de transport dominant peut varier, mais l'électro-osmose et la migration des ions sont les deux principaux contributeurs. Simultanément,
L'électrolyse à la surface de l'acier produit un environnement très alcalin **[74].**

3.1. Avantage :

La ré-alcalinisation du béton est un traitement électrochimique non permanent, donc, le traitement se termine après l-2 semaines appliquant un courant de l'ordre de 0,8 à 2 A/m^2. Après le traitement, l'anode doit être enlevée, et la surface du béton ne se modifie pas. C'est pourquoi la ré-alcalinisation est particulièrement adapté pour les structures avec des valeurs architecturales telles que les monuments.

3.2. Désavantage :

- Alcali-réaction

La teneur accrue en ions alcalins et la production d'ions hydroxyles puissent théoriquement causer une Alcali-réaction accélérée pour un béton avec granulats réactifs. D'autre part il a été conclu par les experts que le béton alcalinisé s'étend comme le béton de référence, puisque le traitement n'a pas augmenté la concentration d'hydroxyle jusqu'au seuil d'expansion.

- La perte d'adhérence entre le béton et renforts :

Le courant circulant pendant la ré-alcalinisation augmente les concentrations des ions alcalins et hydroxyles dans l'eau des pores à la l'interface béton/armatures. Cela pourrait théoriquement modifier la structure des pores et la force d'adhérence. En revanche, la charge totale circulante est beaucoup plus faible que celle de la Déchloruration (de l'ordre

de 100 à 200 Ah/m2) ce qui est beaucoup plus faible que celles rapportées pour provoquer une perte d'adhérence **[12].**

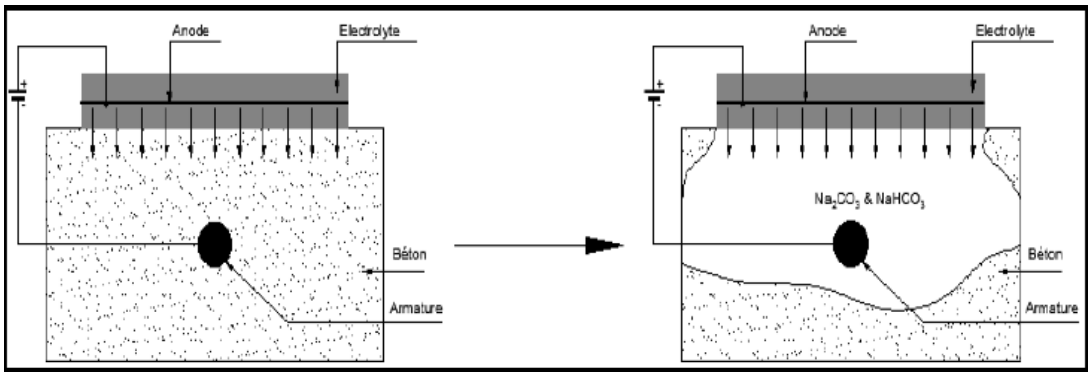


Figure 4.22 : Avant et Après Ré-Alcalinisation.

Conclusion

On a vu les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé, mais n'importe quelle 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.

Le béton armé est un des matériaux de construction les plus couramment utilisés. Toutefois, en raison de changements dans les spécifications de conception, le vieillissement, les conditions environnantes, etc. - il y a un besoin de procédures pour la réparation des superstructures et des infrastructures en béton (armé ou précontraint). Ainsi, Plusieurs algorithmes peuvent être suivis, en ce qui concerne les méthodes de diagnostiques, les procédés de réparation et les techniques de protection. Après tout, on cherche toujours à redonner à la structure sa géométrie et sa puissance à reprendre les efforts qui lui sont appliqués.

Les différents algorithmes possibles pour la réhabilitation d'ouvrages en béton armé ne sont pas tous encore codifiées.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Les constructions en béton armé à travers le temps souffrent de plusieurs phénomènes de dégradations plus ou moins prononcés qui sont liés d'une part aux techniques et aux conditions de mise en œuvre, et au non-respect de mise en œuvre du béton sur chantier (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants…). Et d'autre part, à d'autres facteurs comme les conditions de milieu extérieur ainsi que l'exploitation de l'ouvrage et son entretien.

Les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maitrisés tous, donc la notion de la structure parfaitement durable, c'est une notion irréalisable, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recourt à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de vie de l'ouvrage. A cet effet il faut avoir plus de compréhension sur les mécanismes de dégradation.

Cette étude nous a permis de voir les spécificités des différentes dégradations qui affectent les bétons anciens des ouvrages. Nous avons aussi présenté quelques causes et conséquences de dégradation, les moyens de les identifiés et les méthodes de réparation ou de renforcement des bétons anciens afin de les maintenir dans le temps et dans l'espace.

RECOMMANDATION :

La liste des pathologies que j'ai cité dans mon mémoire n'est pas exhaustive est ne concerne que le matériau béton, peut-être qu'il y aurait d'autres.

Pour ce là je recommande :

1. D'élargir la liste dans la mesure du possible
2. De s'intéresser aux nouvelles pathologies et de ne pas les négligées.
3. De trouver les nouvelles méthodes pour les diagnostiquer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] cour pathologie 1er année master

[2] CTC FORMATION BETON FEVRIER MARS 2019 SESSION 1 VERSION PARTICIPANT

[3] HOLCIM.be/Fr/guide-couse-et-prévention des Altération du béton

[4] FR. Wikipédia

[5] https://www.geu maison.com /ségrégation de béton

[6] Pavex.be/fissuration-béton/

[7] http://opengroupe.fr/expertise-fissures/expertise-fissures-maison/les-differents-types-de-fissures-en-facade/

[8] https://ravalement-de-facade.ooreka.fr/astuce/voir/659361/microfissure

[9] http://doc.lerm.fr/wp-contrit/2013/08/carbonatation_carde.pdf

[10] https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieux-fortement-agressifs40.html

[11] -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-saffaisse-
a121371746

[12] -MATIERE (Le retrait des bétons) [Christophe Carde, directeur technique du LERM] Septembre/Octobre 2006
http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/retrait-carde.pdf

[13] -Epaufrure
http://www.le-coin-des-bricoleurs.com/le-wiki
dubricoleur/Epaufrure,_%C3%A9caillage,_d%C3%A9faut_de_surf Ace

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

[15] -[HAL] Ressuage des bétons hydrauliques (Laurent Josserand. Ressuage des bétons hydrauliques. Mechanics. Ecole des Ponts paristech,2002. French.)
https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjx-
IK33eLMAhXEchQKHZOvCXMQFggaMAA&url=https%3A%2F%2Ftel.archivesouvertes.

fr%2Ftel00005679%2Fdocument&usg=AFQjCNG1QjP3kLyH_6FXLYa2itSl5PvFWA&sig2=wJP9K
W_qg7HsAKBeGixjig&bvm=bv.122129774,d.d24&cad=rja
[17]https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjP14m_nPjpAhVDzBoKHTMuCHMQFjAFegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Funiv.encyeducation.com%2Fuploads%2F1%2F3%2F1%2F0%2F13102001%2Findpet2an_corrosion-cours_bensaada.pdf&usg=AOvVaw22NyqfhPMRpCTod6ApH1ob
[18] Sara CHAKRI : « Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique »décembre 2015, PP.13-20
[19] https://www.cerib.com/wp-content/uploads/2017/05/276-e-corrosion-armatures-interet-inhibiteur-corrosion.pdf
[20] https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02091162v1/document
Hela Ben Mansour : « Etude du comportement à la corrosion des armatures tendues dans le béton contaminé par des ions chlorure. Effet anticorrosif d'un inhibiteur à base de phosphates » 28/11/2018,PP15-16
[21] https://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme5.html
[22] http://www.surfatec.org/facteurs-de-la-corrosion/
[23] https://betonabq.org/wp-content/uploads/techno-beton/tbnumero3_2014_v01.pdf
[24] https://betonabq.org/wp-content/uploads/techno-beton/TBnum%C3%A9ro4.pdf
[25] https://fr.slideshare.net/foufaroufa1/les-dfauts-mcanique-dans-le-bton-cas-de-vibration?from_action=save date 5 juin 2018
[26] Grégoire Akongo Ndzana & Samuel Tchoumi, « Memoire Online - Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures » [archive], sur www.memoireonline.com, 2007 (consulté le 10 septembre 2015).
↑ Frédérique Harrus, « Cancer du béton : le ver est dans le fruit » [archive], sur www.geopolis.francetvinfo.fr, 14 juillet 2014 (consulté le 10 septembre 2015).
[27] https://fr.slideshare.net/BriMel0236/tremblement-de-terre-3872065?qid=982cfb07-fca1-40eb-9632-cb69ea97d0df&v=&b=&from_search=3
[28] ALKALI-AGGREGATE REACTIVITY (AAR) FACTS BOOK
https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif13019.pdf
[29] http://thesis.univ-biskra.dz/1107/3/Chapitre%2001.pdf date 2008

[30] https://www.roadsbridges.com/degradation-concrete-structures-influence-aggressive-chemicals

[31] https://www.experts-cebtpi.org/uploads/event/file/16/Pathologieb_ton07112016.pdf date 07/11/2016

[32] Étude expérimentale de la lixiviation du béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167695/document

[33] Durabilité des ouvrages en béton https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G12.pdf

[34] http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/13187/L%E2%80%99IMPACT%20DE%20LA%20CORROSION%20%20DES%20ARMATURES%20SUR%20LES%20DEGRADATIONS%20DU%20BETON%20ARME%20%28Ghobrini.Cheikh%29%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y date 2018

[35] BAROGHEL-BOUNY (V.), ARNAUD (S.), HENRY (D.), CARCASSÈS (M.) et QUÉNARD (D.). – Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentationpour le XXIe siècle. III - Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettesconservées en laboratoire. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No 241, pp 13-59, nov.-déc. 2002

[36] 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.

[37] https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/20726/1/26091.pdf date 2009

[38] Neville, A.M., Properties of concrete, Fourth edition, Pearson Education, 2004, 844 pages

[39] https://www.memoireonline.com/10/08/1579/rehabilitation-ouvrages-beton-arme-degrades-corrosion-armatures.html

[40] http://thesis.univ-biskra.dz/1107/3/Chapitre%2001.pdf date 2008

[41] S. HAOUARA et A. GUETTALA : «Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton arme dans la région de Biskra », Courrier du Savoir – N°06, juin 2005, pp.109-115.

[42] Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé https://www.memoireonline.com

[43] http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/329/308

[44] (réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil))
Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 8
[45] Chérif DERARDJA : « Types, causes et remèdes des dégradations des constructions existantes » 2004, pp.63
[46] https://fr.slideshare.net/foufaroufa1/les-dfauts-mcanique-dans-le-bton-cas-de-vibration
[47] Hamlaoui Salim : « Maintenance, entretien et réparation des ponts », 09/12/2012, pp.32
[48] Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives
[49] Maizi Ibtissam, Benjoudi Mouslam, mémoire de master II « réhabilitation de structures en béton armé » , université 08 Mai 1945 Guelma , Année 2013.
[50]Documents scientifiques et techniques « Réhabilitation du béton armé dégradé par la Corrosion », Novembre 2003.
[51]Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle
[52] Clément « Construire des Ouvrages d'Art en Béton - les contrôles à postériori », COTITA, 2011.
[53] Mémoire de Master Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie « Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives »
[54] Etude de l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilité des ouvrages en béton arme
[55] http://www.memoireonline.com/07/12/6023/Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme.html
[56]http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme10.html
[57] http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme11.html
[58] Projet de Fin d'Études. Réhabilitation d'ouvrages en béton armé Du diagnostic au confortement (Lorry-Alan MOALIC, élève ingénieur de 5ème année)
[59] KHOBIZI Sena« Réhabilitation des structures en béton arme », Juin 2017, Pp 33-34
[60] https://www.memoireonline.com/07/12/6023/Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme.html#_Toc328237967

[61] MAHFOUDI BRAHIM : « Système expert pour le diagnostic des structures bâtiment », mémoire magister, Ecole National Polyethnique 2006.

[62] SEBSADJI.S, « Les dégradations dans les ouvrages en béton armé : causes et Prévention », Colloque CREDIMAT, Département de Génie Civil, Université des sciences et de la technologie, Mohammed BOUDIAF, Oran, Décembre 2005.

[63] Processus des réparations minces des ouvrages en béton https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi0iuOjrJTsAhUuzYUKHdiiCQcQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fthesis.univbiskra.dz%2F2429%2F3%2Fchapitre%252001.pdf&usg=AOvVaw2TkVCr8LtVK0b9OCPt1RUZ

[64] SIDNEY M. JOHNSON, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969. https://www.worldcat.org/title/degradation-entretien-et-reparation-des-ouvrages-du-genie-civil-trad-par-michel-londez/oclc/3015935

[65] BERNARD BLACHE, JEAN-DANIEL MERLET," Comment réparer le béton armé", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Avril 1993, (25-32) https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj8g-P0rZTsAhVIyhoKHedUCJUQFjAAegQIBhAC&url=http%3A%2F%2Fdspace.univ-usto.dz%2Fbitstream%2F123456789%2F184%2F1%2FRehabilitation_structures.pdf&usg=AOvVaw2nC4iZB1e83rlPUQ1dVy3B

[66] ROLAND CRESSON, " Revêtements organiques de façade", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et de Travaux Public N° 525, Société d'Editions du Bâtiment et des Travaux Public, Juillet- Août 1994, (13- 32).

[67] ROLAND CRESSON, " Peintures et revêtements organiques appliquées en façade", Encyclopédie du bâtiment, Tome 3, Editions WEKA, 1997, (1-3101, 10-3101)

[68] Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives

[69] Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé.

[70] Processus des réparations minces des ouvrages en béton https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi0iuOjrJTsAhUuzYUKHdiiCQcQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fthesis.univbiskra.dz%2F2429%2F3%2Fchapitre%252001.pdf&usg=AOvVaw2TkVCr8LtVK0b9OCPt1RUZ

[71] Hamlaoui Salim « Maintenance, entretien et réparation des ponts » 09/12/2012, pp 87-88 mémoire Magistère.

[72] Houmeur Mouaadh Et-Tayib , Lammari Yacine «Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives » 2018,PP 82-84
[73] Bouhadjeb Kada « Synthèse bibliographique sur les principales dégradations affectant les constructions en béton armé »,2019, PP 62
[74] Joseph Abou Zeid « Méthode de réparation et de protection des ouvrages en béton armée» Université libanaise ISAE- Cnam liban
[75] réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note D'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007. Page 8