UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des sciences et de technologie

Département de génie de la matière

Filière génie civil

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master en génie civil

Option : structure

THEME

Les factures d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé

région Médéa

Préparé par :

RAHOU Amine

BOUCHIBANE Mohamed

Dirigé par :

-Mr. ZEMIR Ismail Promoteur

-GUENDOUZ .M Co- Promoteur

Juin 2015

Remerciement

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

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

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

Notre formation.

Nous remercions également monsieur GUENDOUZ.M pour les diverses discussions et conseils enrichissants.

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

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

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

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mes très chères parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consentis tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères et sœurs

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

A tous mes Amis

A toute la promotion de génie civil 2014/2015.

AMINE.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mes très chères parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consentis tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères et sœurs

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

A tous mes Amis

A toute la promotion de génie civil 2014/2015.

MOHAMED.

ملخص:

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

Résumé :

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

Abstract:

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

ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

- Liste des tableaux :

Tableau1 :1 Exemple d'un tableau qui recense les pathologies rencontrées lord d'un diagnostic ……32

Tableau1-2 : l'auscultation sonique des bétons…….……37

Tablue2.1 : Relations de cause(s) à effet(s)……..59

Tableau 2.2 : Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures et indiquant l'utilité de l'armature passive pour en limiter les conséquences……71

Tableau 2.3: Les causes générales de fissuration précoce, mécanismes, physiques et Paramètres impliqués pour les bétons courants……74

Tableau 3-1: Ouvrages à usage d'habitation dégradés dans la région de Médéa 95

Histogramme 3-1: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages à usage d'habitation……..106

Tableau 3-2: Ouvrages à usage d'équipement dégradés dans la région de Médéa…….……106

Histogramme 3-2: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'équipement...106

Tableau 3-3: Ouvrages d'art dégradés dans la région de Médéa …….……..120

Histogramme 3-3: Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'art…….127

- Liste des figures :

Figure 1-1 Schéma indiquant la fabrication du ciment et la constitution du béton…….…4

Figure1.2: Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton……..….13

Figure1.3: Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm…….……..13

Figure1.4: Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm…….13

Figure 1-5: Phénomène de carbonatation……..15

Figure 1-6: Phénomène de carbonatation…….….16

Figure 1-7 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton ……19

Figure 1-8: Processus de corrosion des armatures……...20

Figure 1-9 : Processus de corrosion……..…22

Figure1-10: Schéma du choix d'investigation ……...……..……29

Figure1-11 : Schéma des investigations non destructives…….……..……31

Figure1-12 : Mesure d'une fissure……..……..…….……34

Figure1-13 : Réponse en fonction de la densité d'armature……..……...35

Figure1-14 : Principe de la détection linéaire …….…….35

Figure1-15: le principe de la détection par fenêtre ……..……36

Figure 1-16: Mesure par transparence……...……37

Figure 1-17: Scléromètre……..……38

Figure 1-18: Schéma des investigations destructives……...……38

Figure 1-19: Carotte prélevée ……...……...39

Figure 1-20: Prélèvement d'aciers ……...…40

Figure 1-21: Principe du potentiel de corrosion ……..41

Figure 1-22: Cartographie du potentiel de corrosion……...…….42

Figure 1-23: Mesure du potentiel de corrosion…….……42

Figure 1-24- : Graphique enrobage-carbonatation…….……...43

Figure 1-25 : courbe Vt…….44

Figure 1-26 : Carbonatation sur carotte……..……..44

Figure2.1 : Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation……...……51

Figure2.2 : glissement de terrain provoquant effondrement voile et poteau vide sanitaire…..53

Figure 2.3 : Glissement rotationnel simple……...54

Figure 2.4 : Glissements successifs emboîtés…….……..55

Figure 2.5 : Coulée de boue……..55

Figure2.6 : Ecroulement……56

Figure2.7 : Exemple de fluage……..56

Figure 2.8: Réseau de fissures de surface……63

Figure 2.9: Réduction de la zone de compression et redistribution des contraintes de bétons aux aciers……...64

Figure 2.10 : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis silice dans un mur de soutènement……65

Figure 2.11: Causes de fissuration du béton frais et du béton durci…….……69

Figure 2.12 : Les quatre principales sortes de fissures précoces susceptibles d'affecter un ouvrage en béton……...……72

Figures 2-13 : Mécanismes de désintégration……..…….....78

Figure 2-14- Classification des types de désordres dans le béton…….79

Figure 2.15 : Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques (DEP : Dégradation en Eau Pure, ASSO : Attaque au Sulfate de Sodium Na2SO4)……81

Figure 2-16 : Granulat fissuré par une réaction alcalis-silice……..…….84

Figure 2-17 : Précipité de calcite suite à un lessivage du béton……....87

Figure 2-18 : Étapes de formation des cristaux de glace dans un matériau poreux……..…88

Figure 2-19 : Volumes relatifs de l'acier et de ses produits de corrosion…….....90

Photo 3-1 : Tassement de la structure du bâtiment ……..96

Photo 3-2 : Tassement de la structure du bâtiment…….……..97

Photo 3-3 : Glissement des terres ……...……..97

Photo 3-4 : Glissement des terres……..98

Photo 3-5 : Réseaux d’assainissement défectueux ……...…98

Photos3-6 : vue à l’intérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries…….…99

Photo 3-7 : Fissures apparentes……...100

Photo 3-8 : Fissures apparentes…….…..…100

Photo 3-9 : Fissure au niveau de la poutre…….……101

Photo 3-10 : Fissures apparentes au niveau de la poutre……..……..101

Photo 3-11 : Mauvaise mise en œuvre du béton au niveau du nœud…….…102

Photos3-12 : Armatures corrodées…….…….102

Photos3-13: Eclatement d'enrobage et armatures corrodées…….…….103

Photos 3-14: Fissures au droit des dalles pleines…….……..103

Photos3-15: Affaissement du carrelage…….….104

Photos3-16 : Dégradation et basculement des murs de soutènements……...….104

Photos3-17 : Fissures diagonales au droit des murs intérieurs et façades……...……105

Photos3-18 : Infiltration des eaux sous plafonds……105

Photo 3-19 : torsion des profilés……..…109

Photo 3-20 : Eclatement des interactions béton-charpente…….110

Photo3-21: Infiltration des eaux……..110

Photo3-22 : Enrobage des aciers détérioré……..111

Photo3-23 : Armatures de la poutre complètement corrodées……..……..111

Photo3-24 : Ségrégation du béton (Armature apparente)……...…112

Photo3-25 : Mauvaise reprise de bétonnage……...…112

Photo3-26 : Concentration du chlore sur les parois du bassin……113

Photo3-27 : Fissure au niveau du dallage extérieur et mur de clôture……..……..113

Photo3-28 : Eclatement des revêtements……...….114

Photo3-29 : Eclatement de béton……....114

Photos3-30 : Fissures horizontales au niveau des murs extérieur……...…115

Photos 3-31 : Fissures obliques au niveau des murs intérieurs……...115

Photo3-32: Réseau d'évacuation des eaux usées complètement défectueux ……...116

Photos 3-33 : vue à l'intérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries…..….117

Photos 3-34: vue à l'extérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries en pierre……...…117

Photos3-35 : vue à l'extérieur sur les fissures constatées au niveau des éléments structuraux (un amorce-poteaux et chainage partie apparente)……..……118

Photos3-36 : vue sur le basculement entre les deux blocs (mosquée et l'extension)……..118

Photo3-37 : Renversement du mur…….…….119

Photo 3-38 : Ouvrage d'art - pont OUED BOUHENECHE……..122

Photo 3-39 : Ouvrage d'art - pont OUED CHAIR…….122

Photo 3-40 : Ouvrage d'art - pont OUED EL MALAH……...…..123

Photo 3-41 : Ouvrage d'art - pont OUED LAHRECHE…….123

Photo 3-42 : Ouvrage d'art- pont OUED TARCHA……..…….124

Photo 3-43 : Ouvrage d'art- pont OUED BOUKMOURI……..…124

Photo 3-44 : Ouvrage d'art - pont OUED ELMALEH REBAIA……...……125

Photo 3-45 : Ouvrage d'art - pont SEGHOUANE……125

Photo 3-46 : Ouvrage d'art - pont OUED ELHAMAME……...……126

Photo 3-47 : Ouvrage d'art - pont OUED ELZABOUDJ…….……..126

Potho4-1 : présentation de l'ouvrage……..……130

Potho4-2. Corrosion des armatures…….……131

Potho4- 3. Piquage du béton……..…….132

Potho4-4.Traitement des armatures corrodées……...…132

Potho4-5. Renforcement des fûts dégradés…….133

Potho4-6 : présentation de l'ouvrage…….…135

Potho4-7 : présentation de l'ouvrage……...……135

Potho4-8 : Caractéristique géométrique de l'ouvrage…….136

Potho4-9 : Caractéristique géométrique du balcon…….…137

Photo4-10 : vue générale du balcon……....137

Photo4-11: La partie dégradée du balcon……...……138

photo4-12 : La zone le plus touché (dégradé)…….138

Photo4-13 : éclatement de béton et armatures apprentis……139

Photo4-14 : Absence d'étanchéité et système d'évacuation permet d'infiltration de l'eau…….140

Photo4-15 : présence de la corrosion de l'armature au-dessous de balcon…….141

Photo4-16 : diminution du diamètre des armatures……141

Photo4-17 : éclatement de béton d'enrobage……..….142

Photo4-18 : éclatement de béton d'enrobage dans différent endroit ……...……...142

Photo4-19 : présence de fissuration au-dessous du balcon……143

Photo4-20 : Ségrégation observée sur les deux poteaux……144

Photo4-21 : Colonisation biologique……..145

Photo4-22 : Lixiviation du béton……...…….145

Photo4-23 : manque d'enrobage……..…147

SOMMAIRE

DEDICACE
REMERCIEMENT
RESUME
LISTE DES ILLUSTRATIONS, TABLEAUX ET GRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1
Synthèse bibliographique

Introduction……...……..3

1. Généralités sur le béton…….……...…… 3

1.1.Historique…….…….3

1.2.Lebéton……...…… .3

2.Acier…….……...….5

3. Définition du béton arme ……..……...……6

4. La durabilité ……...6

4.1. Généralités ……..6

4.2 Introduction à la durabilité ……..….7

4.3 Durabilité et économie ……8

4.4 Béton durable et béton résistant ……...8

5 .La perméabilité ……....9

6. Les pathologies du béton arme: causes et conséquences……...…….…..10

6.1. Les causes physiques de dégradation ……10

6.2. Les causes chimiques de dégradation ……..……..11

6.3. Les autres causes de dégradation des bétons……..……....11

7. Description des pathologies du béton arme…….……...……..12

7.1. La fissuration……...…12

7.2. La carbonatation des bétons……...14

7.3. La corrosion des armatures ……...17

7.3.1. Généralités ……...…….……...17

7.3.2. La corrosion des aciers dans le béton …….……18

7.3.2.1. Présentation générale……...18

7.3.2.2. Processus de la corrosion ……...…….19

7.3.2.3. La dé passivation des armatures …….....21

7.3.2.4. Facteur influents de la corrois……..23

7.3.2.5. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures……...…..24

7.3.2.5.1. L'aspect du parement de l'ouvrage……..…… ...24

7.3.2.5.2. La sécurité vis-à-vis des usagers ……..……25

7.3.2.5.3. La stabilité de l'ouvrage …….……..25

8. Le diagnostic des structures existantes en béton armé…….……25

8.1. Gestion des ouvrages existants …….26

8.1.1. Domaine public……...……26

8.1.2. Domaine privé……...……..26

8.2. Les principales étapes d'un diagnostic…….……..26

9. Réalisation d'un diagnostic……...29

9.1. Choix des investigations…….……...29

9.2. Types d'investigation…….……30

9.2.1. Investigation non destructives ……..30

9.2.1.1. Relevé visuel……..……..31

9.2.1.2. L'analyse du ferraillage ……..34

9.2.1.3. L'auscultation sonique ……36

9.2.1.4. Scléromètre…….……37

9.2.2. Investigation destructives ……...……38

9.2.2.1. Carottage d'éléments en béton armé……..……..39

9.2.2.2. Prélèvements d'aciers ……40

9.2.2.3. Potentiel de corrosion ……..……40

9.2.2.4. Test a la carbonatation …….....42

9.3. Conclusion ……..…..……44

Chapitre2 :
Réhabilitation et les causses de dégradation du béton armé

- 1. Réhabilitation……45

1.2 Introduction……...……..…45

1.3. Notions de réhabilitation …….….45

1.3.1. Définitions générales……...……45

1.3.2. Pas de bonne réhabilitation sans le diagnostic……47

1.3.3. Décider de réhabiliter……..47

1.3.4. Entretenir / réhabiliter / reconstruire…….……..48

1.3.5. Déroulement du processus de réhabilitation…….……..49

- 2. Causes générales des dégradations du béton arme……52

2.1. les causses généraux……...52

2.1.1 Introduction…….....…….52

2.1. 2Tassements……...……....52

2.1.2.1 Tassement uniforme…….……52

2.1.2.2 Tassements différentiels……...…..…52

2.1.3. Mouvements de terrains…….…….53

2.1.3.1 Les glissements……...…..53

2.1.3.1.1 Glissement plan……...……..…..54

2.1.3.1.2 Glissement rotationnel simple…….……..……..54

2.1.3.1.3 Principales causes des glissements……...…….……55

2.1.3.1.4 Les coulées…….……55

2.1.3.1.5 Les écroulements……...…56

2.1.3.1.6 Le fluage……...….…56

2.1.4 Conclusion…….……..……58

- 2.2 Les causses principaux……60

2.2.1Fissure……...……60

2.2.1.1. Introduction……...……...…..60

2.2.1.2 Nature de fissuration en béton arme…….……...……..60

2.2.1.3Différents types de fissuration…….……..61

2.2.1.3.1Fissures induites par les charges externes……..…….……62

2.2.1.3.2 Fissures induites par le retrait et le changement de température ……..64

2.2.1.3.2.1 Fissures de retrait plastique…….……...…66

2.2.1.4 Distinction entre fissuration sous charges et fissuration sous déformations imposées…….……...……68

2.2.1.5 Diverse causes et période d'apparition des fissures……...……...……68

2.2.1.5.1 Les quatre causes générales de fissuration précoce……....……...72

2.2.1.5.1.1 Le ressuage……..……...….72

2.2.1.5.1.2Le retrait plastique……...……...……72

2.2.1.5.1.3La contraction thermique après prise……..……73

2.2.1.5.4 Le retrait par auto dessiccation de béton à haute performance…….....73

2.2.1.6 Moyens pour réduire la fissuration…….……..74

2.2.1.6.1 Système statique et joints……..…….……...….75

2.2.1.6.2Armature passive…….……75

2.2.1.6.3 Composition et cure de béton…….……...….75

2.2.1.6.4Étapes de construction et phases de bétonnage……..…...……...…….……..76

2.2.1.6.5 Fabrication d'un béton renforce de fibre…….77

2.2.2 Désintégration……...……...…78

2.2.2.1 Modes de dégradation……..….....78

2.2.2.2Désordres chimiques……..……79

2.2.2.2.1L'attaque sulfatique…….……79

2.2.2.2.1.1Complexité du phénomène……...80

2.2.2.2.1.2 Aperçu historique…….…...…82

2.2.2.2.1.3 Principales techniques expérimentales……...……...….83

2.2.2.2.2 Réaction Alcalis-Granulats……...…….84

2.2.2.2.3 Carbonatation……..……...……85

2.2.2.2.4Décalcification……...……86

2.2.2.3 Désordres physiques……..……...……87

2.2.2.3.1 Gel-Dégel……...……87

2.2.2.4Corrosion des armatures passives par infiltration d'ions chlore……89

2.2.2.4.1 Initiation de la corrosion…….....90

2.2.2.4.2 Propagation de la corrosion…….……..…….90

2.2.3Épaufrure……..…….91

2.2.3.1 Introduction……...……..….91

2.2.3.1.1 Déplacements des coffrages…….....91

2.2.3.1.2Ségrégation du béton frais…….…..91

2.2.3.1.3Décoffrage prématuré……..…91

2.2.3.1.4Ondes de chocs……..……..92

2.2.3.1.5 Désordres dus à un défaut de conception……...……....92

2.2.3.2Conclusion……..……..….93

Chapitre 3
Etudes statistique des cas pathologique dans la région de Médéa

1. Introduction ……..…….94

2. Les facteurs influant sur la dégradation des ouvrages dans la région de Médéa……..94

2.1. Codification……94

2.2. Données et résultats obtenus ……...……...…95

2.2.1. Les facteurs d'influence sur les ouvrages à usage d'habitation ….....95

2.2.2. Les facteurs d'influence sur les ouvrages d'équipement ……106

2.2.3. Les facteurs d'influence sur les ouvrages d'art (les ponts)..……...……..120

4. Conclusion ……..……...……...……128

Chapitre 4
Réparation des ouvrages dégradés

- Réparation pont oued chellif RN au PK 151+950…….129

1 – Introduction……...……129

2 – Description de l'ouvrage……..……...……..……130

2.1 Localisation……...……130

2.2 Nature de la structure……130

3-Descripton des désordres observées sur les piles……..……...…131

3.1 Fûts……131

4-Causses de degradation……..…….……131

5. Réparations..……...……131

5.1 Elimination des causes directes…….……131

5.2 Fûts……132

5.2.1 Préparation de la surface……132

5.2.2 Coffrage……133

6. Conclusion…...……...……133

- Réparation d'un ouvrage dégradé……...134

1-Introduction……..……134

2-Description de l'ouvrage……..……135

2-1- Caractéristique géométrique de l'ouvrage……...……136

2-1-1- Dimension en élévation……136

2-1-2-Dimension en plan……..……..136

2-2- caractéristique géométrique des balcons……136

3-Description des désordres observes sur le balcon……..…….……137

3-1- L'épaufrure……..……139

3-2 Corrosion des aciers d'armature……..……140

3-3 Détérioration du béton d'enrobage……...……142

3-4 Fissuration multidirectionnelle du béton……..……143

3-5 Désordre de mise en œuvre-ségrégation……...……144

3-6 Colonisation biologique……...…145

3-7 Lixiviation érosion, cavitation du béton……...145

4-Techniques de réparation…….……146

4-1-Nature des produits utilisés…….……146

4-2-Principes du traitement……...……..146

4-2-1- Préparation du support……...……..146

4-2-2 Application d'une couche d'accrochage……...……147

4-2-3 Mise en œuvre du mortier de réparation……147

4-3- Traiter cas de dégradation……...……147

4-3-1-Méthodologie de réparation…….....148

4-3-1-1Protéger les armatures…….……148

4-3-1-2Mise en œuvre (mortier hydraulique)…….……149

4-3-1-3La finition et la protection……...……149

5. Conclusion……..……150

CONCLUSION GENERALE
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Réhabilitation et les causses de dégradation du béton armé

Etudes statistique des cas pathologique dans la région de Médéa

Réparation des ouvrages dégradés

CONCLUSION GENERALE

INTRODUCTION

Le béton est un matériau employé depuis des millénaires, mais ce n'est qu'au XIX siècle qu'il connait un grand essor notamment grâce au ciment de Portland et à Louis Vicat. Il aura fallu attendre la fin de ce siècle pour voir apparaitre les premières constructions en béton armé. Depuis il est devenu un matériau composite incontournable. Les éléments en béton armé sont très présents dans notre vie. Que ce soit dans un pont pour traverser une route, dans un bâtiment pour abriter des personnes ou dans des activités, ou autres ouvrages en béton armé, ils remplissent tous une ou plusieurs fonctions bien précises. Ces ouvrages sont nécessaires au bon fonctionnement de notre société, car ce sont des éléments facilitant ou améliorant la vie des usagers. Pour leur permettre de remplir leur rôle, il est nécessaire de s'assurer de leur bonne santé et dans le cas contraire les réparer.

C'est dans cette optique que s'inscrit le diagnostic d'un ouvrage. A partir du moment où une pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage, il est important de diagnostiquer d'une part d'où vient le problème, mais à quel degré il affecte l'édifice. Dans un second temps, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage.

Le diagnostic est un moment clé lorsqu'il y a présence de pathologies. En effet, si la source du problème est mal diagnostiquée, les réparations préconisées ne correspondront pas réellement à ce qui est nécessaire et l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques.

Pour effectuer un diagnostic, différents moyens d'investigation sont disponibles. On a d'une part les méthodes destructives, pour les structures pouvant être localement dégradées et les méthodes non destructives pour les ouvrages nécessitant d'être préservés tels que les bâtiments classés monuments historiques.

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 appliqué sur le parement, aux traitements électrochimiques.

Ces expertises se développent de plus en plus notamment du fait d'une volonté des pouvoirs politiques de s'inscrire dans un schéma de développement durable, à savoir, pérennisé l'existant.

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.

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

La première partie de ce travail est consacré à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et de définitions sur le béton et ses constituants, tel que le ciment, les adjuvants, …etc. et finalement on parle aussi dans cette partie de pathologie et diagnostic d'une structure existante en béton armé et de désordre affectant le béton armé et sa durabilité.

La deuxième partie décrit les causses de la dégradation béton armé.

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

La quatrième partie concerne la protection et la réparation possible sur une structure en béton armé.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale avec des recommandations éventuelles.

INTRODUCTION :

Ce chapitre présente une revue de documentation sur le diagnostic des structures en béton armé, il parcoure en premier lieu le béton armé comme matériau de base dans la construction et ses caractéristiques, par la suite les pathologies du béton armé et les techniques de diagnostics de ces dernières, en fin les techniques de réparation des désordres.

1. GENERALITES SUR LE BETON :

1.1. Historique :

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

1.2. Le béton:

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

Le liants peut être « hydraulique », car il fait prise par hydratation, il est nommé ciment, on obtient dans le cas où le liant est un ciment un béton ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi « hydrocarboné » nommé aussi bitume, ce qui nous conduit à la fabrication d'un béton bitumineux.

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

- Silicate tricalcique : 3Ca0. Si 0 2 ou C 3S (60-65%)

- Silicate di calcique : 2Ca0.Si 0 2 ou C 2S (20-25%)

- Aluminate tricalcique : 3Ca0.Al 203 ou C 3A (5-10%)

- Ferro-aluminate tétra calcique: 4Ca0.Al 203.Al 203, Fe 203 ou C 4AF (5-10%). [1]

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

La réaction chimique qui permet au béton (de ciment) de faire prise est assez lente : à peine 75% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température lors de son durcissement. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).

Le délai de 28 jours a été choisi afin de pourvoir contrôler la résistance (4 semaines après avoir coulé le béton). [2]

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés [CaC03, MgC0 3, Ca Mg (CO 3)2] ou siliceuses (S i02) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique. [1]

On appelle adjuvants les substances mélangées physiquement aux polymères, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique en machine de transformation, ou bien les propriétés d'usage des matériaux finis (propriétés physiques, stabilité à l'environnement).[2]

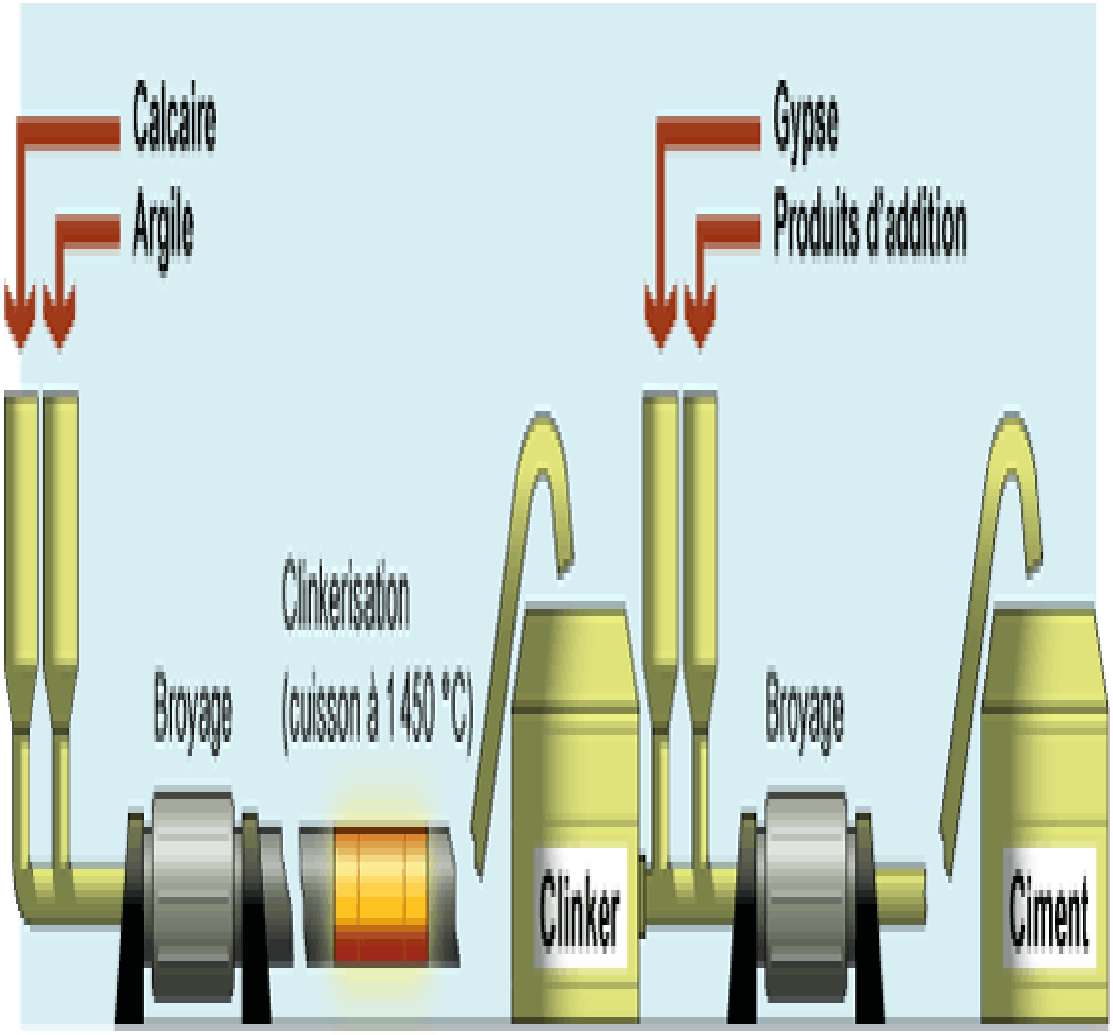


Figure 1-1 : Schéma indiquant la fabrication du ciment et la constitution du béton [2]

2. ACIER :

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

- Les ronds lisses ou ronds à béton ;

- Les aciers, à haute adhérence, qui possèdent des nervures tout le long de la barre, améliorant l'adhérence béton-acier ;

- Les aciers crénelés ;

- Les treillis soudés.

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

· L'oxyde magnétique ou magnétite: Fe 304

· L'oxyde ferrique anhydre: Fe 203

· L'oxyde ferrique hydrate: 2Fe 203, 3H 20

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

- Elaboration de la fonte à partir des oxydes. En brûlant les oxydes en présence des carbures, on obtient :

- l'élimination des oxydes

- la fonte qui contient entre 2 et 5% de carbone

- la scorie qui est le résidu du haut fourneau. [3]

La fonte est ensuite affinée pour obtenir soit du fer pur (élimination totale du carbone) soit de l'acier (fer + moins 1% de carbone). [3]

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

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

Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est bien plus résistant qu'un acier ordinaire mais son coût très élevé fait que, l'acier ordinaire, capable de durer assez longtemps pour

satisfaire une durée de service déterminée, est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé (BA). [3]

3. DEFINITION DU BETON ARME :

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

Un cours de béton armé fait apparaitre le calcul comme la phase essentielle, voire unique, de l'étude d'un ouvrage. En réalité, l'étude purement technique d'un ouvrage comprend l'analyse fonctionnelle et la modélisation, le calcul et l'étude technologique.

L'analyse fonctionnelle permet de définir un modèle de structure stable. Le calcul donne les dimensions minimales.

L'étude technologique impose certaines formes et certaines dimensions. Cette étude nécessite une simulation de construction qui est généralement faite grâce au dessin technique. En outre, le dessin technique est le principal moyen de communication des constructeurs. [4]

4. La durabilité

4.1. Généralités

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (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.

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.

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

Les ouvrages en béton disposent aujourd'hui d'un support normatif complet, constitué de normes européennes et de référentiels français. Cet ensemble de textes couvre :

- Le dimensionnement des ouvrages en béton,
- Les constituants du béton : la norme NF EN 197-1 pour les ciments, les normes NF EN 12620 et XP P18-545 pour les granulats et la norme NF EN 934-2 pour les adjuvants),
- La durabilité des bétons : norme NF EN 206-1, fascicule de documentation FD P18-011, recommandations sur l'alcali-réaction, le gel-dégel, la réaction sulfatique interne,
- Les produits en béton : norme NF EN 13369,
- L'utilisation du béton dans les ouvrages : Fascicule 65A, DTU….

Ces normes et référentiels se complètent de manière cohérente et permettent in fine de mieux appréhender et de mieux maîtriser la durabilité des structures en béton [5, 6].

Malgré les aspects intéressants que proposent les bétons, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, ils ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, ce qui limite encore leur diffusion [7].

Pour encourager l'utilisation des bétons, plusieurs études sur les différents aspects de la durabilité des bétons comme la perméabilité à l'oxygène [8et 9], la diffusion des ions chlore [10,11, 12], la carbonatation accélérée [13, 14], la lixiviation [15],…, ont été menées depuis quelques années.

L'objectif de notre étude est de contribuer à la connaissance du comportement des bétons face à l'attaque sulfatique externe. Les résultats pourront contribuer, à l'établissement des normes européennes dans ce domaine et au développement de ce nouveau matériau auprès des acteurs de la profession du BA.

4.2 Introduction à la durabilité

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, qu'ils soient minéraux, organiques ou biologiques, sont d'ordre chimique ou physique.

Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients 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 [16] dont les conséquences sont d'ordre macroscopique :

- Mécanique : chute de résistances et de rigidité, fissuration et déformation du matériau.
- Physico-chimique : baisse du pH, augmentation de la porosité et des propriétés de transfert des gaz et des liquides.

L'action des ions sulfate issus du gypse, utilisé comme retardateur de prise, ne présente pas un danger pour les bétons car hydrate formé est certes expansif, mais cristallise dans une pâte de ciment fraîche et plastique qui supporte les déformations induites. Par contre en cas d'attaque externe après la prise, la cristallisation d'hydrate se fait dans la porosité d'une matrice peu déformable. L'expansion de l'étrangéité peut alors donner naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant expansion, fissuration voire éclatement du béton [17].

4.3 Durabilité et économie

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

Règle 1 : l'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.

Règle 2 : la communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif.

4.4 Béton durable et béton résistant

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance.

Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre.

Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc.

Serait-ce aussi le plus durable ?

Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. On peut traiter la

question comme la durabilité du béton face au gel-dégel, à l'alcali-réaction, aux environnements agressifs.

Une façon pratique d'y parvenir est de toujours partir de la résistance aux efforts de compression pris comme critère global et de discuter de la durabilité en deux temps :

- toutes choses égales par ailleurs, en comparant des bétons qui ne diffèrent que par leur résistance ;
- puis à résistance constante, en examinant les paramètres spécifiques de la durabilité.

Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité, à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit être complété par d'autres conditions. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables. A résistance égale, il existe des différences parfois importantes, entre les bétons. Au simple critère de résistance, il faut ajouter d'autres considérations.

D'abord, la résistance (et ainsi la porosité) n'est qu'un critère de premier ordre qui doit être complété par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion, la distribution des tailles de pores. En effet, un autre facteur majeur est la dimension des pores. A porosité égale, les agents agressifs pénètrent d'autant plus difficilement que les pores sont fins. Or, la finesse des pores dépend du rapport E/C, du ciment (CHF-CEM III/A, CLC-CEM V/A et B, CLK-CEM III/C comparés au CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A [18]), des additions minérales (cendres volantes, laitiers), de l'exposition du béton (dessiccation, carbonatation) et même de la dimension et de la nature des granulats [19].

5 .La perméabilité :

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire. [20]

$Q = -K.(A/u).(dP/dz)$

Avec :

Q = débit volumique du fluide de viscosité μ

K = perméabilité du milieu (m2)

A = aire apparente du matériau

dP/dz = gradient de pression

La perméabilité K est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m2. L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau (c'est rarement vrai dans le cas du béton!).[20]

La perméabilité K peut être utilisée pour estimer l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide. Plus la valeur de K est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable. [20]

Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur K en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet.

En pratique, la perméabilité K peut être utilisée pour caractériser la perméabilité à l'eau et au gaz du béton.

Très souvent, on utilise, à tort, la notion de perméabilité aux ions Chlore. En fait, le concept de perméabilité aux ions chlore n'existe pas. Dans le béton, la pénétration des ions chlore dans le béton n'est pas le résultat d'un gradient de pression mais plutôt d'un gradient de concentration. [20]

6. LES PATHOLOGIES DU BETON ARME : CAUSES ET CONSEQUENCES

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. [21]

6.1. Les causes physiques de dégradation :

Abrasion

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

Erosion

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

Cavitation

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

Chocs

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

Surcharges

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

Le feu

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

Cycle gel/ dégel

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

6.2. Les causes chimiques de dégradation :

Alcali-réaction ou cancer du béton

Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide .Des gels gonflants apparaissent en développant des micros faïençages et un éclatement du béton. [23]

Réactions sulfuriques

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étrangeté, le gypse et la traumatise. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations. [23]

Corrosion

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

6.3. Les autres causes de dégradation des bétons :

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

Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface. [24]

Mauvaise qualité des bétons employés

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

Vibration trop importante

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton. [24]

Absence de cure du béton

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface. [25]

Cycle humidité / sécheresse

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

7. DESCRIPTION DES PATHOLOGIES DU BÉTON ARMÉ :

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton armé durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans la suite.

7.1. La fissuration:

Il est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau. Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.

- 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.

- Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.

- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

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



Figure1.2: Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton



Figure1.3: Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm



Figure1.4: Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm

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

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

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

- Les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température. [26] [27]

7.2. La carbonatation des bétons :

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone de l'air et certains constituants du béton tel que le ciment. Le dioxyde de carbone gazeux pénètre par diffusion dans le réseau poreux du béton et réagit avec la portlandien Ca(OH) 2 pour former des carbonates tel que la calcite Caco 3, ce qui provoque un abaissement du pH a 9 environ, suivant la réaction suivante en milieu aqueux :

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (1)$$

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

$$CO_2 + 2XOH \longrightarrow X_2CO_3 + H_2O \qquad (2)$$

Avec X= Na ou K

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

$$X_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + 2XOH \qquad (3)$$

Avec X = Na ou K

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

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

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

La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau. [28]

Le schéma de la carbonatation peut être représenté de la manière suivante :

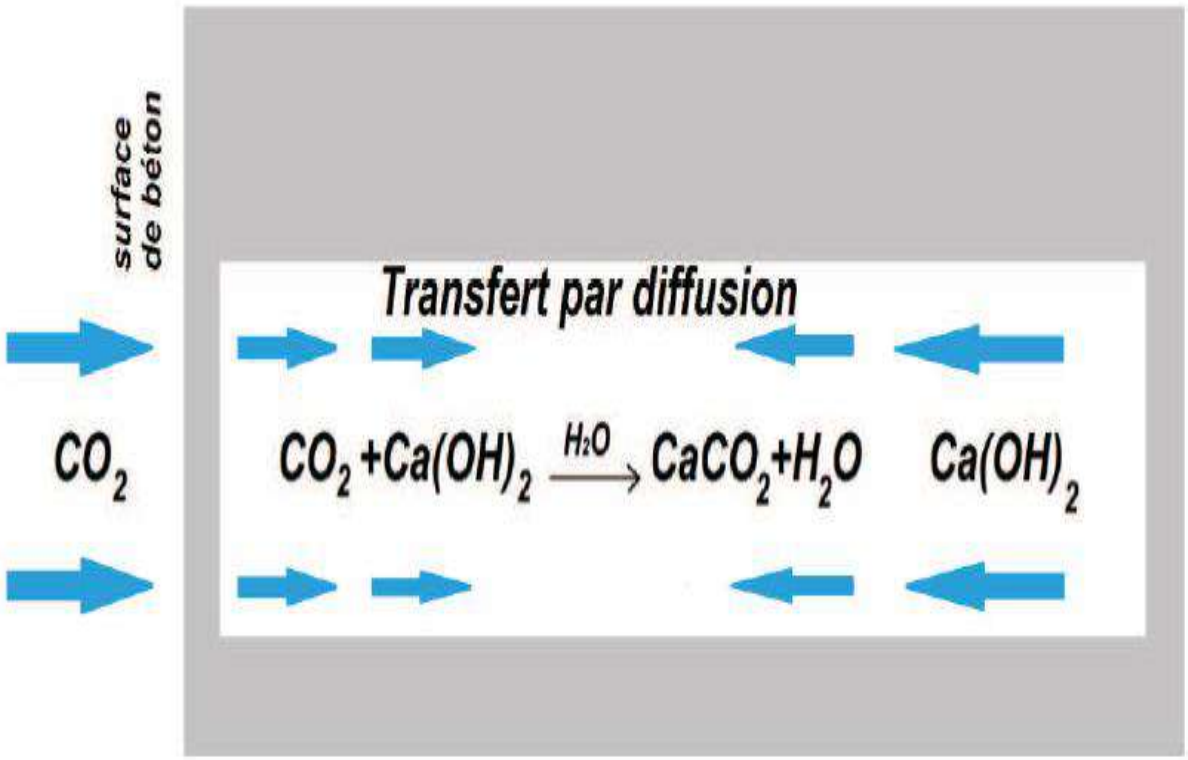


Figure 1-5: Phénomène de carbonatation [28]

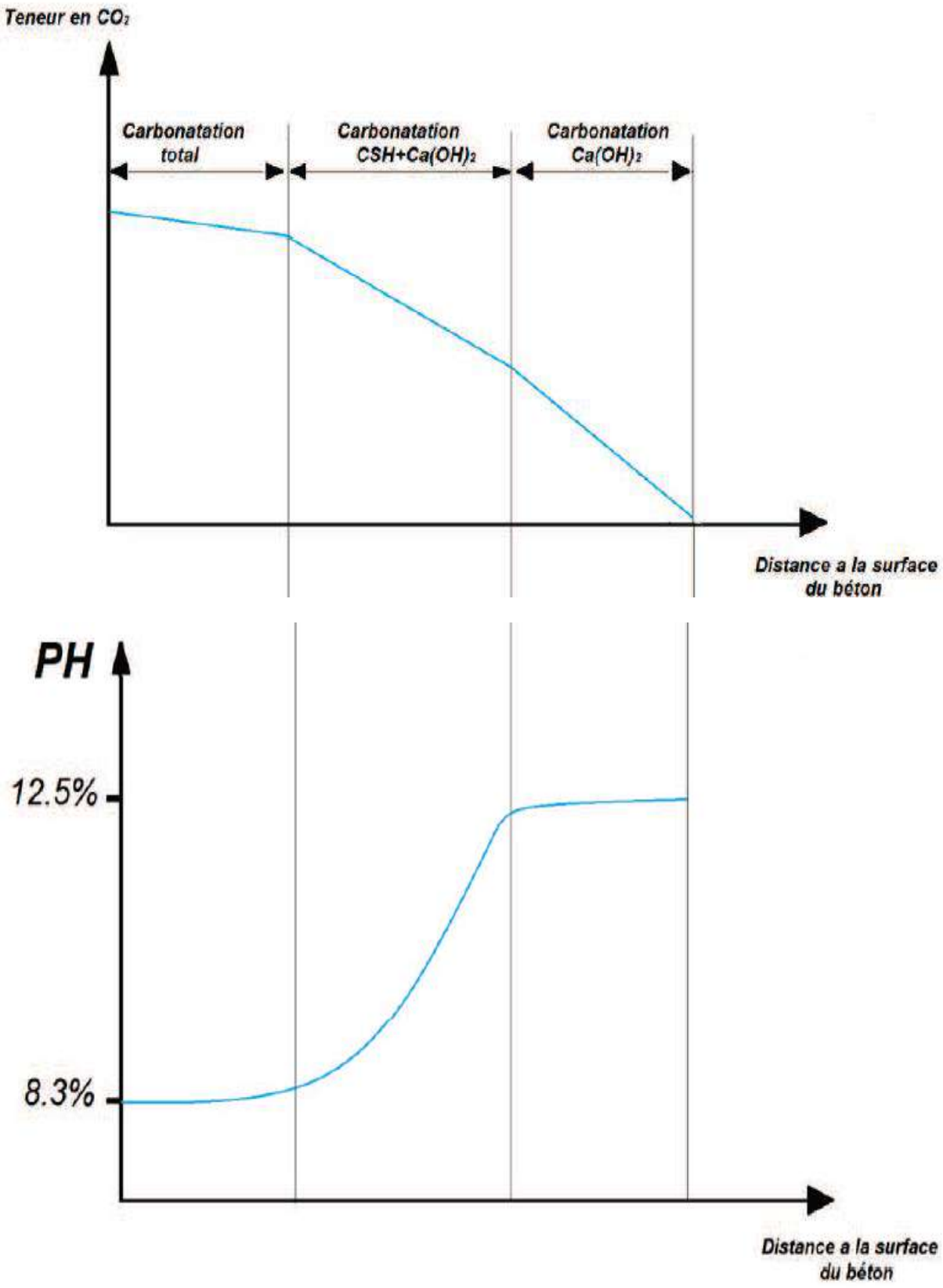


Figure 1-6 : Phénomène de carbonatation [28]

7.3. La corrosion des armatures :

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

7.3.1. Généralités :

Il existe plusieurs types de corrosions :

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

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

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

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

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

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

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

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

Dans la zone anodique, l'acier se dissout :

$$Fe \longrightarrow Fe_2+ + 2e - \quad (4)$$

Les ions ferreux Fe 2+ passent dans la solution et peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferriques Fe 3+. Dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réaction de l'oxygène dissous dans l'eau (5a) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (5b) :

$$O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4e^- + 4OH^- \quad (5a)$$

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \quad (5b)$$

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

$$Fe^{2+} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2 \quad (6)$$

Les réactions chimiques ci-dessus se produisent parce qu'avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée puisqu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté (4 CaO, Fe 203, 13H 20). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxyde de fer [Fe (OH) $_2$] et de calcium (Ca (OH) $_2$].

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

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

Une telle protection disparaît si des agents agressifs s'infiltrent dans le béton et provoquent de nouvelles réactions chimiques qui diminuent le pH du béton. [29]

7.3.2. La corrosion des aciers dans le béton :

7.3.2.1. Présentation générale :

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

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

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

- Un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;

- Une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone catholique ; - La présence d'un agent agressif ; [29]

7.3.2.2. Processus de la corrosion :

Les processus fondamentaux de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés sur les figures 1-3 et 1-4.

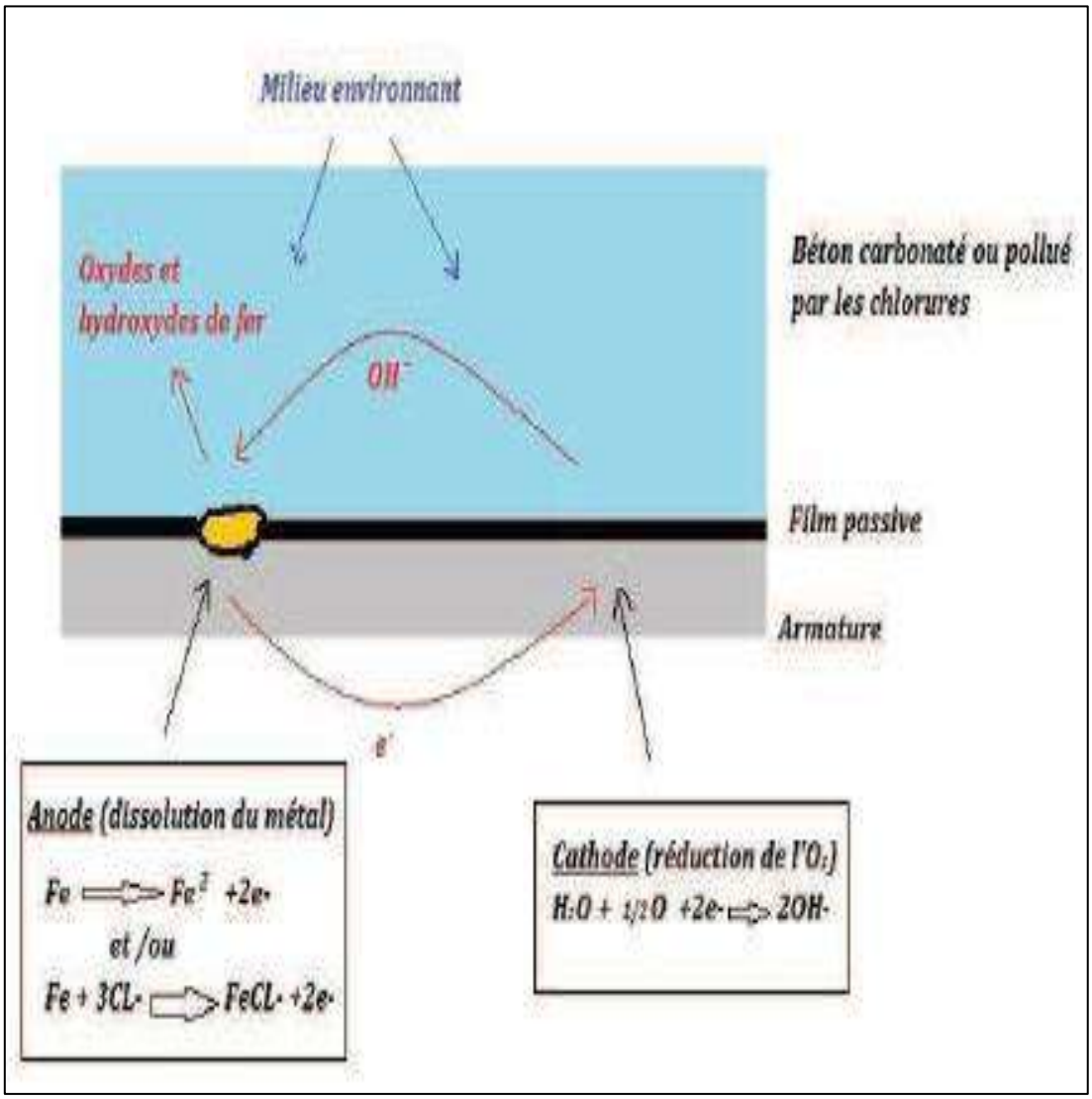


Figure 1 -7 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton. [29]

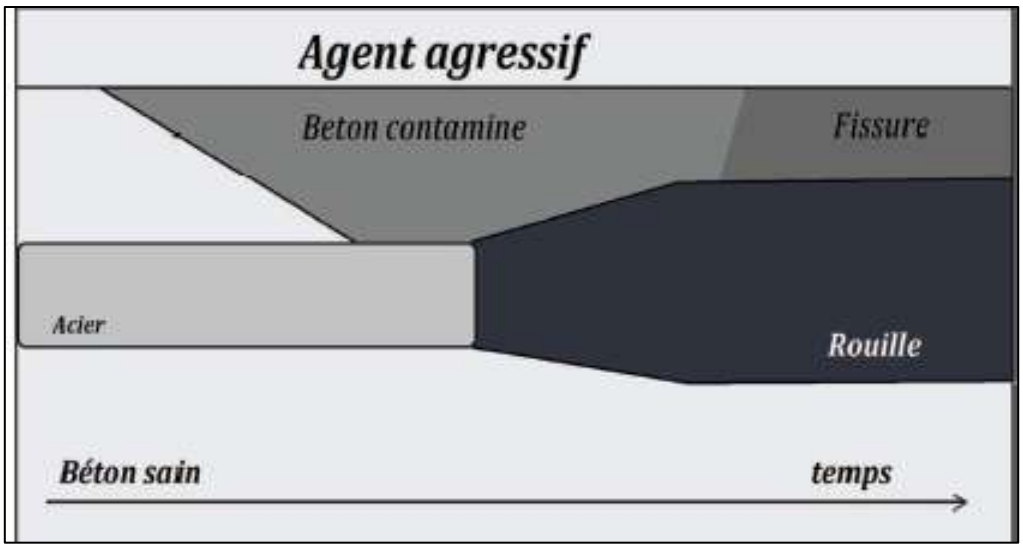


Figure 1-8 : Processus de corrosion des armatures.

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

L'oxygène qui peut diffuser dans le béton via le réseau poreux, se dissout dans la solution interstitielle et finit par atteindre la surface de l'acier. Sur cette surface, dans la zone catholique, l'oxygène est réduit en ion hydroxyde (OH -) selon la réaction électronique (3a).

C'est, dans la plupart des cas, la réaction cathodique associée à la corrosion des aciers dans le béton. Cependant, dans le cas d'un béton carbonaté ayant un pH moins élevé (8-9), l'eau peut être réduite en dihydrogène selon la réaction (5) :

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^- \quad (5)$$

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

La réaction anodique correspondante est la dissolution de l'acier conformément à la réaction (2). Celle-ci entraîne une diminution de la section de l'acier qui peut finir par rompre.

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

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

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

La corrosion devient préjudiciable lorsque la vitesse de corrosion de l'acier est très élevée et que les produits de corrosion, ne pouvant être évacués de la zone de corrosion, s'accumulent à la surface de l'acier. C'est le cas si la solution interstitielle est riche en oxygène et en espèces agressives, et si l'enrobage de béton n'est pas assez humide. Une partie des ions Fe 2+ dissous peuvent alors s'oxyder et être transformés en oxydes ferriques hydratés (Fe 203, H 20) qui se déposent ensuite, avec des oxydes et hydroxydes ferreux, à l'interface acier béton. Le volume des produits de corrosion étant 2 à 6 fois supérieur à celui du métal, une contrainte d'expansion se crée à cette interface plus acier est corrodé, plus cette contrainte est importante, et lorsque celle-ci devient plus importante que la résistance à la traction de l'enrobage, des fissures apparaissent. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait les processus de corrosion. Un processus corrosion ? Fissures ? Pénétration d'espèces agressives ? Plus de corrosion ? Plus de fissures ? Plus d'espèces agressives ... s'instaure.

Selon **TUUTI** , l'évolution de la corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux étapes (figure5):

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

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

7.3.2.3. La dé passivation des armatures :

Si un acier est préalablement recouvert de produits passivant (cas du béton sain), cette protection est altérée le plus souvent par l'introduction de deux agents pouvant se présenter simultanément : le dioxyde de carbone C0 2 (carbonatation) et l'ion chlorure Cl - (chlorurassions) en excès au niveau des armatures. Il se produit alors un dé passivation.

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

Le mécanisme de dé passivation comprend les étapes suivantes :

- La couche passivant est détruite localement là où la teneur en chlorure ou en dioxyde de carbone est très forte ;

- De la rouille se forme là où la passivation a disparu ;

- La rouille se transforme en des oxydes (ou hydroxydes) poreux si la teneur en oxygène est assez élevée. [29]

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

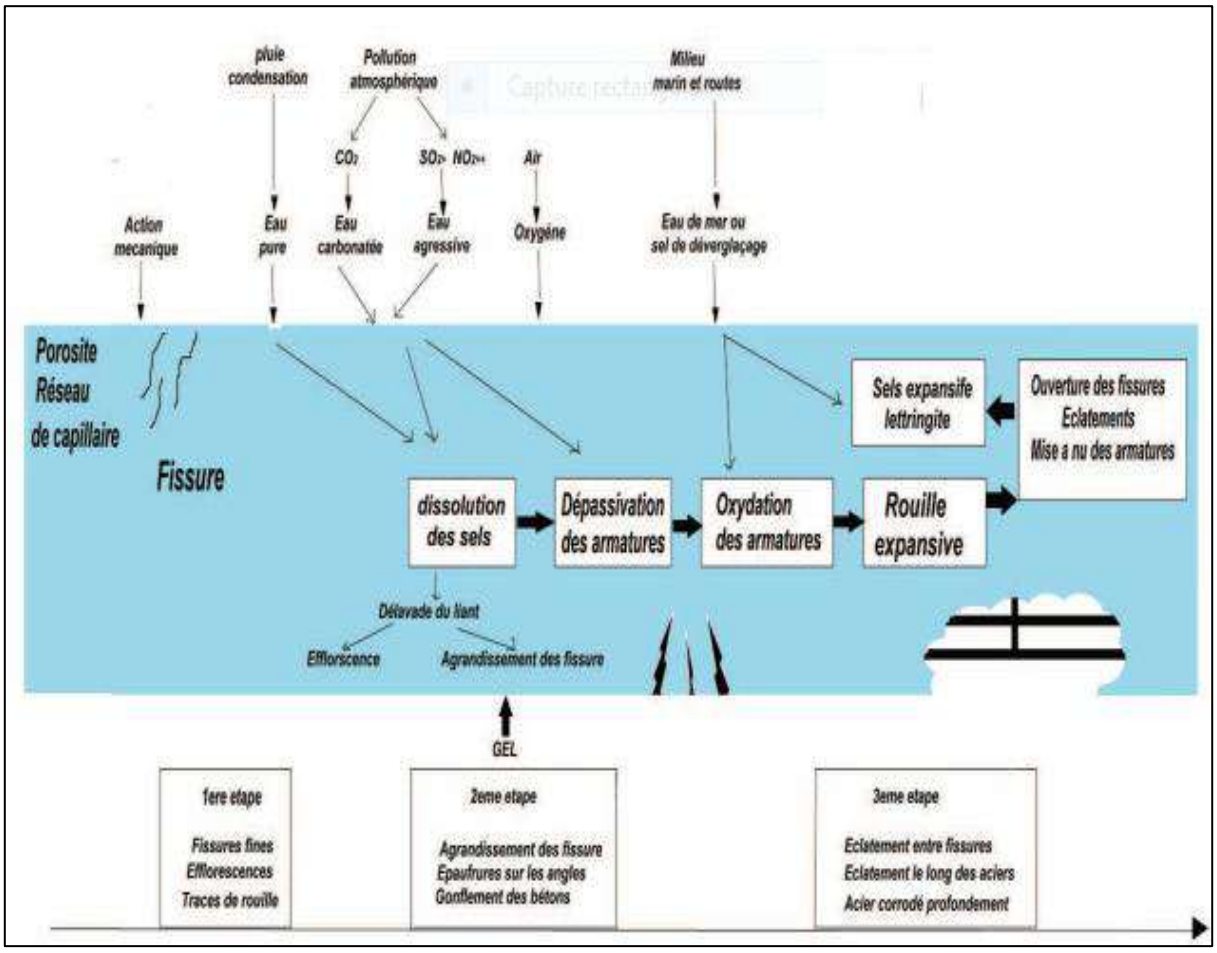


Figure 1-9 : Processus de corrosion [3]

7.3.2.4. Facteur influents de la corrosion :

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

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

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

Influence de l'enrobage :

L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature. Parfois, la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures. [23]

Influence de la composition du béton :

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

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

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

Influence de l'humidité

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

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton augmente 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. [29]

Influence de la résistivité du béton

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

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

Effet de l'oxygène

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

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

Autres agents agressifs

Des sels, contenus dans l'eau pénétrant le béton, peuvent contribuer à la formation de produits de corrosion sur l'acier. Ainsi, les ions sulfate agissent qualitativement comme les ions chlorures et certains sels solubles tels les perchlorates, les acétates, les halogénures autres que les chlorures peuvent aussi être corrosifs pour les armatures. [23]

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

7.3.2.5.1. 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.[30]

7.3.2.5.2. 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.[30]

7.3.2.5.3. 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. [30]

8. Le diagnostic des structures existantes en béton armé :

L'activité de diagnostic désigne toute démarche relative à la caractérisation de l'état d'une structure et de ses matériaux constitutifs.

L'ingénieur effectuant l'examen d'une structure existante est confronté à trois taches principales :

- La détermination de l'origine des pathologies et des dégâts ;

- La vérification de la sécurité de la structure : il s'agit de déterminer dans un premier temps l'état réel de celle -ci. Les actions sur les structures (qui peuvent être amenées à changer), ainsi que les résistances des matériaux doivent être actualisées ;

- L'évaluation de la durabilité : il faut émettre un pronostic sur l'évolution de l'état de la structure et sur l'efficacité des interventions éventuelles ;

Le défi posé à l'ingénierie en structure existantes, est de vérifier que la sécurité structurelle soit suffisante et de répondre à des exigences nouvelles sans devoir faire appel à des interventions coûteuses (réparation, renforcement). Contrairement à la nouvelle construction, il faut – dans le domaine de la maintenance – limiter ou même éviter les interventions de construction.

8.1. Gestion des ouvrages existants :

Régulièrement, les financements pour l'entretien des ouvrages font l'objet de restrictions budgétaires. La question persiste « entretenir les ouvrages, oui, mais à quel prix ? ». C'est le grand défi auquel la collectivité est confrontée, et en particulier les ingénieurs.

8.1.1. Domaine public :

Les ponts ainsi que les ouvrages exceptionnels font partie du patrimoine construit public et sont gérés par l'Etat. Ils sont soumis au texte de loi instruction technique de surveillance et entretien des ouvrages d'art. Selon ces textes de loi, les ouvrages doivent être inspectés tous les 3ans, ce qui permet d'intervenir déjà dans la phase d'initiation en stoppant au freinant la pénétration des agents agressifs.

8.1.2. Domaine privé :

Malheureusement les ouvrages privés ne sont pas soumis à une loi et il n'y a généralement pas de surveillance de l'état de la structure. Actuellement, la gestion est du type « curatif ». L'intervention a généralement lieu à partir du moment où les désordres deviennent nettement visibles et que les morceaux de béton qui se détachent mettent en jeu la sécurité des usagers et des tiers. Les réparations à effectuer sont donc lourdes et couteuses (élimination du béton pollué et reconstitution de l'enrobage des armatures par exemple). Le manque de moyens financiers alloués à l'entretien des ouvrages a pour conséquence de repousser la réparation des ouvrages toujours plus tard. Or lorsque le moment opportun est passé, l'entretien coûte souvent plus cher.

L'intervention de l'ingénieur est généralement sollicitée lorsque les désordres sur la structure sont visibles et alarment le gestionnaire, c'est pourquoi il faut entreprendre un diagnostic et une simple surveillance ou visite ne permet pas de déterminer l'état réel de l'ensemble de la structure.

8.2. Les principales étapes d'un diagnostic :

Le diagnostic d'une structure se compose de différentes étapes clés décrites ci -dessus.

Une visite préliminaire

Elle a pour objet d'amélioré la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées.

Suite à cette visite, l'ingénieur chargé d'affaire peut déjà se faire une idée de l'origine des dégradations observées et peu ainsi proposer un programme d'investigations à réaliser, son coût ainsi que sa durée. La détermination des surfaces inspectées plus en détails tiendront compte de l'accès, de l'environnement ainsi que des contraintes d'exploitation de la structure. [29]

Collecte des documents

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

- Date de construction afin de connaître le code selon lequel la structure a été calculée et les dispositions constructives de l'époque ;

- L'histoire de la structure ;

- Les plans de coffrage et de ferraillage ;

- Les rapports d'éventuelles études antérieures ;

- L'orientation de la structure ; [29]

Préparation de l'intervention

A partir de la visite sur site et de l'étude des documents collectés on peut déterminer précisément le nombre et le type de mesures à réaliser pour répondre au mieux à la demande du client. Avant l'intervention il faut déjà avoir déterminé quelles informations sont importantes pour réaliser la mission, quelles sont à priori les dégradations que l'on veut mettre en évidence. [29]

« Il faut toujours savoir ce que l'on cherche, afin de chercher à savoir ce que l'on a trouvé… »

Inspection détaillée

Une inspection visuelle de la totalité de la structure est mis en œuvre afin de détecter tous les si gens 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'efflorescence, de traces de rouille ;

- La présence de fissures (avec leurs ouvertures et leurs orientations, réseau) ;

- Les détériorations des zones sonnant le creux ;

- Les zones où le béton et les armatures ont été désorganisés (cas d'un incendie…) ;

- La présence d'armatures (passives ou actives) apparentes, corrodés ou non ;

- Le relevé des déformations de la structure ;

- La détection des traces d'humidité ;

- Etc.… [29]

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 observés 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 procédé 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.

Essai en laboratoire

Si des échantillons ont été prélevés dans les zones représentatives des états de dégradation, ceux-ci sont envoyés en laboratoire pour analyse chimique ou microstructurale afin de qualifier le béton. Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure elles sont écrasées afin de connaître la résistance à la compression du béton. [21]

Traitement des résultats

L'ensemble des résultats d'analyse et des relevés des défauts sont récapitulés dans des tableaux ou sur des plans dans le rapport de diagnostic. Si l'inspection de la structure était complète, il faudrait pour chaque type de désordres effectuer un linéaire en vue d'une éventuelle réparation. [21]

Commentaires et avis de réparation

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

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

- Si la structure garantit toujours la sécurité des personnes et des bien qu'elle abrite (bâtiments) ou qu'elle ne menace pas de s'écrouler ;

- Les zones à traiter en priorité ; - Des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage, maintien, renforcement ou suivi, conseil sur des éventuels compléments d'étude ;

- Des recommandations relatives aux éventuelles méthodes de réparation les mieux adaptées ;

Il est à rappeler que le rapport de diagnostic doit être compréhensible pour un non initié. [24]

9. REALISATION D'UN DIAGNOSTIC :

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

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations.

L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

Au cours du travail du PFE, on a été amené à réaliser de nombreux diagnostics sur des structures en béton armé. Ce rapport a pour but de présenter le déroulement d'un diagnostic ainsi que les moyens à notre disposition pour caractériser les désordres.

Cette étape est capitale pour préconiser des réparations adaptés et durables. [24]

9.1. Choix des investigations :

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

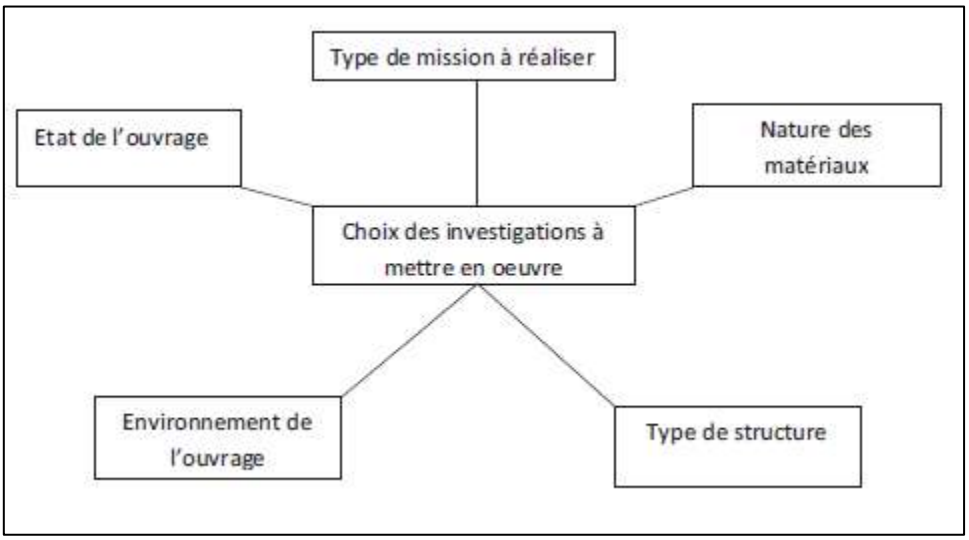


Figure1-10 : schéma du choix d'investigation

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

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

• Un diagnostic.

• Un diagnostic approfondi.

• Un suivi d'ouvrage

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

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

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

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

- De l'état de l'ouvrage ; Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures. Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage. S'il est à la limite de la stabilité, on se dirigera plutôt vers des méthodes non destructives afin de ne pas affecter plus la structure.

De plus, certaines parties de structures peuvent être inaccessibles ou nécessitant la mise en place d'échafaudages ou nacelle afin de pouvoir diagnostiquer ces éléments. [24]

9.2. Types d'investigations :

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

9.2.1. Investigations non destructives :

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

dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie. Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus. [29]

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

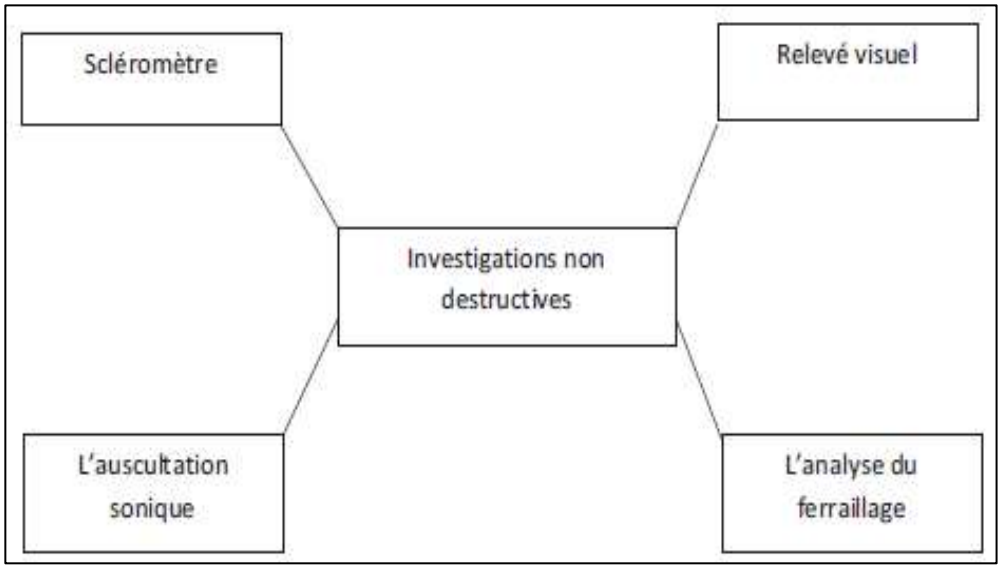


Figure1-11 : Schéma des investigations non destructives

9.2.1.1. RELEVE VISUEL :

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaitre les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs.

Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaitre les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure. Dans un second temps, il est nécessaire de répertorier les différentes pathologies présentent sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur

- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet

- La présence de coulures de calcite

- Les zones d'altération superficielles et profondes

- Les zones humides

- Les zones de mousses ou de végétation

- Les zones de faïençage

- Les éclats de béton en formation ou profonds

- Les aciers apparents

- Les zones de ségrégation

Il est nécessaire de répertorier tous ces éléments sur des plans, soit existant soit à créer, et de créer un dossier photographique des principaux désordres afin de pouvoir les visualiser au mieux. Dans tous les cas le diagnostic visuel doit permettre de :

- Qualifier les désordres, car chaque type à une origine et des conséquences particulières. Déterminer les caractéristiques d'une pathologie permet de savoir quelle sorte de traitement sera nécessaire afin de stopper le phénomène.

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

- Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème. S'il est seulement prévu de réparer l'élément sans s'attaquer à ce qui engendre la pathologie, la réparation risque de ne pas être pérenne et l'on verra rapidement apparaitre de nouvelles pathologies similaires. [24]

Les pathologies rencontrées lors du diagnostic visuel sont généralement recensées dans un tableau de type :

Localisation	**Description du désordre**	**Photo n°**
Poutre A1-2	Face Est : Décollement des aciers, hauteur 12 cm largeur 20 cm, profondeur 0 à 4 cm.	**1**
Poteau C3	Face Ouest : Fissure transversale, épaisseur 0.5 à 2cm longueur 50cm.	**8**

Tableau1 :1 Exemple d'un tableau qui recense les pathologies rencontrées lord d'un diagnostic

Il est possible de classer les éléments selon la gravité de leur pathologie :

- Indice A : Pas de défauts apparents.

- Indice B : Défauts sans conséquence importante autres qu'esthétique.

- Indice C : Défauts qui indiquent qu'une évolution risque de se faire anormalement. Ces défauts doivent être surveillés.

- Indice D : Défauts révélateurs de dégradation, ils sont rangés en deux classes :

• DA : Défauts qui indiquent un début d'évolution. Ils doivent être surveillés régulièrement et des mesures doivent être prises en cas d'évolution.

• **DB :** Défauts qui indiquent une évolution avancée. Des mesures de renforcement ou de remplacement doivent être prises.

- Indice E : Défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage. Des mesures doivent être prises dans les plus brefs délais.

- Indice F : Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage.

De même, il est possible de classer le site dans sa globalité afin de donner une vision d'ensemble de l'état de la structure au maître d'ouvrage. Il peut être classé de la manière suivante :

- Indice 1 : Site en état neuf ou quasi neuf, aucun travaux n'est à prévoir à moyen termes.

- Indice 2 : Site en très bon état général, quelques points à surveiller.

- Indice 3 : Site en bon état, quelques travaux à prévoir à moyen ou long termes.

- Indice 4 : Site en état moyen, travaux à prévoir à moyen termes et surveillance conseillée.

- Indice 5 : Site dégradé, travaux à court termes à prévoir.

- Indice 6 : Site très dégradé, travaux d'urgences à prévoir, site prioritaire.

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

- Un appareil photo ;

- Un mètre ;

- Un distance-mètre ;

- Un pied à coulisse ;

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

- Le nécessaire pour prendre des notes ;

Cette première étape permet de définir la gravité des pathologies, mais aussi de classer les différents éléments en fonction de la priorité auxquels ils doivent être réparés. L'investigation visuelle permet aussi de prévoir quels sont les autres moyens de diagnostic les plus adaptés à mettre en œuvre afin de répondre pleinement à la problématique. Ces investigations complémentaires ont pour but de préciser les désordres observés lors du relevé visuel, mais aussi de recueillir des informations complémentaires concernant leur constitution ainsi que leur état. [24]



Figure1-12 : Mesure d'une fissure

9.2.1.2. L'ANALYSE DU FERRAILLAGE :

Le relevé du ferraillage peut se faire à l'aide d'un phacomètre de type Ferro scan.

Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif. Il permet de déterminer le positon exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil. Le phacomètre détecte la diffusion de ce champ magnétique ainsi que les modifications de la résonance magnétique induite par la présence d'aciers. Ainsi, l'appareil mesure la variation électromagnétique due à la présence d'éléments ferromagnétiques, les armatures.

La détermination du diamètre et de l'enrobage repose sur le fait que plus une armature n'a un diamètre important, plus le signal reçu par l'appareil ne sera important. A contrario, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal sera faible. Ainsi, la profondeur d'auscultation avec cet appareil est limitée (généralement de l'ordre de 10 à 15 centimètres selon le type de bétons et le type d'armatures).

Le schéma ci-dessous montre la réponse obtenue selon la densité d'armatures, avec à droite une seule armature, au milieu trois armatures relativement espacées et à droite trois armatures rapprochées. [21]

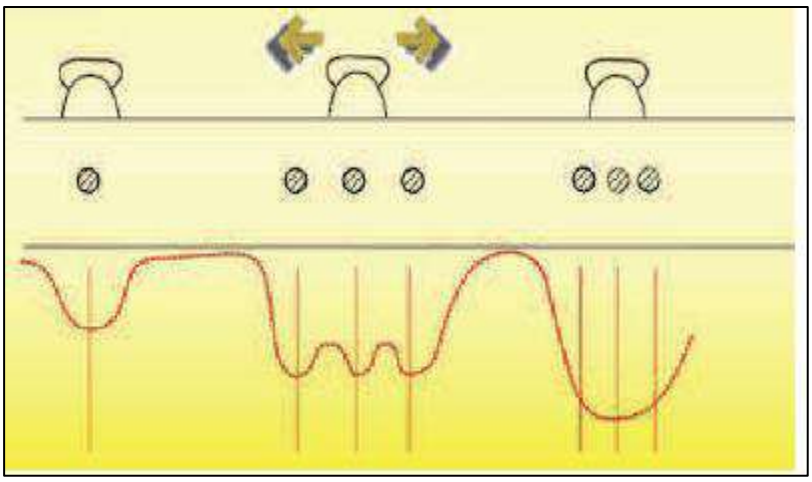


Figure1-13 : Réponse en fonction de la densité d'armature [4]

Concernant l'utilisation de l'appareil, il existe principalement deux modes de mesures:

- La détection par lignes

- La détection par fenêtres

La première méthode consiste à déplacer l'appareil perpendiculairement aux armatures que l'on souhaite détecter. La détection par lignes est très intéressante pour les éléments longs sur lesquels on souhaite avoir une vision globale du ferraillage. En effet, les détections peuvent aller jusqu'à quarante mètres de longueur. Ce type de mesure permet d'obtenir les variations d'espacement des armatures ainsi que les enrobages correspondants. [21]

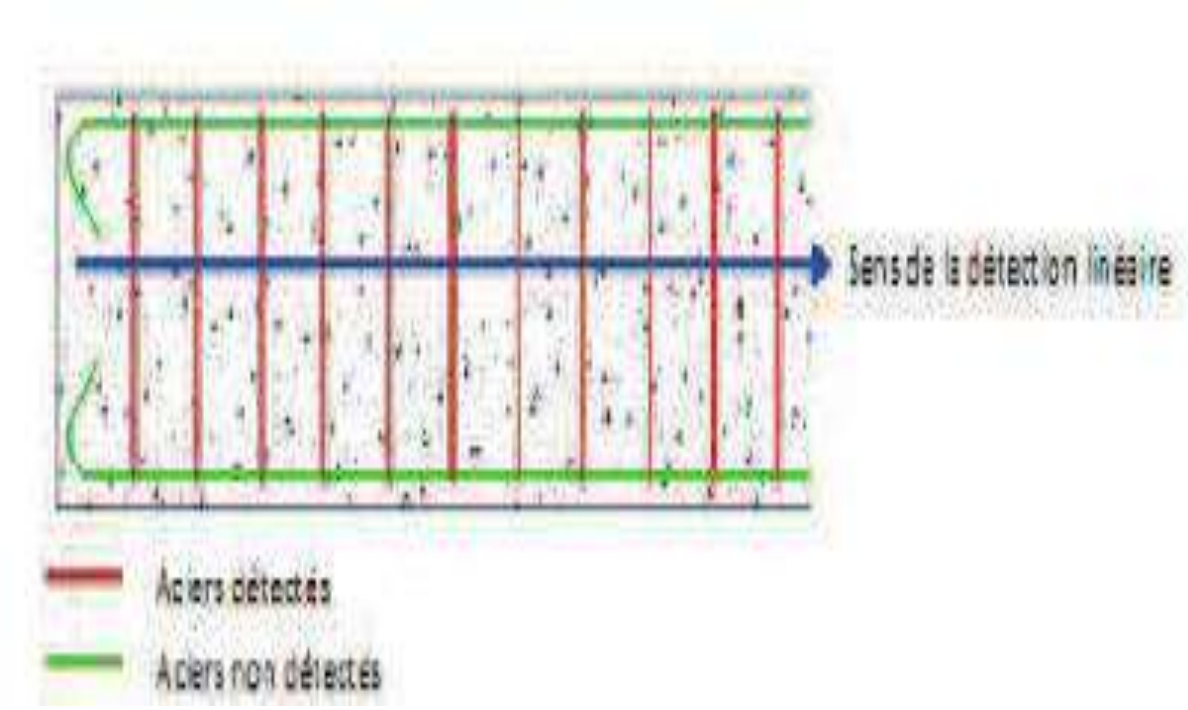


Figure 1-14: Principe de la détection linéaire [21]

La seconde méthode consiste à détecter les aciers sur un carré de soixante centimètres de côté. Cela par pallier de quinze centimètres, d'abord dans le sens transversal puis dans le sens longitudinal.

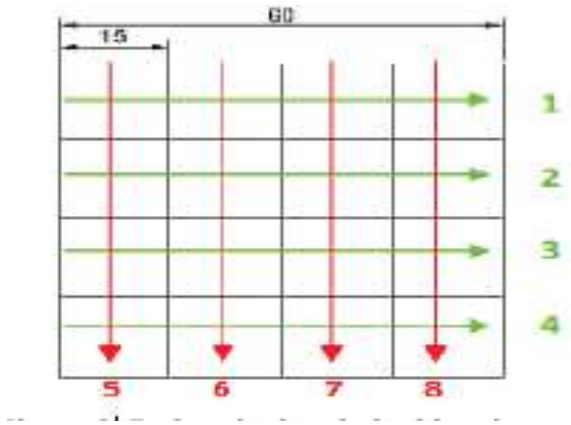


Figure 1-15 : le principe de la détection par fenêtre [21]

Cette méthode permet d'une part d'estimer le diamètre des aciers ainsi que les enrobages, et d'autre part de voir localement comment les aciers ont été assemblés.

9.2.1.3. L'auscultation sonique :

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

Connaissant la distance de l'émetteur au récepteur, il est possible de connaitre la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. [31]

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

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

- Les mesures en transparence : cette méthode consiste à déterminer le temps de propagation des ondes sonores longitudinales à travers un élément. Pour procéder à ce type de mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter.

- Les mesures de surface : cette méthode s'effectue principalement lorsqu'une seule des faces de l'élément est accessible lors des investigations. Elle peut aussi être utilisée pour déterminer la profondeur d'une fissure ou bien la présence de couches multiples dans un même élément.

Pour réaliser cette mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à ausculter. L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure. Il est à noter qu'il existe une règle a été conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées. [31]

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

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

Tableau1-2 : l'auscultation sonique des bétons



Figure 1-16: Mesure par transparence [31]

9.2.1.4. SCLEROMETRE :

Le principe de l'essai sclérotique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraine un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.

Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérotique Is de l'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report

de l'indice sclérotique 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. [31]



Figure 1-17: Scléromètre

9.2.2. 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.

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

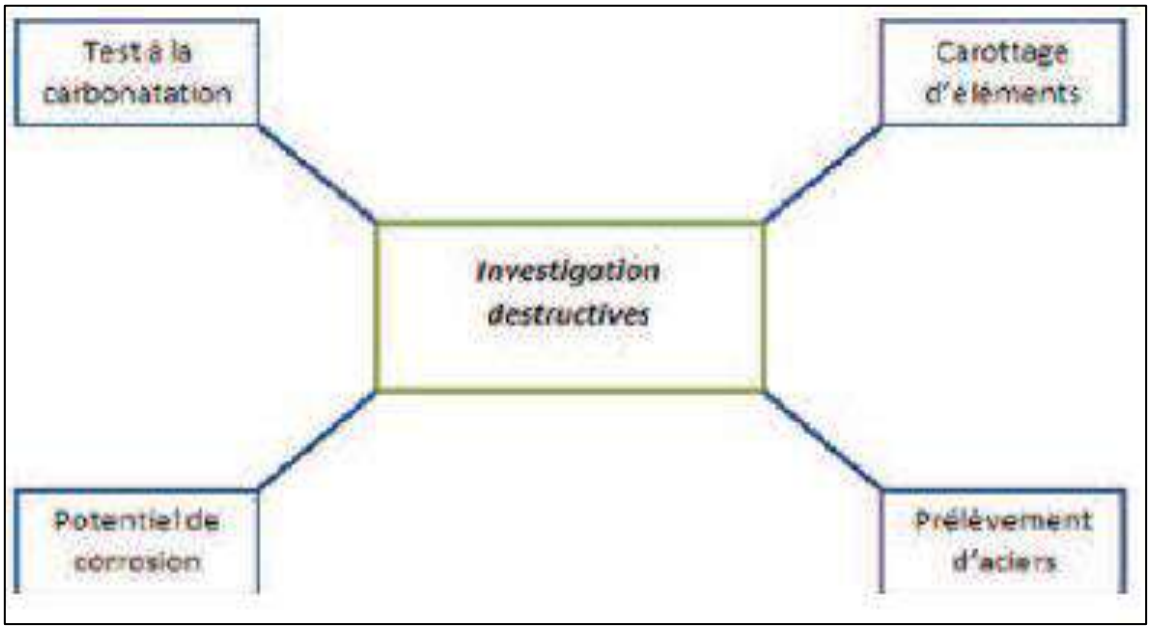


Figure 1-18: Schéma des investigations destructives

9.2.2.1. CAROTTAGE D'ELEMENTS EN BETON ARME :

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

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

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

- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,...)

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

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferraillage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure. [24]



Figure 1-19: Carotte prélevée

9.2.2.2. PRELEVEMENTS D'ACIERS :

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcule d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaitre les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature. Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit. [32]

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



Figure1-20: Prélèvement d'aciers

9.2.2.3. POTENTIEL DE CORROSION :

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

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

important de veiller à ce que la jonction entre le béton et l'électrode soit humide afin d'établir une conduction électrique. Cela permet de diminuer la résistance entre l'électrode de référence et le béton ainsi que le potentiel de jonction entre l'électrolyte contenu dans l'électrode de référence et la solution interstitielle du béton. [3]

Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence.

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

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

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

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

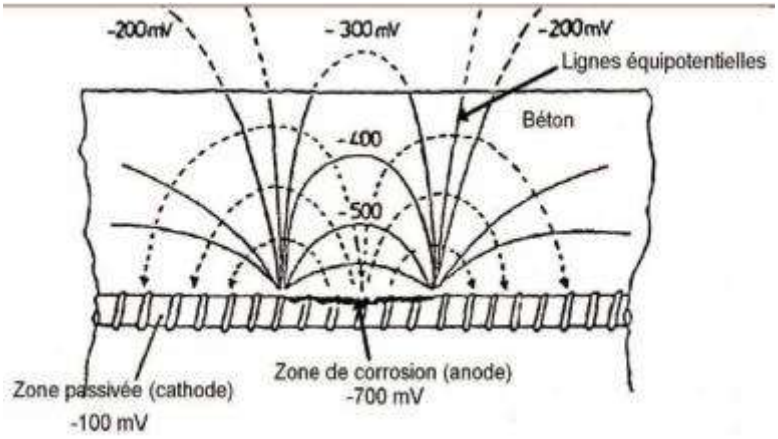


Figure 1-21: principe du potentiel de corrosion [3]

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

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

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

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

En effectuant ainsi des mesures en de nombreux points d'un élément, il est possible d'effectuer une cartographie complète de la probabilité de corrosion. [3]

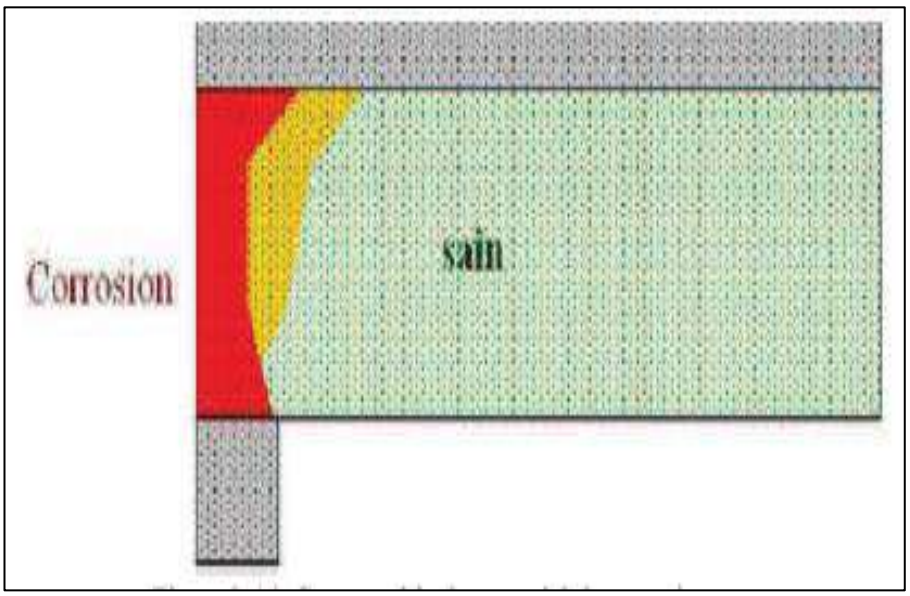


Figure 1-22: Cartographie du potentiel de corrosion



Figure 1-23: Mesure du potentiel de corrosion

2.2.2.4. TEST A LA CARBONATATION :

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

La phénolphtaléine est un composé organique de formule C20H14O4. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme proton née (milieu acide) à la forme dé proton née (milieu basique).[10]

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

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraiche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphtaléine, si la phénolphtaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphtaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées. [28]

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

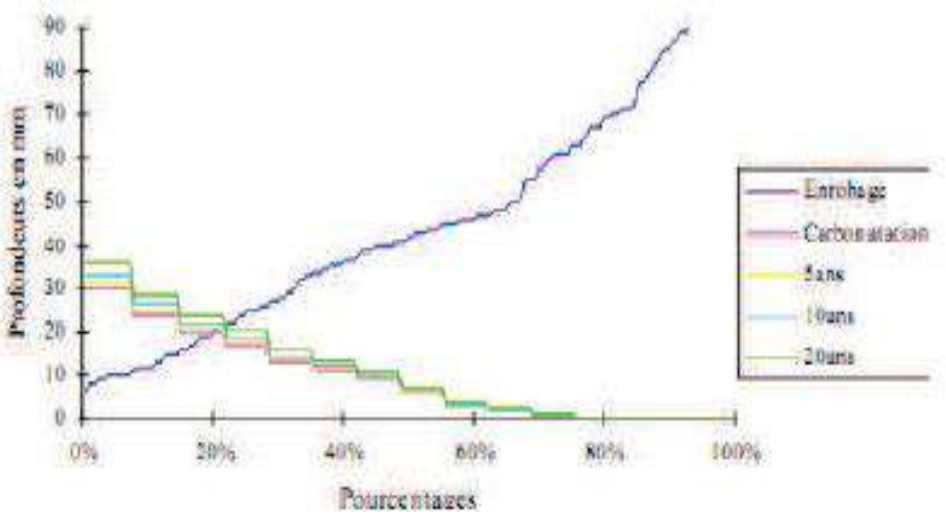


Figure 1-24 : graphique enrobage-carbonatation [28]

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

Il est aussi possible de faire des prévisions sur les évolutions pour les années à venir (courbes jaune, bleu clair et verte). En effet, l'évolution de la carbonatation suit une évolution en fonction du temps du type à Vt, avec « a » un facteur propre à chaque béton. En connaissant l'âge du bâtiment ainsi que la profondeur de carbonatation à l'instant t, il est facile de déterminer le facteur « a ». [28]

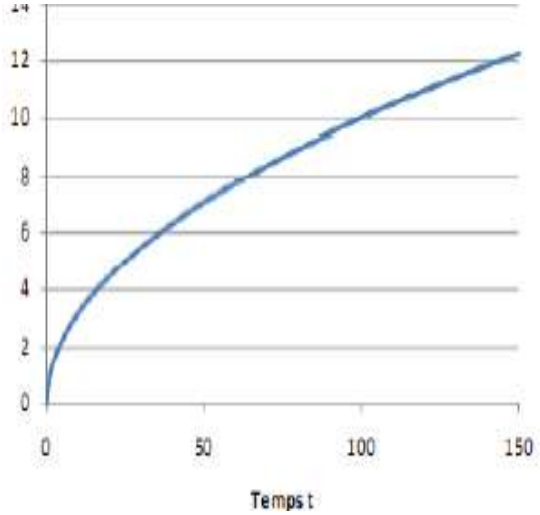


Figure 1-25 : courbe Vt [28]



Figure 1-26 : Carbonatation sur carotte

9.3. CONCLUSION SUR LE DIAGNOSTIC :

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protections adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

➢ 1-Réhabilitation

1.2 Introduction :

Dans le secteur du bâtiment, il existe plusieurs interventions de réhabilitation, de maintenance, de réparation et de renforcement, correspondant à des métiers différents. Mais dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'existant, d'être « réactif » aux gens et aux choses et de mesurer l'enjeu véritable de chaque opération envisagée.

Toutefois, il faut noter que les domaines d'action auxquels correspondent ces interventions, bien que comportant une partie commune qui est bien sûr le diagnostic, doivent être distingués l'un de l'autre.

1.3 Notions de réhabilitation :

1.3.1 Définitions générales :

Conservation:

Englobe l'ensemble des actions destinées à prolonger le temps de vie d'un bâtiment. Elle implique la prise de mesures destinées à sauvegarder et à empêcher la dégradation, y compris les opérations de maintenance nécessaires au bon fonctionnement de toutes les parties et éléments d'un édifice [33].

Restauration:

Englobe l'ensemble des actions nécessaires à la conservation d'un édifice et à la récupération de son image qu'il s'agisse de sa conception originale ou du moment historique où il a atteint son apogée, en maintenant la plus grande fidélité possible aux techniques et matériaux de construction de l'époque [34].

Revitalisation:

Englobe les opérations destinées à relancer la vie économique et sociale d'une partie de la ville en décadence. Cette notion proche de la réhabilitation urbaine s'applique à toute zones de la ville, sans ou avec identité et caractéristiques marquées [33].

Rénovation urbaine :

Englobe les actions qui s'attaquent à un tissu urbain dégradé, en l'éliminant pour le remplacer par une occupation nouvelle et actuelle, attribuant à la zone une nouvelle structure urbaine et fonctionnelle généralement avec ou sans lien avec la préexistante, [34].

Entretien et maintenance :

Travaux ayant pour but de maintenir dans leur état initial le bon fonctionnement des ouvrages existant, en luttant contre leur vieillissement et leur usure naturelle, sans changer leur usage ni la nature de prestations qu'ils peuvent offrir [35], [36].

Réhabilitation:

Englobe l'ensemble des actions en vue de récupérer et d'améliorer un édifice en l'adaptant à un usage de confort moderne [36].

L'objectif fondamental consiste à éliminer les anomalies constructives ou fonctionnelles accumulées au cours du temps, à moderniser installations, équipements et organisation des espaces, améliorant ainsi son fonctionnement et le préparant à une utilisation actuelle [33].

Réhabilitation urbaine :

C'est une stratégie de gestion urbaine qui cherche à requalifier la ville existante à travers des interventions multiples destinées à mettre en valeur des potentialités socio-économiques et fonctionnelles afin d'améliorer la qualité de vie des populations résidentes. Cela exige l'amélioration des conditions physiques du parc bâti par sa réhabilitation et l'établissement d'équipements, d'infrastructures et d'espaces publics tout en maintenant l'identité et les caractéristiques de la zone de la ville concernée [34].

Selon le degré de vétusté des ouvrages, on peut classer la réhabilitation en trois catégories [37] :

- ✓ **Réhabilitation légère :**

Elle concerne les bâtiments sous équipés dont la structure porteuse ne présente pas de faiblesse particulière. Elle consiste à une réorganisation des espaces ou à une amélioration du confort thermique et acoustique. Elle touche :

- Les enduits ;
- Le nettoyage ;
- Le remplacement de la menuiserie.

- ✓ **Réhabilitation moyenne :**

Elle concerne les immeubles qui demandent l'amélioration de certain confort et le renforcement des structures porteuses ainsi que le changement de certains équipements :

- Réfection de l'électricité et des peintures ;
- Amélioration du confort acoustique ;
- Installation des pièces d'eau ou d'ascenseur.

- ✓ **Réhabilitation lourde :**

Elle concerne les bâtiments dont la structure porteuse est sérieusement endommagée et l'état d'usure est très avancé. Il s'agit dans ce cas de renforcer la structure ou de la remplacer.

La restauration et la réhabilitation se distinguent par leur rapport à la continuité et au changement. L'une est dévolue au maintien de la forme bâtie, sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu ; l'autre transforme un bâtiment pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette modification d'un lieu existant impose des

arbitrages entre les exigences patrimoniales, sociales et économiques, qui nécessitent la médiation d'un acte architectural fortement empreint de culture [34].

1.3.2 Pas de bonne réhabilitation sans le diagnostic :

Améliorer un bâtiment, c'est organiser son passage entre deux états : ce qu'il est et ce qu'il sera. Cette opération nécessite donc des idées aussi précises sur ce que sera le bâtiment après les travaux que sur ce qu'il est avant sa transformation.

A défaut de pouvoir disposer de plans préétablis, le premier acte de diagnostic consiste à établir un relevé dimensionnel du bâtiment existant qui permettra non seulement de disposer des éléments cotés indispensables mais aussi de repérer les observations effectuées lors de la visite des locaux. Il est complété par un constat méthodique et général des divers éléments du bâti tant au niveau des structures que de second œuvre. La recherche de tous ces indices d'appréciation ne peut être confiée qu'à une personne ayant de bonnes connaissances des divers systèmes constructifs et de leur pathologie ainsi qu'une certaine expérience pratique [38], [34].

En ce qui concerne les structures, il s'agit de déterminer les emplacements et les caractéristiques des éléments principaux (mur, poteaux, poutres, chaînages…), les détériorations apparentes ou cachées (fissurations de murs et de cloisons, décollement d'enduit, affaissement de plancher, déversement de mur de façade…) de repérer les ouvrages spéciaux ayant une incidence sur la stabilité du bâtiment (cheminées, conduits divers, chevêtres…).

Pour le second œuvre et les équipements, il est nécessaire de recueillir toutes les informations sur leur constitution, leur état, leur aptitude à assurer le service ou la fonction pour laquelle ils sont prévus, compte tenu des exigences actuelles dans ce domaine.

Cette recherche sera effectuée en faisant appel à l'observation visuelle de toutes les parties visibles, à l'auscultation par des moyens non destructifs, de zones sensibles ou à des sondages ponctuels aux points délicats.

Dans cette phase, le responsable du diagnostic sera amené à utiliser divers appareils qui lui permettront [38], [37]:

- d'affiner ses observations visuelles, ou de les compléter;
- de détecter les pièces métalliques incluses dans les ouvrages ou les canalisations diverses desservant les bâtiments ou les locaux;
- de repérer les parois ou les ambiances humides;
- d'évaluer la qualité de l'isolation thermique ou acoustique;
- de préciser les caractéristiques de résistances, de dureté superficielle de certains éléments ou l'épaisseur de film de peinture.

1.3.3 Décider de réhabiliter :

Les critères qui rentrent en jeu dans la conservation des bâtiments sont nombreux et subjectifs: pour l'habitant, la localisation est prioritaire ; pour l'historien, la mémoire prime ; pour l'architecte, la qualité d'élaboration l'emporte ; pour les associations, l'image du quartier

domine. La décision de réhabiliter peut être emportée sur des critères économiques, patrimoniaux ou sociaux [34].

Cependant, les enjeux techniques et économiques en présence ramènent le plus souvent l'équation à quelques paramètres [39], [34] :

- La valeur patrimoniale du bâtiment (au sens culturel, qui comprend l'ancienneté, la rareté et la beauté), ou son appartenance à un ensemble dont la cohérence doit être conservée ;
- La surface qu'il occupe, comparée au droit à construire en cas de démolition / reconstruction, ainsi que les servitudes d'éclairement et de prospect qui ont pu également évoluer; ces critères sont souvent déterminants pour les bâtiments situés en ville;
- L'adéquation de sa typologie (épaisseur construite, trame de structure, éclairement) à l'évolution souhaitée pour son occupation, et l'importance des travaux à engager pour l'atteindre;
- La présence des occupants et l'incidence sur leur vie quotidienne des scénarios de réhabilitation ou de reconstruction envisagés
- La possibilité ou non d'interrompre l'activité du bâtiment;
- La comparaison en coût global - c'est- à –dire travaux + accompagnement social éventuel + coût d'entretien ou d'exploitation après travaux – entre la réhabilitation de l'édifice et sa démolition / reconstruction.

1.3.4 Entretenir / réhabiliter / reconstruire :

Il appartient au diagnostic d'analyser ces paramètres et de motiver le choix du mode d'intervention sur le bâtiment.

Dans certaines situations, mieux vaut l'entretenir davantage ou augmenter son coût de fonctionnement que le réhabiliter. C'est le cas, par exemple, de certaines défaillances thermiques ou d'un défaut qui rend les façades salissantes : l'installation d'une chaudière plus puissante ou un nettoyage plus fréquent seront mis en balance avec l'option d'une réforme complète. Dans d'autres cas, à l'inverse, mieux vaut reconstruire que réhabiliter : les réhabilitations " lourdes" engagées sur des bâtiments en mauvais état, ou peu ré appropriables, entraînent des restructurations plus chères que la construction neuve, et un déficit qualitatif en termes d'usage et de gestion. Ce type de travaux devrait être réservé à des édifices ayant des qualités rares ou une situation urbaine exceptionnelle.

Une qualité spécifique de la réhabilitation tient dans l'exploitation des particularités d'un bâtiment. Les aménagements qui remettent en cause profondément le parti structurel ou distributif d'origine et ne conservent, par exemple, qu'une façade, ignorent l'intérêt que représente ce dialogue entre les époques, et portent préjudice à la cohérence d'un édifice généralement pensé comme tout. Ils engagent des budgets élevés et ont des conséquences importantes pour les usagers qui doivent déménager ou subir de longs travaux [40], [34].

1.3.5 Déroulement du processus de réhabilitation :

L'expérience acquise, au cours du déroulement de plusieurs opérations de réhabilitation, nous conduit à proposer la prise en compte d'éléments qui nous paraissent fondamentaux dans l'exercice d'une ingénierie spécifique [33]:

- ✓ **Etablissement d'un cadre de programmation :**

Les résultats des diagnostics préalables et de la collaboration avec les différents responsables doivent permettre de définir les objectifs et les orientations du programme et de fixer certaines exigences.

- ✓ **Esquisse d'avant-projet de conception :**

Sur la base de ces orientations il est souhaitable de demander aux concepteurs d'explorer différentes possibilités de transformation et de faire des propositions visant à compléter, préciser le cadre de programmation qui leur été fourni, mais susceptible également d'être en partie réorientée.

- ✓ **Vérification de la faisabilité :**

Une pré-consultation restreinte des entreprises peut alors permette de s'assurer de la faisabilité des avant-projets, de les ajuster en fonction des difficultés de réalisation qu'ils risquent de susciter.

- ✓ **Information et consultation des locataires :**

Le cadre de programmation et les avant-projets peuvent être ensuite présentés aux habitants afin de les informer, de connaître les réactions suscitées et recueillir leurs suggestions.

- ✓ **Elaboration du programme provisoire :**

Ces explorations permettent de réaménager le programme provisoire, de l'affiner et de l'enrichir en y intégrant les éléments générés par les phases précédentes.

- ✓ **Elaboration du projet de conception :**

En tenant compte des données recueillis, les concepteurs peuvent établir leur projet de conception sans risquer de le voir remis en cause ou dénaturé :

- Par le maître d'ouvrage estimant qu'ils ont mal interprété le programme ;
- Par les entreprises considérant que sa faisabilité est problématique ;
- Par les habitants et les autres partenaires qui n'y retrouvent pas leurs préoccupations.

- ✓ **Présentation du projet retenu aux partenaires :**

Le projet définitif doit faire l'objet d'une large information auprès des partenaires afin qu'ils se rendent compte des modifications apportées en explicitant les raisons pour lesquelles certaines demandes n'ont pas pu être intégrées.

- ✓ **Expérimentation sur un bâtiment test :**

L'expérimentation sur un bâtiment test correspond à la mise au point d'un prototype dans l'industrie et permet d'identifier les difficultés concrètes de réalisation, de trouver de nouvelles solutions, de recueillir et d'analyser les réactions des usagers.
C'est aussi un processus d'apprentissage de la collaboration entre maître d'ouvrage, concepteurs et entreprises, de rodage des méthodes et des techniques qui permet d'améliorer l'efficacité des responsables avant qu'ils ne se lancent dans la réalisation de l'ensemble du programme.

- ✓ **Mise en point du programme définitif en cours de lancement de l'opération :**

Les renseignements tirés de l'opération test amènent à modifier encore une fois certains éléments de programme et peuvent infléchir le mode de conduite de l'opération.

Le programme doit en effet ménager des possibilités de modifications en cours de réalisation en laissant une marge d'incertitude quant à l'état réel du bâti, la faisabilité de certains travaux, la pertinence des choix effectués.

- ✓ **Rectification lors de la réception des travaux :**

Lors de la réception des travaux il convient de faire une évaluation de l'opération et de recueillir les avis des locataires afin de procéder à certain ajustement.

Des oublis ou des erreurs apparemment mineures peuvent entraîner l'insatisfaction des locataires ou produire rapidement des dégradations du bâti.

- ✓ **Programme post réhabilitation et ajustement un an après la remise en service :**

L'achèvement de la réhabilitation ne doit pas se traduire par un retrait brutal de ses promoteurs. Ceux-ci doivent suivre l'évolution du quartier pendant au moins un an et réagir rapidement à tout nouveau signe de dégradation.

Au bout d'un an il est souhaitable de faire le point de la situation, de recueillir à nouveautés avis des habitants et de procéder aux ajustements nécessaires.

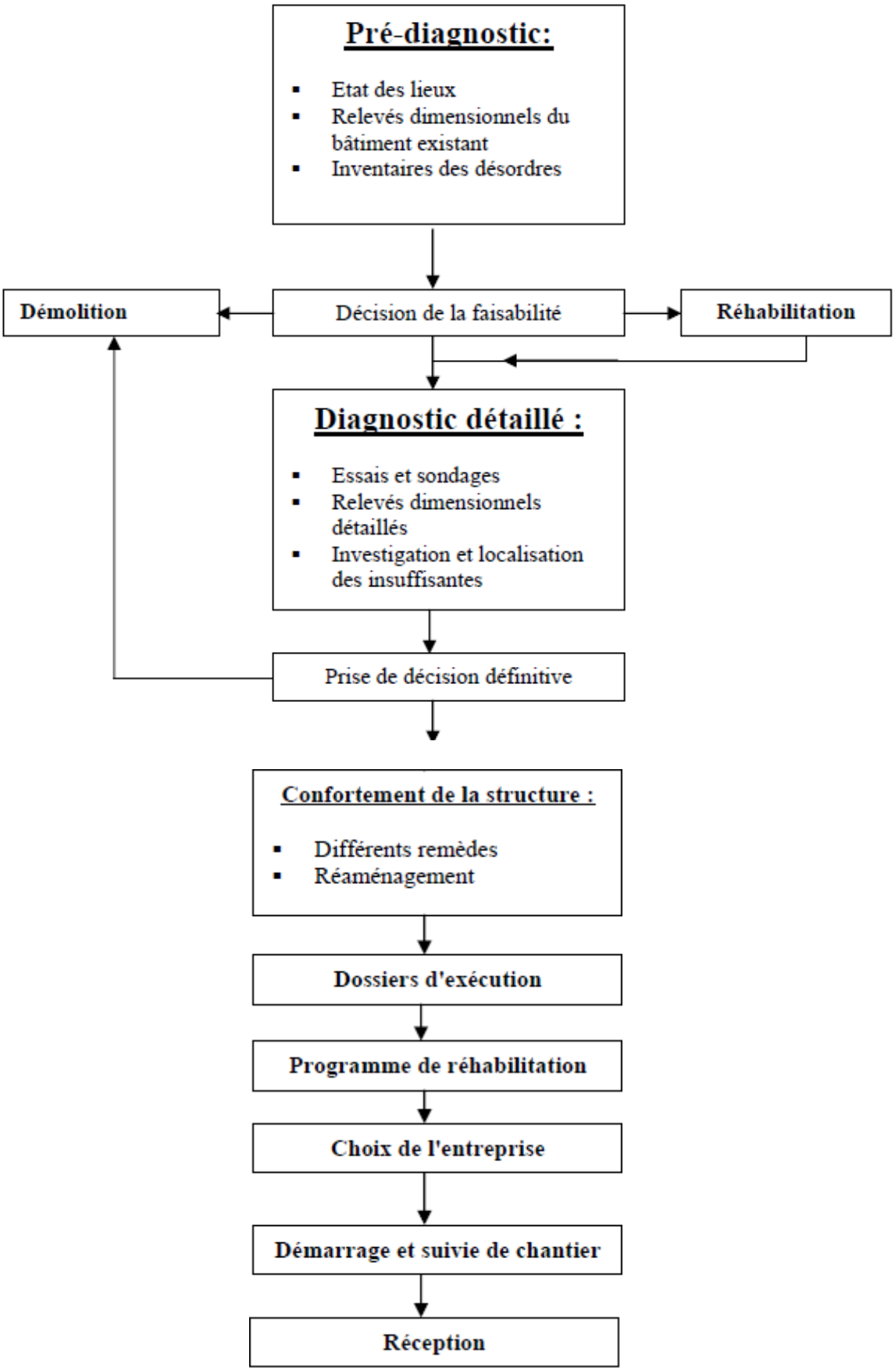


Figure2.1 : Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation.

➢ 2- les causses de dégradation du béton armé

2.1 Les causses généraux

2.1.1 Introduction :

Lorsque nous constatons une dégradation sur un ouvrage en service, il est actuellement difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, à l'analyse, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée par un grand nombre de paramètres.

2.1.2Tassements:

2.1.2.1Tassement uniforme :

Lorsque les tassements sont uniformes, ils ne provoquent pas de désordres dans les constructions, si ces dernières possèdent une certaine raideur. Ce type de tassements se rencontre principalement lorsque les fondations assez rigides reposent sur une importance couche de sol compressible ou une bicouche. Généralement, dans le cas de sol compressible dont la couche est importante toutes les mesures nécessaires sont prises au moment de la conception.

Il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit d'une bicouche constituée d'une couche très compressible surmontée d'une autre couche relativement résistante mais de faible épaisseur ; la force portante à la partie supérieure de la couche compressible est alors fonction de la valeur du rapport H/B (H étant l'épaisseur de la couche résistante et B étant la largeur de la semelle) qui conditionne la répartition des charges au travers de la couche résistante. Cette répartition des charges peut alors être différente de la répartition à 45° et les tassements uniformes peuvent être plus importants que prévu.

Dans les deux cas, si l'amplitude du tassement doit être importante, la seule solution consiste à surélever le plancher du rez de chaussée et de prévoir des canalisations suspendues et très flexibles au moment de la construction [41].

2.1.2.2Tassements différentiels :

Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel.

Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des matériaux.

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles
- Les remblais récents
- Les remblais d'épaisseurs

- Le non homogénéité du sous-sol de fondations
- L'emploi des fondations hétérogènes
- Les affouillements du sol sous les fondations
- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau…

2.1.3 Mouvements de terrains

Les glissements de terrain sont des mouvements qui affectent les talus et les versants naturels. Ils peuvent provoquer des dommages importants aux ouvrages et aux constructions, avec un impact économique sensible, et parfois causer des victimes. Ils surviennent à la suite d'un événement naturel– forte pluie, érosion de berge, séisme, par exemple – ou sont la conséquence plus ou moins directe d'actions de l'homme, telles que travaux de terrassements ou déforestation. L'étude des glissements de terrain et la prévention des risques qu'ils engendrent relèvent de la géologie appliquée et de la mécanique des sols. [42]

Classification des mouvements de terrains

De nombreuses classifications ont été proposées pour rendre compte de la diversité des mouvements de terrain. Les principaux critères de classification retenus sont:

• Types de terrain affectés.

• Types de mouvements.

• Vitesse des processus.

• Taux de remaniement des matériaux après le mouvement.

Les mouvements de terrain les plus fréquents sont classés en : Glissements, Coulées, Ecroulement, Fluages.[42]

2.1.3.1 Les glissement

Ils se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles..).



Figure2.2 : glissement de terrain provoquant effondrement du voile et poteau sur vide sanitaire [42]

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissements :

• Glissement plan.

• Glissement rotationnels simples.

• Glissement rotationnels complexes (composés).

2.1.3.1.1 Glissement plan

Il se produit suivant un plan, au niveau d'une surface de discontinuité géologique : zone entre deux matériaux de nature différente, failles, plans de stratification. La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ». [42]

Glissements rotationnels ou circulaires

Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère. On distingue le glissement rotationnel simple et complexe.

2.1.31.2Glissement rotationnel simple

Dans Ce type de glissement. La surface de rupture à une forme simple et peut être assimilée à un cylindre. On distingue (figure2.3) : au sommet des fissures de traction et un escarpement, c'est le départ de la surface de glissement, et à la base un bourrelet formé par des matières glissées.

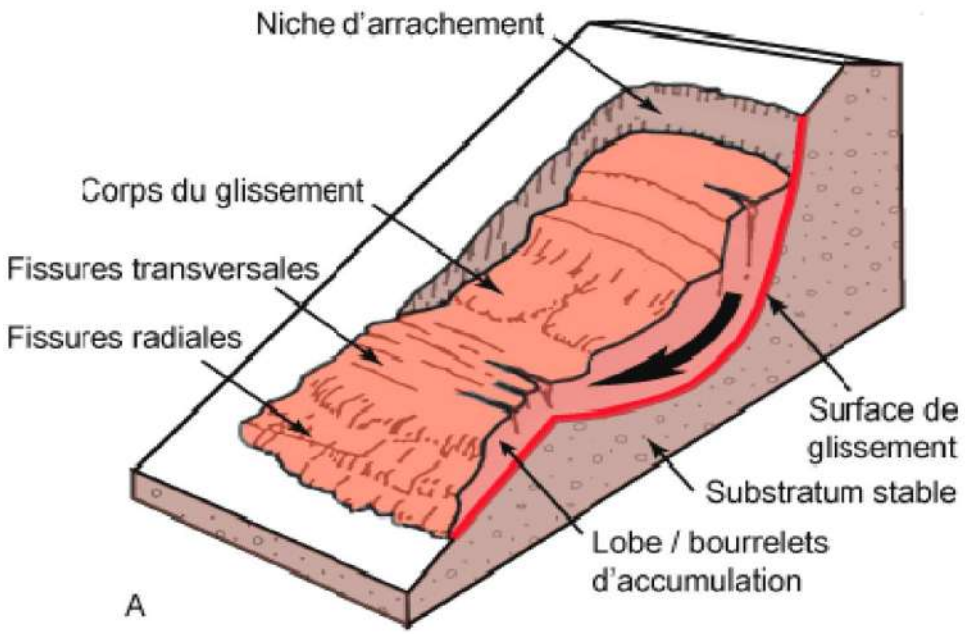


Figure 2.3 : Glissement rotationnel simple [42]

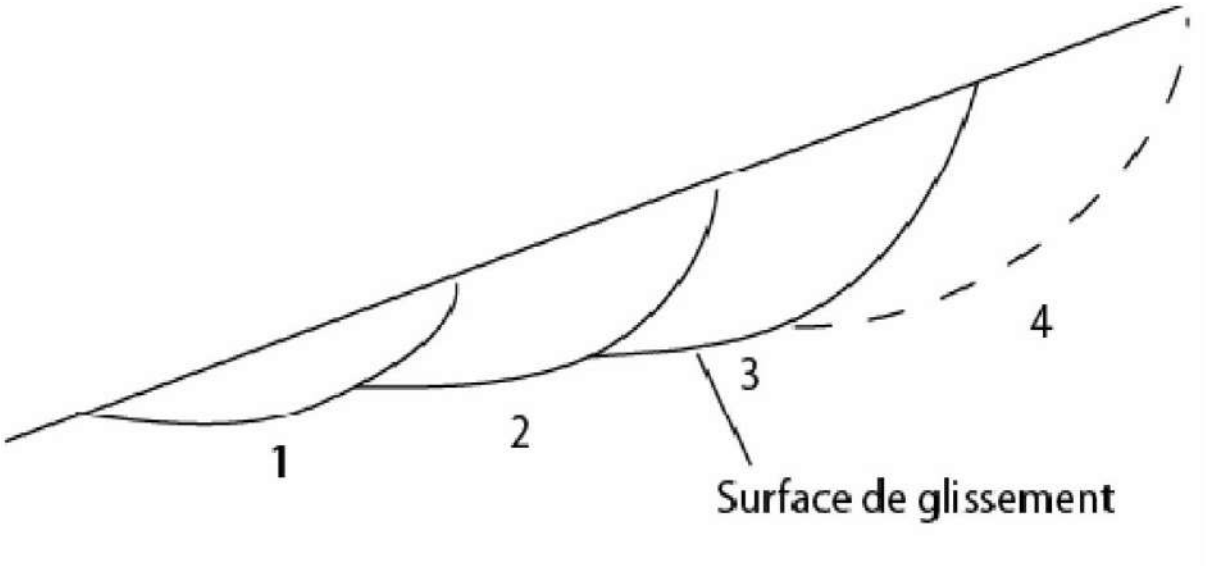


Figure 2.4 : Glissements successifs emboîtés [42]

2.1.3.1.3 Principales causes des glissements :

Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- la nature des terrains : les terrains argileux sont prédisposés aux glissements.
- l'action de l'eau : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- les causes mécaniques externes : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus
- stables, toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines …).[42]

2.1.3.1.4 Les coulées

Elles se produisent à partir de matériel meuble, momentanément saturé en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité (fig II.31).

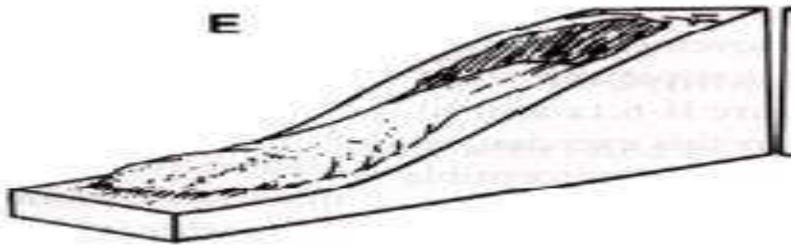


Figure 2.5 : Coulée de boue[42]

2.1.3.1.6 Les écroulements

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses (Figure2-6), qui se détache d'une paroi en se désorganisant.

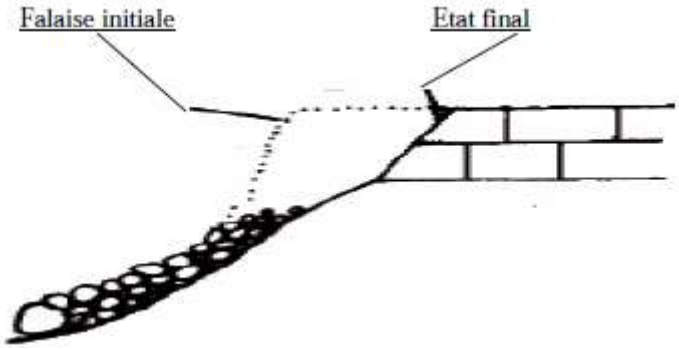


Figure2.6 : Ecroulement [42]

2.1.3.1.6 Le fluage

Il correspond à des mouvements lents, dus à des sollicitations proches de la rupture (domaine plastique). Dans l'exemple de la figure II.33, le banc de marne flue sous le poids de la falaise calcaire. Ceci peut provoquer une fissuration du banc calcaire peu déformable et un risque d'écroulement de la falaise.

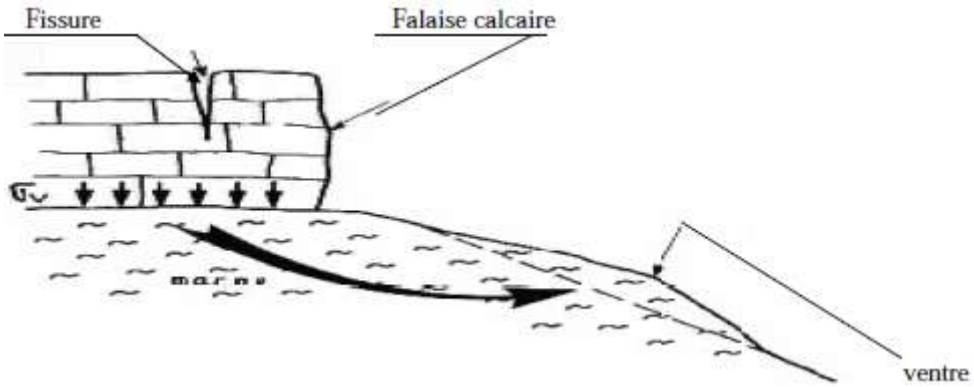


Figure2.7 : Exemple de fluage [42]

La forme de la surface de rupture dépend de La nature des couches rencontrées par le glissement, la largeur du décollement, le relief de la crête, les surcharges, l'humidité, …Parmi les différents cylindres de rupture possibles, les plus probables sont ceux qui passent non loin du pied du talus.

C'est les plus dangereux.

Exemple : d'un cas de glissement au pied d'une colline

Après l'élargissement d'une route au pied d'une colline, un vaste glissement de terrain se produisit, Le sol était constitué d'un éboulis argileux de faibles compacités souvent humidifié par le ruissellement des eaux de pluie qui dévalent la pente vers le cours d'eau. Un mur de soutènement réalisé et bloqué à l'arrière par un remblai. Quelques mois après, pendant une période particulièrement pluvieuse, la colline se mit à glisser lentement entraînant les habitations avec elle; le mur de soutènement se renversa et la route fut partiellement recouverte d'argile boueuse.

Cause du glissement:

le sol a été décomprimé. De plus, le remblai derrière le mur était de tout venant, trop grossier; il fut vite contaminé par l'argile ce qui continua à le décomprimer. La présence de veines de sable à peu près planes, orientés suivant la pente ont facilité le glissement qui se poursuit très haut dans la colline.

Exemples de différents cas de glissement

Glissement dû à une surcharge en tête

Dans les régions accidentées, Il suffit parfois qu'une surcharge soit ajoutée au terrain naturel, par une construction ou l'amoncellement de matériaux, pour qu'un éboulement se produise. La rapidité d'application de la surcharge peut aussi avoir une influence néfaste si le terrain en cause est une argile de faible activité colloïdale, gorgée d'eau, qui tend très vite vers l'état liquide quand on le comprime.

Exemple :

Un réservoir neuf se fissure gravement à sa mise en eau.

Des fuites abondantes révélèrent de graves fissures dans les parois et le radier du réservoir. Il fallut le vider d'urgence.

Cause :

Le réservoir subit un grave tassement qui menaçait de se transformer en vrai glissement de terrain. Le sinistre est dû à la synergie d'au moins cinq causes superposées :

1. La surcharge apportée est très supérieure relativement à ce qui était prévu,

2. Le terrain d'assise était gorgé d'eau car la fouille constituait un réceptacle d'eau pluviale sans exutoire ;

3. Le sol était hétérogène,

4. Le chargement des 3000 tonnes d'eau se fit en quelques heures ;

Ces conditions ont pour effet de réduire temporairement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau.

5. L'orientation défectueuse des plans de schistosité menaçait de transformer le tassement local en glissement de terrain.

Ces causes ont provoqué le tassement de l'ouvrage et sa fissuration. [42]

2.1.4 Conclusion

Les terrassements, posent beaucoup de problèmes, parfois difficiles à maîtriser. C'est qu'ils viennent perturber dans son équilibre un sol aux propriétés complexes, mal connues et variables dans le temps. Pour les petites fouilles, on fait face aux difficultés par l'acceptation d'un certain risque d'éboulement quand il n'y a pas danger corporel, par le blindage systématique lorsqu'il faut protéger les ouvriers. Pour de plus grands mouvements de terre, une étude du sous-sol sérieuse est indispensable : reconnaissance du terrain par des sondages et d'éventuels essais de laboratoire et enquête sur les eaux souterraines. De plus, à côté de mesures sophistiquées réalisées par les géotechniciens, qui vaudront ce que vaut l'emplacement des sondages et le choix des échantillons, la longue expérience des habitants de l'endroit et des terrassiers de là l'emplacement des sondages et le choix des échantillons, la longue expérience des habitants de l'endroit et des terrassiers de la région est sans doute une source d'informations à ne jamais négliger. [42]

Relations de cause(s) à effet(s)

Le tableau 2-1, représente des Relations de cause(s) à effet(s)

Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epaufrure	Désagrégation	Activité
A. Causes survenant avant durcissement				
1) ségrégation du béton	x			x
2) ressuage	x			x
3) retrait à l'état plastique	x			x
B. Causes survenant au début et pendant le durcissement				
1) modification du support ou du coffrage	x	x		x
2) effet du gel sur béton jeune	x	x	x	x
3) retrait	x			x
C. Causes survenant après durcissement				
1) effet thermique				
- déformation empêchée/différentielle	x	x		xx
- gel/dégel		x	x	xx
- incendie	x	x	x	x
2) effet de l'eau				
- effet absorption d'eau/séchage	x	x		xx
3) effet chimique				
- attaque en surface			x	xx
- réaction chimique avec expansion	x	x	x	xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/concentration de tension				
- statique	x	x		xx
- dynamique	x	x		xx
- impact et tremblements de terre	x	x		x
- érosion			x	xx

Tablue2.1 : Relations de cause(s) à effet(s)[54]

2.2 LES CAUSSES PRINCIPAUX

2.2.1 FISSURATION

2.2.1.1 INTRODUCTION

La fissuration des ouvrages en béton et en béton armé correspond généralement à une altération des propriétés mécaniques, ou physiques du matériau. La connaissance exacte de ce type de désordre doit permettre en outre d'en comprendre la cause et de définir le type de réparation à envisager. Les fissures peuvent survenir dans le béton non durci, le béton en phase de durcissement ou le béton durci. Dans le cas du béton durci, les fissures se forment lorsque les forces de traction dépassent la résistance à la traction du béton.

Une fissuration non prise en considération lors de la conception de la structure et donc non contrôlée peut provoquer des effondrements et donc provoquer des pertes humaines et des dégâts matériels.

2.2.1.2 NATURE DE FISSURATION EN BETON ARME

La fissuration est nuisible au béton armé, matériau de construction le plus largement utilisé à travers le monde en raison de sa souplesse d'utilisation et de son adaptation. En service, ce matériau se fissure à cause des charges qu'il supporte ou des phénomènes physiques qu'il subit, tels que le retrait et les effets de températures.

La présence de fissures sur une structure en béton armé témoigne généralement d'un endommagement de cet élément, les causes peuvent être de différentes natures : mécaniques (application de contraintes non prévues lors du dimensionnement, choc, etc.), physiques (variations de température) ou chimiques (réaction des composants du béton avec des agents extérieurs créant un gonflement du matériau, par exemple les attaques sulfuriques), ou bien encore le processus de retrait du béton.

Différentes études ont été menées afin de préciser les différents paramètres décrivant les fissures et leur processus de formation (Gérard et al; 1997). Les fissures primaires sont créées lors d'un chargement inhabituel du matériau, et les fissures secondaires (moins importantes) apparaissent dans un second temps et contribuent à la fermeture partielle de certaines fissures primaires. On peut distinguer les fissures actives et les fissures passives. Gérard et al appellent fissures actives celles qui affectent les propriétés mécaniques et de transfert des efforts du matériau.

Les fissures passives, perturbent essentiellement les propriétés mécaniques du matériau et ne sont activées que lorsque la structure est mise en charge. Selon la norme NFP95-103 (AFNOR, 1993), une fissure est dite active quand son ouverture évolue en fonction des sollicitations de différentes natures (thermique, hydrique, mécanique). Une fissure est dite passive quand son ouverture ne varie plus de façon sensible même quand elle est soumise aux diverses sollicitations.

Pour le béton armé, les facteurs « efficacité » et « économie » sont étroitement liés à toutes les phases de la conception. Ceci implique l'utilisation de ce matériau à des niveaux de contraintes élevées et par conséquent soumet l'élément de structure à des risques de fissuration pouvant affecter son esthétique et sa performance. Cette fissuration étant due au

fait que le matériau béton est faible en traction donc susceptible de se fissurer sous des contraintes élevées ou des conditions hostiles de l'environnement.

Il est à noter que malgré la présence de l'acier pour reprendre les contraintes de traction dans les éléments en béton armé, les fissures ne sont pas éliminées. Dans ce sens, les fissures crées par les charges de flexion sont non seulement inévitables mais réellement nécessaires pour que les armatures puissent être utilisées efficacement. Par exemple, avant la formation des fissures de flexion, les contraintes des aciers ne dépassent pas n fois la contrainte dans le béton adjacent, avec n : coefficient d'équivalant. $n = \frac{E_s}{E_c}$; pour le béton courant et les aciers utilisées dans la pratique n avoisine huit

Ainsi, quand le béton est proche de sa résistance à la traction ou de son module de rupture qui est de l'ordre de 3,5 Mpa, la contrainte dans les aciers sera 8x3, 5 =28 Mpa .

Ce qui est très faible comme contrainte pour que les armatures soient effectives et donc la conception est économique. Sous les charges de service normales, les contraintes des aciers sont de l'ordre de 8 à 9 fois cette valeur (pour un acier de haute adhérence) après fissuration. La plupart des fissures résultent des actions suivantes agissant sur l'élément en béton:

a- Variation de volume dû au retrait et à la variation de la température.

b- Des contraintes directes dues aux charges appliquées, aux réactions ou aux effets de continuité; de même que celles dues aux effets de la fatigue crées surtout par les charges réversibles ainsi que les contraintes créées par les mouvements différentiels dans les structures.

c- Les contraintes de flexion causées par les moments.

2.2.1.3 DIFFERENTS TYPES DE FISSURATION

Puisque la fissuration peut compromettre la durabilité du béton en permettant aux agents agressifs d'y pénétrer, il est pertinent de passer brièvement en revue les différents types de fissuration.

On peut classer la fissuration du béton en deux catégories [43] :

1ère catégorie : les fissures causées par les charges externes appliquées à la structure (action (b) et (c)).

Exemple : fissures dues à la flexion, fissures inclinées dues à l'effort tranchant.

2ème catégorie : les fissures causées par le retrait et celles causées par les effets thermiques.

2.2.1.3.1 FISSURES INDUITES PAR LES CHARGES EXTERNES

La fissuration peut être provoquée par l'application d'une charge excessive compte tenu de la résistance du béton, mais, dans ce cas la fissuration est la conséquence soit d'une erreur de conception, soit d'une réalisation non conforme aux spécifications du projet. Il est important de se rappeler que, dans les conditions normales d'utilisation du béton armé, les armatures ainsi que le béton d'enrobage subissent des efforts de traction. La fissuration de surface est par conséquent, inévitables, mais, avec une conception structurale et des détails de construction adéquats, les fissures demeurent très fines et sont à peine perceptible. Les fissures causées par les contraintes présentent une ouverture maximale à la surface du béton et une ouverture effilée presque nulle près des armatures, mais la différence de largeur peut diminuer avec le temps. La largeur des fissures en surface augmente avec l'épaisseur de l'enrobage de béton.

Nous noterons que, sur le plan des efforts, il est plus facile d'ouvrir une fissure existante que d'encrée une nouvelle. Ceci explique pourquoi, sous l'action d'une charge, chaque nouvelle fissure apparaît à une charge plus élevée que la fissure précédente. Le nombre total de fissure apparue est déterminé par la dimension de l'élément en béton et l'espacement entre fissure dépend de la dimension maximale des granulats utilisés. Puisque, pour des conditions physiques données, la largeur totale des fissures par unité de longueur de béton demeure constante et que l'on souhaite que les fissures soient aussi fines que possible, il est souhaitable d'avoir un nombre élevé de fissures. Pour cette raison, toute entrave à la fissuration devrait être uniformément répartie sur toute la longueur de l'élément de béton. La disposition des armatures permet de contrôler la fissuration de retrait, notamment en réduisant la largeur des fissures individuelles, mais non pas la largeur totale de l'ensemble des fissures.

Les charges externes conduisent à des fissures de flexion, des fissures de traction diagonales ou des fissures d'adhérence.

Quand la contrainte de traction dans le béton atteint sa résistance à la traction, des micro-fissures ou fissures d'interface se forment à l'intérieure de l'élément. Ce sont des fissures courtes très fines, réparties entre la pâte de ciment et le long des granulats.

Plusieurs études ont montré qu'il existe, même avant l'application de toute charge, de très petites fissures à l'interface pâte de ciment-granulat Ces fissures sont probablement attribuables aux différences inévitables entre les propriétés mécaniques existant entre les gros granulats et la pâte de ciment hydraté, couplées au retrait ou aux déformations d'origine thermique. La microfissuration a été observée, non seulement pour les bétons de résistance normale, mais également des bétons mûris à l'eau ayant un rapport eau / ciment aussi faible que 0.25, et ce, avant tout chargement. Les fissures présentes dans le béton avant le chargement sont en grande partie responsables de la faible résistance à la traction du béton.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de définition universelle au sujet de l'ouverture des microfissures, mais une limite supérieure de 0,1mm a été suggérée, ce qui correspond en fait à la dimension minimale pouvant être détectée à l'œil nu.

Avec l'augmentation de la charge, ces microfissures demeurent stable jusqu'à environ 30 % de la charge maximale, après quoi elles commencent à s'allonger, à s'élargir et à se multiplier. La contrainte totale sous laquelle ces microfissures se développent est sensible au rapport

eau/ciment de la pâte. Ceci correspond au stade de la propagation des fissures.

Avec l'augmentation de la charge, entre 70 et 90 % de la résistance maximale, les fissures s'ouvrent à travers le mortier (pâte de ciment et granulat fin) et s'interconnectent de manière à former un réseau continu de fissurations. Ceci correspond au stade de la propagation rapide de la fissuration, le niveau de contrainte à partir duquel la fissuration se propage rapidement est plus élevé pour les béton à haute résistance que pour les bétons usuels. Cependant, les bétons à haute résistance présentent une longueur cumulative de microfissures plus petite que les bétons de résistance normale du fait que les Bétons à Haute Performance sont moins déformables que les Bétons Ordinaires. Les microfissures peuvent s'orienter dans n'importe quelle direction, être disposées en forme de réseau ou avoir une orientation précise (fig.2.8).

Il ressort de ce qui précède que la microfissuration est une particularité du béton. Rapidement, ces microfissures se développent en macro fissures qui se propagent vers l'extérieur et peuvent être classifiées de manière simplifiée en fissures d'effort tranchant et fissures de flexion.

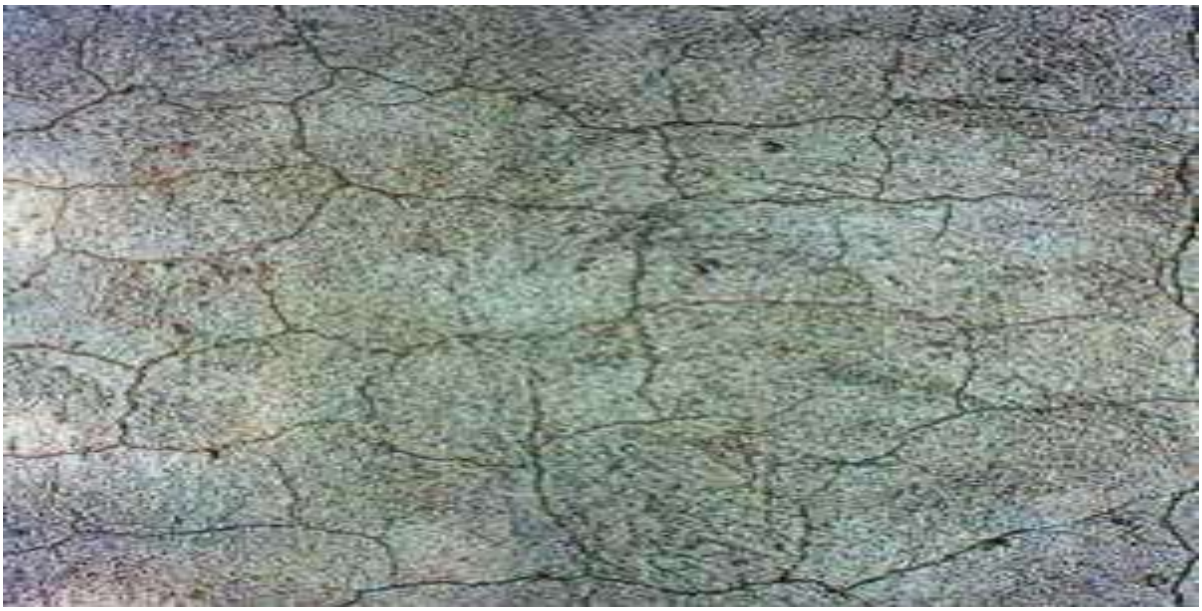


Figure 2.8: Réseau de fissures de surface [43].

Après développement complet de la première fissure dans un élément en béton armé, la contrainte dans le béton de la zone fissurée est réduite à zéro et est redistribuée aux aciers.

La formation de la fissure repousse l'axe neutre vers le haut, réduisant ainsi la zone de compression (figure2.9).

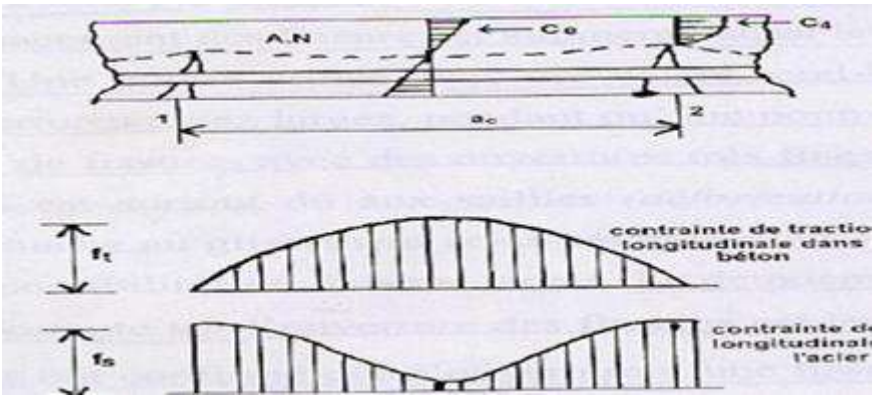


Figure 2.9: Réduction de la zone de compression et redistribution des contraintes de bétons aux aciers [43]

2.2.1.3.2 FISSURES INDUITES PAR LE RETRAIT ET LE CHANGEMENT DE TEMPERATURE

L'importance du retrait dans les structures est liée à la fissuration qui peut s'y produire.

La fissuration se produit parce que le retrait est empêché et que la résistance à la traction du matériau fissura blé est plus petite que l'effort produit par le retrait. Ces efforts sont dus au fait que l'évaporation de l'eau ne se produit pas uniformément dans toute la masse du matériau, mais progressivement, par couches successives, de la surface vers l'intérieur.

Strictement parlant, le point le plus important est la tendance à la fissuration parce que l'apparition ou l'absence de fissuration dépend, non seulement de la contraction potentielle, mais aussi de l'extensibilité du béton, de sa résistance ainsi que du degré de restriction opposé à la déformation qui peut conduire à la fissuration. Une diminution de la section des armatures ou un gradient de contrainte augmente l'extensibilité du béton en ce sens qu'ils permettent de supporter une déformation bien au-delà de la contrainte maximale correspondante. Une forte extensibilité du béton est généralement souhaitable puisqu'elle permet au béton de supporter des variations volumétriques plus importantes.

Un des paramètres les plus importants qui conditionnent la fissuration est le rapport eau /ciment du béton, car son augmentation tend à augmenter le retrait et dans le même temps à diminuer la résistance du béton. Une augmentation du dosage en ciment augmente aussi le retrait, et donc la tendance à la fissuration, mais l'effet sur la résistance est positif. Ceci s'applique au retrait de séchage. Par contre, la présence d'argile dans les granulats conduit à la fois à une augmentation du retrait et à une fissuration plus importante. L'utilisation d'adjuvants peut influencer la tendance à la fissuration par le jeu combiné des effets sur le durcissement, le retrait et le fluage. De façon plus spécifique, les retardateurs de prise peuvent entraîner plus de retrait sou forme de retrait plastique, et augmentent probablement, l'extensibilité du béton, ce qui permet de réduire la fissuration. A L'opposé, si le béton atteint un état rigide trop rapidement, il ne peut encaisser ce qui aurait été le retrait plastique et, du fait qu'il a une résistance faible, il se fissure. La température au moment de sa mise en place détermine les dimensions du béton au moment où il cesse de se déformer de façon plastique (c'est-à-dire sans perte de continuité). Une baisse ultérieure de la température produira une contraction potentielle. En conséquence, la mise en place d'un béton par temps chaud entraîne une forte tendance à la fissuration. De forts gradients de température ou d'humidité

provoquent de fortes contraintes internes et, de ce fait, entraînent une tendance élevée à la fissuration.

On doit noter, toutefois, que l'importance de la fissuration et l'ouverture minimale à partir de laquelle une fissure peut être considérée comme signifiante dépendent des conditions d'exposition du béton dans le milieu environnant.

L'utilisation d'armatures à section plus faible, réparties uniformément sur l'élément, permet d'augmenter l'extensibilité du béton donc son comportement à la traction et d'avoir une fissuration plus fine.

Un autre type de fissuration, connu sous le nom de faïençage (figure2.10) qui correspond à l'apparition de nombreuses fissures très fines qui forment un réseau hexagonal ou octogonal. Ces fissures sont peu profondes et assez rapprochées. Mis à part l'aspect esthétique, ces fissures ont peu d'importance. Ce type de fissuration peut apparaître sur les dalles ou les murs lorsque la zone superficielle du béton présente une teneur en eau plus élevée qu'à l'intérieur, ainsi qu'une couche superficielle riche en ciment subira de plus grande contraintes qu'une autre couche moins riche en ciment et sera donc plus sujette à se faïencier.

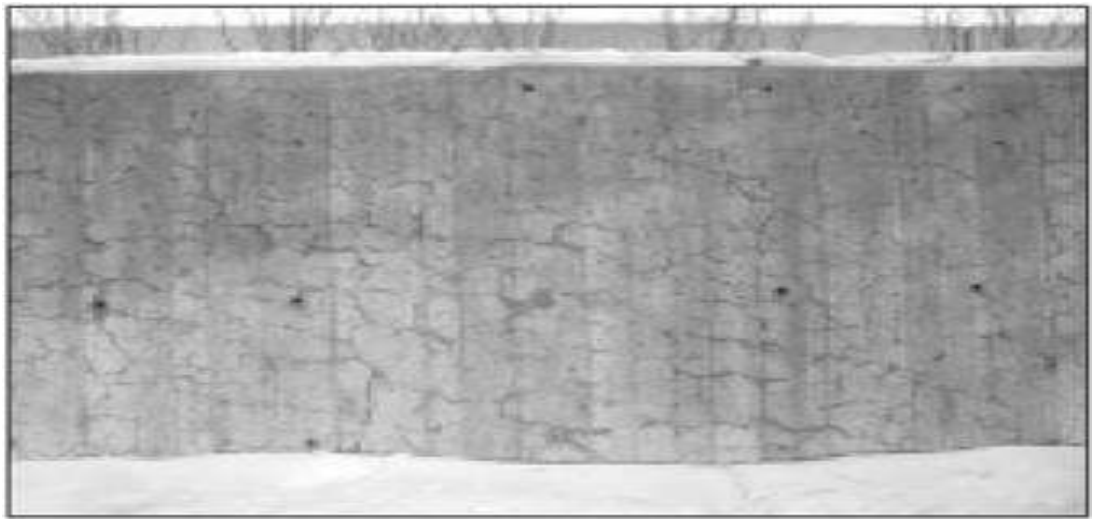


Figure 2.10 : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis silice dans un mur de soutènement [43]

En plus, un type de détérioration quelque peu différent, se présentant comme des cloques, peut survenir lorsque de l'eau de ressuage ou de grosses bulles d'air sont emprisonnées sous la surface du béton par une mince couche de laitance lors des opérations de finition et de surfaçage. Ces cloques ont un diamètre compris entre 10 et 100 mm et une épaisseur de 2 à 10 mm [43].

Avec le temps, la mince couche de laitance se détache de la surface, laissant une empreinte peut profonde.

2.2.1.3.2.1 FISSURES DE RETRAIT PLASTIQUE

L'importance du retrait dans les structures en béton armé est essentiellement rattachée à la fissuration. La contraction ou l'accourcissement d'une pièce provoque des tensions internes qui tendent à s'opposer au changement de dimension. Cette opposition au changement de dimension est due à des obstacles internes tels que les agrégats, les armatures et le retrait non uniforme dans l'élément de béton (plus important près des surfaces que vers l'intérieur où il peut être négatif, c'est à dire gonflement). Les contraintes de traction qui résultent de ces obstacles et de ces gradients de déformation peuvent atteindre la résistance du béton à la traction et donc causent la fissuration du béton.

Les fissures, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs, non seulement diminuent la capacité d'une structure à supporter la charge admissible, mais elles peuvent aussi affecter sa durabilité et nuire à sa bonne apparence. La conception d'ouvrage durable passe donc nécessairement par une maîtrise des déformations libres, et de leurs éventuels effets mécaniques.

La fissuration peut être évitée seulement si la contrainte induite par la déformation due au retrait libre, diminuée par le fluage, demeure à tout moment inférieure à la résistance en traction du béton. Ainsi, l'âge a un double effet d'une part, il conduit à augmenter la résistance du béton, ce qui a pour effet de réduire le risque de fissuration, mais, d'autre part, le module d'élasticité augmente aussi de sorte que la contrainte induite par un retrait donné devient plus importante. Un béton suffisamment mûri subit moins de retrait.

Les fissures de retrait plastique se produisent à la surface du béton peu de temps après sa mise en place ou lorsqu'il est encore plastique. Elles sont plutôt discontinues et ne s'étendent pas forcément d'un bord à l'autre de la surface exposée, parallèles les unes aux autres et perpendiculaires à la direction du vent [43].

Des fissures de ce type conservent leur forme originale une fois que le béton durci.

On peut voir apparaître ce phénomène chaque fois que :

- Le béton est trop chaud.

- La température extérieure est trop chaude.

- La surface du béton est exposée à un vent sec et au soleil chaud.

Si la vitesse d'évaporation de l'eau présente dans le béton est trop grande avant que l'on ne commence à mûrir le béton normalement, la surface de béton peut se dessécher suffisamment pour faire apparaître des fissures de retrait.

Donc, plus on ajoute d'eau dans le béton lors de la mise en place, plus le volume d'évaporation de l'eau sera élevé, ce qui en résulte une augmentation des fissures de retrait.

Le retrait dû au séchage étant une propriété inévitable du béton, on se sert de joints de retrait pour éviter la formation de fissures inesthétiques [43].

Les joints de retrait n'empêchent pas la formation de fissures de retrait, mais ils les contrôlent.

Ainsi l'utilisation d'armatures à section plus faible, réparties uniformément sur l'élément, permet d'augmenter l'extensibilité du béton donc son comportement à la traction et d'avoir une fissuration plus fine.

Les fissures causées par le retrait plastique apparaissent surtout sur les surfaces horizontales et peuvent être largement éliminées en prenant certaines précautions, elles peuvent apparaître en n'importe quel temps chaque fois que la surface du béton se dessèche très rapidement par évaporation. De telles fissures apparaissent lorsque l'eau de surface s'évapore plus rapidement que celle qui monte à la surface durant le processus naturel de ressuage. Ceci a pour effet de créer très vite un retrait dû au séchage et des contraintes de tension en surface qui entraînent l'apparition de petites fissures irrégulière.

La norme Suisse CSA A23.1 requiert l'érection de paravents autour des côtés des éléments de béton exposés à une évaporation de surface supérieure à 1 kg /m^2 par heure. Certains types de bétons, comme par exemple ceux contenant des pouzzolanes, peuvent se fissurer lorsque l'évaporation dépasse 0,5 kg /m^2 par heure. Les bétons contenant des fumées de silice, sont particulièrement enclins au retrait plastique car leur ressuage n'est généralement que de

0,25 kg/m^2 par heure. Lorsque le ressuage est très faible, il est très important de prendre des mesures préventives pour éviter l'assèchement prématuré de la surface. Lors de la prise, le ressuage peut s'arrêter complètement et la surface peut commencer à s'assécher même lorsque que l'évaporation est bien inférieure à 1kg/m^2 par heure. Dans ce cas, des mesures préventives supplémentaires sont nécessaires, quel que soit le type de béton.

Les mesures préventives qui suivent peuvent diminuer les risques de fissuration plastique. Elles peuvent être envisagées lors de la planification d'un bétonnage par temps chaud ou lorsqu'on fait face au problème durant la mise en place du béton. Elles sont énumérées dans l'ordre avec lequel elles devraient être appliquées lors de la mise en place.

- Humidifier les granulats secs et absorbants.

- Diminuer la température du béton en refroidissant les granulats et l'eau de gâchage. - Mouiller l'infrastructure.

- Eriger des abris pour diminuer la vitesse du vent au-dessus de la surface de béton. - Eriger des pare-soleil pour diminuer la température du béton.

- Vaporiser de l'eau immédiatement après la mise en place et avant que la finition ne commence, en prenant soin d'éviter l'accumulation d'eau qui peut réduire la qualité de lapât de ciment.

- Ajouter des fibres synthétiques dans le béton pour diminuer le risque de fissuration.

2.2.1.4 DISTINCTION ENTRE FISSURATION SOUS CHARGES ET FISSURATION SOUS DÉFORMATIONS IMPOSÉES

Il est en effet logique que des fissures apparaissent dans toute partie de la structure où les contraintes résultant des charges atteignent ou dépassent la résistance à la traction du béton. A l'exception d'éléments de béton armé sollicités en traction pure, la fissuration des structures en béton armé est en général peu importante sous l'effet des charges. L'armature requise pour satisfaire aux exigences de sécurité est normalement suffisante pour limiter l'ouverture des fissures à des valeurs acceptables, pour autant que les règles constructives habituelles soient respectées (diamètre, espacement, enrobage et armature minimale dans les zones peu ou pas sollicitées) et pour autant que le mécanisme de ruine adopté pour le dimensionnement ne s'écarte pas trop de l'état réel des sollicitations en service. Ce qui est notamment le cas des structures fléchies pour lesquelles la théorie de plasticité est appliquée de manière raisonnable en limitant les redistributions de sollicitations de 10 à 20% au maximum.

Parmi les déformations imposées, il peut être utile de faire la distinction entre :

- Les déformations intrinsèques (retrait thermique, retrait hydrique, fluage), dues à un phénomène interne à l'élément considéré; dans un tel cas, le risque de fissuration peut être considérablement réduit - voire éliminé - grâce à une composition appropriée du béton.

- Les déformations extrinsèques (variations climatiques, tassements différentiels des appuis ou des fondations), dues à un phénomène externe à l'élément considéré; dans ce cas, le recours à des bétons améliorés (le béton à hautes performances) ne s'avère guère efficace pour réduire la fissuration, ces bétons ayant un comportement moins ductile (module plus élevé, fluage et par conséquent relaxation plus faibles).

2.2.1.5 DIVERSES CAUSES ET PÉRIODE D'APPARITION DES FISSURES

La fissuration qui est un phénomène hasardeux peut être causée par des facteurs physiques tels que le retrait ou les variations de température ou par des facteurs mécaniques directement liés au chargement. Une fissuration non prise en considération lors de la conception de la structure et donc non contrôlée peut provoquer des effondrements et donc provoquer des pertes humides et des dégâts

La figure 2.11donne une vue d'ensemble des causes de fissuration du béton frais et du béton durci

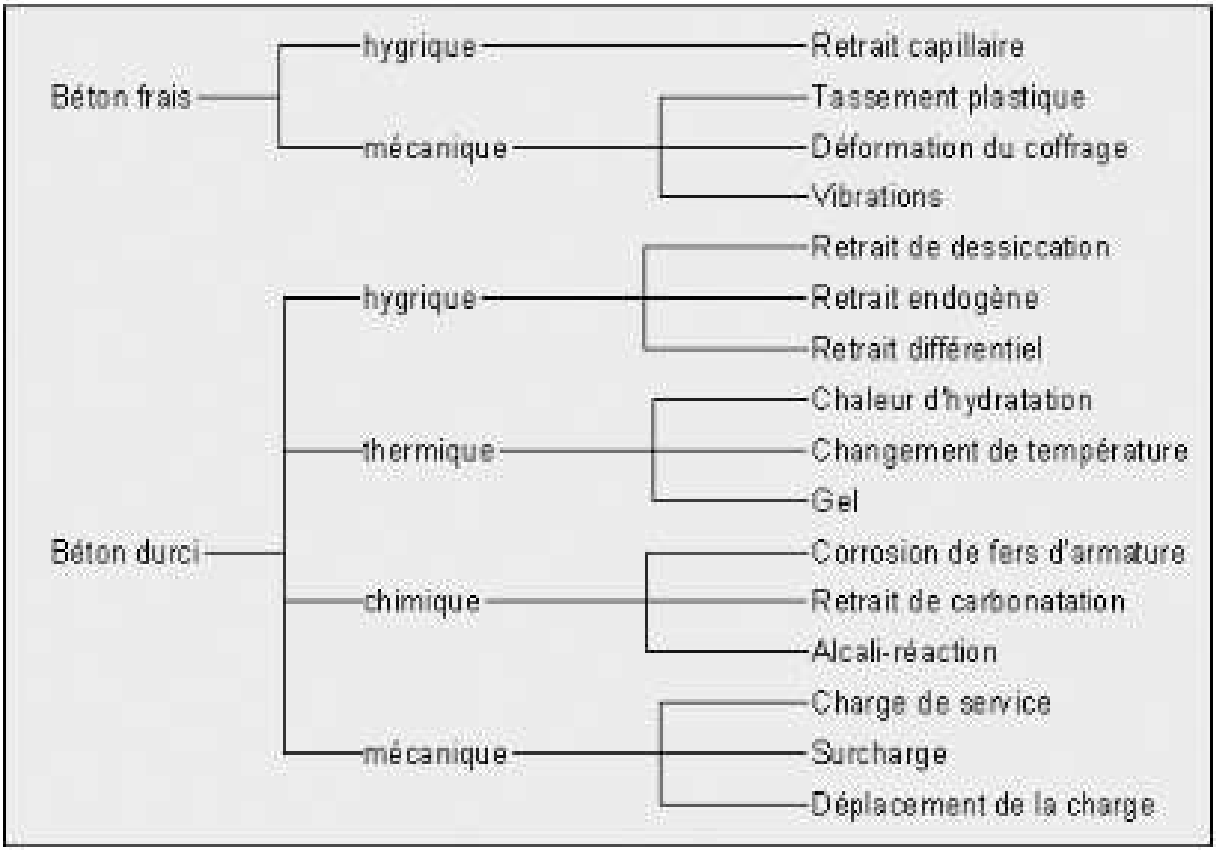


Figure 2.11: Causes de fissuration du béton frais et du béton durci [43].

L'apparition de fissures dans les structures en béton est un phénomène courant et difficilement évitable, les causes d'apparition des fissures sont nombreuses et fort diverses comme indiqué au tableau 2.1. Cependant il est parfois difficile de discerner la vraie raison à l'origine de certaines fissures. Il est utile de faire la distinction entre les fissures suivantes :

Les fissures précoces: apparaissant sur le béton frais, immédiatement ou quelques heures seulement après le bétonnage ; cas (a) et (b) du tableau 2.1.

Ces fissures ont des causes générales liées aux variations dimensionnelles du béton:

- Avant la prise c'est le ressuage

- Pendant la prise c'est le retrait plastique

- Après la prise c'est la contraction thermique

- Et l'auto-dessiccation (phénomène important seulement à faible rapport E/C).

Ces causes correspondent à des conditions particulières liées aux conditions de fabrication et de mise en œuvre qui codé terminent la fissuration. Les principales sont :

- Pour le ressuage, les obstacles au tassement

- Pour le retrait plastique, c'est plutôt le vent et les températures élevées.

- Et pour la contraction thermique, l'épaisseur des pièces.

Ces fissures sont d'autant plus préjudiciables à la durabilité qu'elles sont précoces car, se produisant avant que l'armature ne joue pleinement son rôle. Elles sont alors souvent ouvertes.

Les fissures d'origine mécanique : apparaissant sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci (quelques mois ou années après la construction) ; ces fissure sont la conséquence de l'apparition de sollicitations excédant la contrainte de déformation du béton ou sa résistance à la traction ; cas (c) et (d) du tableau 2.2.

Les fissures d'origine physico-chimique : apparaissant quelques années après la construction, elles sont la conséquence de phénomènes de gonflement dus à des réactions chimiques (corrosion des armatures, réaction alcali-granulats) ou à des effets physiques (gel de l'eau dans les pores du béton) qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement superficiel du béton d'enrobage ; cas (e), (f) et (g) du tableau 2.3.

.

Causes				Période d'apparition	Utilité d'une armature passive
a	Tassement du béton frais			quelques heures après le bétonnage	aucune
b	Retrait plastique				aucune
c	Déformations imposées	Retrait thermique		quelques jours après le bétonnage	oui
		Retrait hydrique	endogène	quelques jours après le bétonnage	oui
			de dessiccation	quelques mois ou années	oui
		Tassement des fondations		selon nature du sol	oui
		Température, variations climatiques		durant l'utilisation	oui
d	Charges (poids propre, permanentes, variables)			durant l'utilisation	oui
e	Corrosion de l'armature			quelques années après la construction	aucune
f	Réactions chimiques (alcali-granulats)				aucune
g	Gel			-	aucune

Tableau 2.2 : Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures et indiquant l'utilité de l'armature passive pour en limiter les conséquences

2.2.1.5.1 LES QUATRE CAUSES GÉNÉRALES DE FISSURATION PRÉCOCE

Le schéma de la figure 2.12 montre quatre sortes de fissures précoces qui peuvent affecter un ouvrage en béton.

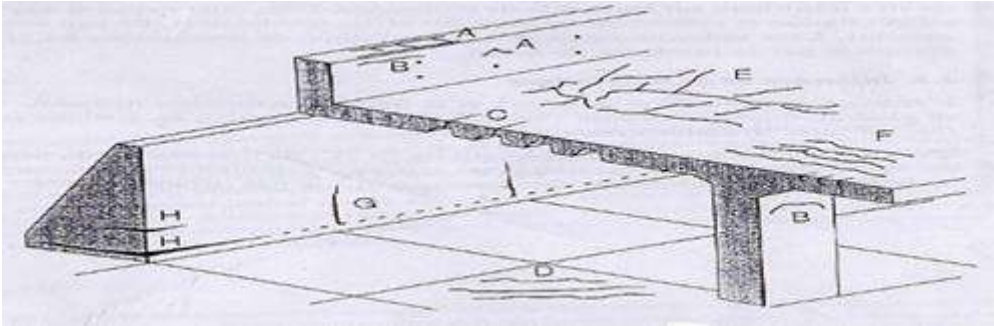


Figure 2.12 : Les quatre principales sortes de fissures précoces susceptibles d'affecter un ouvrage en béton [43].

A, B, C : fissures par ressuage ou par tassement du béton frais.

D, E, F : fissures par retrait plastique.

G, H : fissures par retrait thermique après prise ou par auto-dessiccation.

2.2.1.51.1 LE RESSUAGE

C'est l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la face supérieure du béton frais. Il se manifeste par l'apparition d'une pellicule d'eau claire à la surface libre horizontale du béton frais, en relation avec un tassement progressif du squelette sou l'effet de la pesanteur. Cette déformation verticale de tassement peut être importante (quelques pour cent) et s'accompagner dans les cas extrêmes de la création de fissures ouvertes (parfois plusieurs millimètres) au droit des obstacles qui s'oppose au mouvement de tassement du béton (armatures, variations locales d'épaisseur de la pièce,....). Le mécanisme du tassement s'apparente à une percolation de l'eau à travers la suspension faiblement floculée des grains de ciment. Il s'agit, en fait, d'un tassement d'ensemble de la phase solide au cours duquel les grains de toutes tailles ne sédimentent pas individuellement, mais "descendent" à la même vitesse [50]. Dans le même temps, l'eau interstitielle s'écoule dans le réseau poreux entre les grains pour venir en surface. Le flux d'eau de ressuage est stationnaire avant la prise et décroît brusquement au moment du début de prise. Ceci signifie que le tassement est d'autant plus fort que le début est plus tardif. C'est, par exemple, le cas si la température ambiante est basse ou si un effet retardateur (action principale ou secondaire d'un adjuvant) se manifeste.

2.2.1.5.1.2 LE RETRAIT PLASTIQUE

Il s'agit d'un retrait d'origine exogène par dessiccation qui se manifeste avant et pendant la prise. L'hypothèse générale admise [43] est que le retrait plastique est engendré par la dépression capillaire qui se développe lorsque des ménisques se forment dans les capillaires des bétons frais.

Un point caractéristique de ce retrait particulier de dessiccation est qu'il se produit pendant un temps limité. La déformation apparaît dès que la surface exposée est exempte d'eau de ressuage. En atmosphère calme (vent faible), le début de la période de retrait plastique coïncide avec le début de prise qui est aussi la fin du ressuage. En revanche, par vent fort, le flux d'eau évaporée peut être largement supérieur au flux stationnaire d'eau de ressuage et, dans ces conditions, la déformation peut commencer à se manifester quelques minutes après la mise en place. Le retrait plastique est donc piloté, dans une large mesure, par la vitesse de dessiccation.

La fin de la période de retrait plastique coïncide à peu près avec la fin de prise, lorsque la déformabilité du béton décroît fortement. L'influence de certains adjuvants agissant directement sur la vitesse de prise (accélérateurs, retardateurs) ou indirectement (plastifiants, fluidifiants), ainsi que celle de la température, a pour conséquence une variation de la valeur du retrait total.

2.2.1.5.1.3 LA CONTRACTION THERMIQUE APRÉS PRISE

Cette contraction se manifeste, suivant les éléments de structure considérés, dans un laps de temps variant de quelques dizaines d'heures à quelques semaines après la mise en œuvre du béton, la durée augmentant avec la taille de la pièce. On conçoit que, s'agissant d'un matériau en phase de durcissement, les contraintes mises en jeu seront beaucoup plus élevées pour le retrait plastique.

2.2.1.5.1.4 LE RETRAIT PAR AUTO DESSICATION DE BÉTON À HAUTE PERFORMANCE

Le retrait d'auto dessiccation désigne la contraction, isotherme, observée sur une éprouvette de béton en cours d'hydratation et protégée de tout échange d'eau avec le milieu extérieur. Ce retrait augmente lorsque le rapport E/C diminue ; il dépasse 10^{-4} en déformation linéaire après quelques jours de conservation. Ce retrait provient d'un phénomène "d'auto-dessiccation" de la pâte de ciment au cours de son hydratation. Cette auto-dessiccation peut être mise en évidence expérimentalement de façon directe et l'on constate qu'elle augmente fortement lorsque le rapport E/C diminue. Une conséquence importante est que, si le retrait par auto-dessiccation est négligeable quand les rapports E/C sont de l'ordre de 0,6 (c'est le cas d'un béton courant doser à 350 kg de ciment par mètre cube pour un affaissement de 8 cm mesuré au cône d'Abram), ce phénomène prend de l'importance avec les bétons à hautes et très hautes performances quand les rapports E/C sont de l'ordre de 0,3.

LA PRISE			
Quelques heures		Quelques jours	
AXE DES TEMPS			
Causes Mécanismes	Ressuage	Retrait Plastique	Retrait thermique après prise
Force de van der Waals entre les grains fins	. dosage en eau . nature minéralogique des éléments fins (sable, ciment) . ions dans la solution interstitielle du béton frais		
Dessiccation par évaporation		. dosage en eau . durée de prise . rapport surface / épaisseur . distance à la face exposée.	
Contraction par refroidissement			Isolation du coffrage

Tableau 2.3: Les causes générales de fissuration précoce, mécanismes, physiques et Paramètres impliqués pour les bétons courants

2.2.1.6 MOYENS POUR RÉDUIRE LA FISSURATION

Divers moyens permettent de réduire la fissuration - voire de l'empêcher dans certains cas dont l'efficacité dépend dans une large mesure de la cause et de la période d'apparition des fissures (tab 2.1). Ces moyens consistent principalement à effectuer des choix judicieux lors du projet et à en contrôler la bonne exécution lors de la construction de l'ouvrage, concernant :

- Le système statique, les liaisons et les joints entre les différentes parties;

- Les armatures passives.

- La composition et la cure du béton.

- Les étapes de construction et les phases de bétonnage.

- La fabrication d'un béton renforcé de fibres.

2.2.1.6.1 SYSTÉME STATIQUE ET JOINTS

Le risque de fissuration d'origine mécanique (cas (c) et (d) du tableau 2.1) est beaucoup plus faible - voire même réduit à zéro dans un système isostatique ou avec des joints rapprochés, permettant aux déformations imposées de se produire librement ;cela, quand bien même un système hyperstatique et avec le moins de joints possibles s'impose dans de nombreux cas pour des raisons de sécurité (réserves de capacité et comportement ductile à l'approche de la ruine), d'économie sur les coûts de construction et/ou d'exploitation (joints souvent difficiles à réaliser, coûteux et source de nombreux ennuis).

2.2.1.6.2 ARMATURE PASSIVE

La mise en œuvre d'une armature passive permet de contrôler la fissuration d'origine mécanique, c'est-à-dire résultant de déformations imposées (cas (c) du tableau 2.1) ou de l'effet des charges (cas (d)).

Aussi trivial que cela puisse paraître, il est néanmoins utile de mentionner ou de rappeler que la mise en œuvre d'une armature passive - aussi importante soit-elle - ne constitue pas une mesure permettant d'éviter la fissuration. Elle ne permet que de limiter l'ouverture des fissures mais n'empêche nullement leur apparition (au contraire, elle peut même en être l'une des causes lorsque la quantité d'armature est très élevée!).

L'ouverture des fissures risquant d'apparaître dans une structure en béton est d'autant plus faible que la quantité d'armature passive est plus importante et que sa répartition est plus fine. La quantité et la répartition des barres d'armature (espacement minimal) seront limités en pratique à des valeurs adaptées à la composition ainsi qu'aux procédés de mise en place et de vibration du béton, de manière à garantir l'obtention d'un béton durable et d'excellente qualité; en cas de doute, il est vivement recommandé de procéder à des essais préalables aussi réalistes que possible.

2.2.1.6.3 COMPOSITION ET CURE DU BÉTON

La mise en œuvre d'armatures passive ne s'avère pratiquement d'aucune utilité pour limiter la fissuration précoce (cas (a) et (b) du tableau 2.1) ou celle d'origine physico-chimique (cas (e), (f) et (g)). Outre certaines mesures constructives (tel un enrobage suffisant), les mesures les plus efficaces dans ces cas-là s'avèrent celles concernant la composition et la cure du béton. De telles mesures peuvent également contribuer favorablement à diminuer - voire à éliminer- la fissuration résultant de déformations imposées intrinsèques en réduisant l'intensité des divers retraits (cas (c)). Ces mesures comprennent les éléments suivants :

- La réalisation d'un béton peu perméable et résistant aux agressions chimiques éventuelles grâce à une composition appropriée (choix du type de ciment, dosage en ciment suffisant, rapport eau/ciment aussi faible que possible par l'emploi d'adjuvants plastifiant ou réducteur d'eau, composition granulométrique et consistance adaptées aux moyens de mise en place, ajout de fines ou fillers en sorte que la quantité de fines dont le diamètre des grains est inférieur à 0,125 mm, ciment compris, soit au moins égale à 350 kg/m^3, ajout éventuel de fumée de silice, ajout éventuel de fibres, etc.).

- La compacité et la qualité du béton d'enrobage sont finalement fortement tributaires des conditions de cure. Des mesures de cure insuffisantes ou mises en œuvre trop tardive peuvent être à l'origine de fissures précoces et avoir un effet désastreux sur la qualité du béton d'enrobage et la durabilité de la structure; et cela, en dépit de tous les efforts éventuellement entrepris pour améliorer la composition du béton.

- Le maintien du coffrage ou, à défaut, la mise en œuvre de mesures de cure des surfaces bétonnées exposées au milieu environnant sont indispensables jusqu'à ce que le béton d'enrobage offre une imperméabilité et une résistance suffisantes.

Pour être complètement efficaces, les mesures de cure doivent être appliquées immédiatement après la vibration et le réglage des surfaces bétonnées et doivent être maintenues durant plusieurs jours. Les durées de cure nécessaires sont fonction de nombreux paramètres tels que la composition du béton (type et dosage en ciment, rapport eau sur ciment, ajouts) et les conditions climatiques pendant et après le bétonnage (température et humidité relative de l'air ambiant) qui conditionnent le développement de l'hydratation du ciment. Elles sont également fonction de l'agressivité du milieu environnant auquel sera soumis l'ouvrage une fois mis en service. Dans ce sens, des recommandations beaucoup plus complètes et détaillées sont fournies à l'annexe d.12 du Code Modèle [43].

Notons que si la confection de bétons améliorés ou de bétons à hautes performances, grâce à l'utilisation de ciment à plus haute résistance (à long terme et/ou initiale), à la réduction du rapport eau/ciment et à divers ajouts (en particulier de fumée de silice), peut s'avérer favorable et permettre ainsi une réduction de la durée de cure nécessaire, il n'en est pas de même en ce qui concerne la rapidité avec laquelle les mesures de cure doivent être mises en œuvre. Les bétons courants avec un rapport eau/ciment supérieur à 0,5 sont protégés d'une dessiccation rapide grâce à l'eau de ressuage. Les bétons améliorés ou à hautes performances dans lesquels on a réduit le rapport eau/liant à des valeurs inférieures à 0,5 ne présentent souvent plus de ressuage et deviennent par conséquent beaucoup plus sensibles à tout retard ou manquement dans l'application des mesures de cure.

2.2.1.6.4 ÉTAPES DE CONSTRUCTION ET PHASES DE BÉTONNAGE

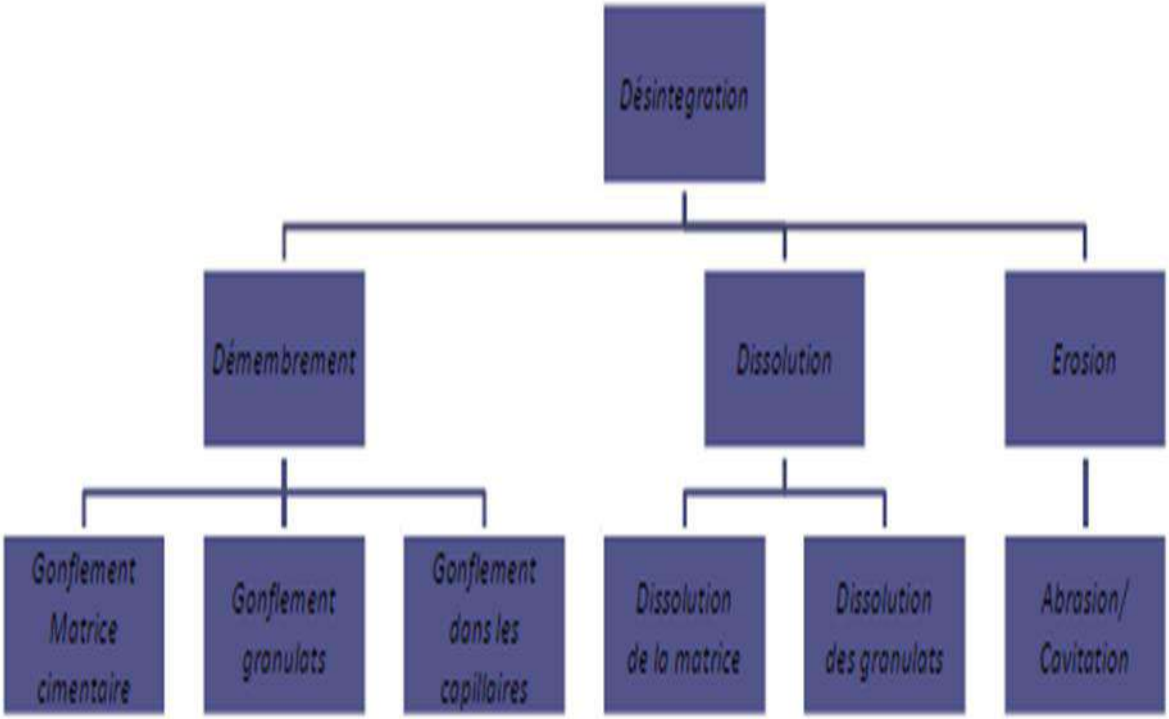
Une planification judicieuse des étapes de construction et des phases successives de bétonnage peut également avoir un effet favorable permettant de réduire sensiblement la fissuration, voire de l'éviter complètement dans certains cas. Chaque nouvelle étape bétonnée contre une étape précédente, qui a déjà effectué une partie de son retrait, voudrait se raccourcir par rapport à celle-ci, par suite du retrait thermique puis de la différence de retrait hydrique entre les deux étapes. Ces raccourcissements entravés, ainsi que les contraintes de traction dans le béton jeune et le risque d'apparition de fissures qui en résultent, sont d'autant plus élevés que le béton présente un fort dégagement de chaleur d'hydratation, que l'intervalle de temps entre les différentes étapes est important, ou que les liaisons rigides avec des étapes déjà durcies sont nombreuses

2.2.1.6.5 FABRICATION D'UN BÉTON RENFORCÉ DE FIBRE

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme.

2.2.2 Désintégration

Mécanismes de désintégration



Figures 2-13 : Mécanismes de désintégration [54]

2.2.2.1 Modes de dégradation

Avant d'aborder les mécanismes de détérioration de la matrice cimentaire, il est important de cibler les différents processus qui sont en action. On trouve trois principaux types de désordres dans le béton. Il y a ceux d'ordre chimique qui surviennent généralement à la suite d'un déséquilibre du liquide interstitiel. Parmi les désordres d'ordre chimique, on distingue ceux qui surviennent sans transport, c'est-à-dire sans échange externe, de ceux qui se produisent avec transport, soit par un apport d'un contaminent après la maturation. Ensuite viennent les désordres dits physiques. Ces désordres sont attribuables à des pressions mécaniques souvent générées par des mouvements d'eau. Finalement, la détérioration du béton par corrosion des barres d'armature en acier est un processus hybride qui fait intervenir deux processus. Il y a d'abord une phase d'initiation qui survient avec une perturbation chimique du liquide interstitiel et ensuite une phase de propagation de la corrosion qui provoque des sollicitations mécaniques produites par la génération de produits de corrosion. Cette classification est résumée à la Figure 2-13.

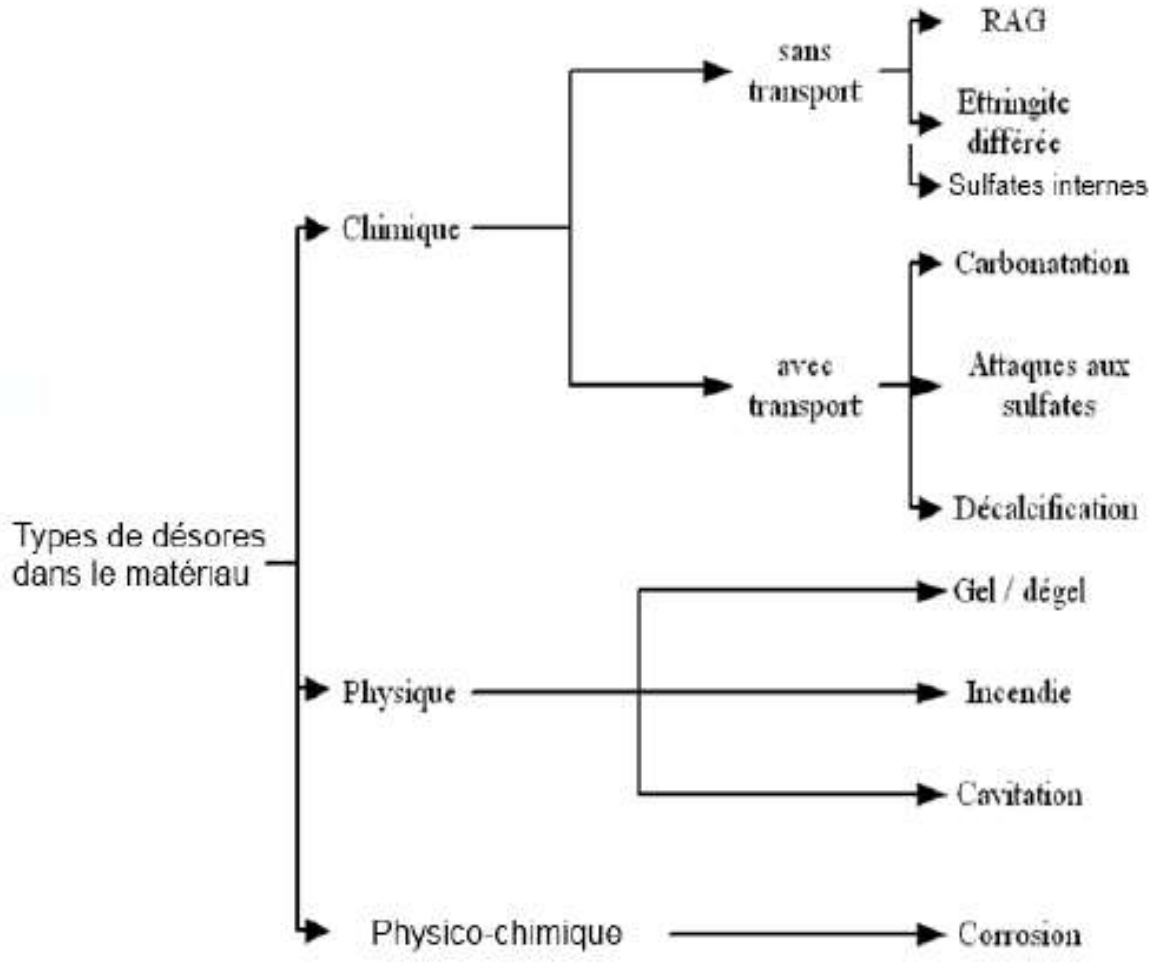


Figure 2-14- Classification des types de désordres dans le béton

2.2.2.2 Désordres chimiques

En général, les désordres chimiques surviennent en raison de l'infiltration d'un contaminant dans le réseau poreux (Crausse, Bacon et al. 1981). La présence de ces contaminants déséquilibre le liquide interstitiel, ce qui affecte l'équilibre de certains hydrates et provoque leur dissolution. Il y a donc un changement au niveau de la structure de la pâte et une précipitation de certains éléments nouvellement formés. Dans certains cas, les réactifs peuvent être présents lors du dosage. C'est le cas pour la réaction alcalis-granulats.

2.2.2.2.1 L'attaque sulfatique

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés.

L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés

de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,…). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l'attaque sulfatique interne [44, 45], qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton (DEF), de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.

L'objet de ce paragraphe est de présenter l'attaque sulfatique externe dont l'apport en ions sulfates provient du sol.

2.2.2.2.1.1 Complexité du phénomène

Les mécanismes fondamentaux d'altération des bétons par réactions chimiques, ainsi que leurs effets ont été représentés par la Figure à l'aide d'un schéma proposé par Mehta [46]. Ce schéma a été simplifié par Plane pour se focaliser sur l'attaque sulfatique [47]. Deux réactions y figurent, l'hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durci et les réactions entraînant la formation des produits expansifs (associés à l'attaque au Sulfate de Sodium : ASSO). Néanmoins, les conséquences macroscopiques sont d'ordre mécanique : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et d'ordre physico-chimique : perte de résistance, modification de la porosité et des propriétés de transport et formation d'un hydrate expansif.

L'attaque sulfatique externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression :

• Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité des matériaux,

• Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et de l'apport en ions SO4

• Le phénomène d'expansion, résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates.

La quantité de sulfates pouvant intervenir dans les réactions dépend de chaque source considérée : lieu, quantité, type.

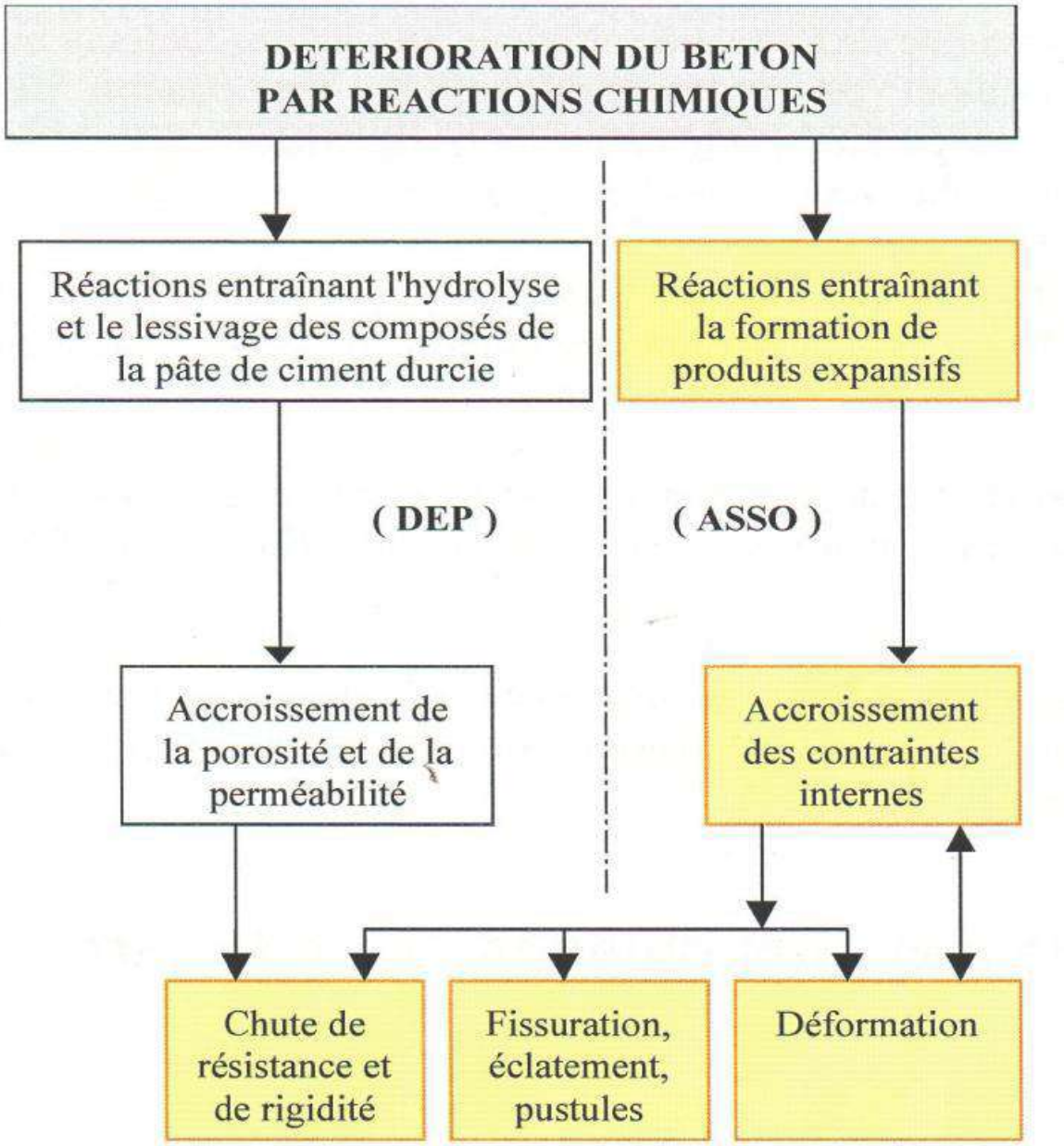


Figure 2.15 : Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques (DEP : Dégradation en Eau Pure, ASSO : Attaque au Sulfate de Sodium Na2SO4).

L'intensité du mécanisme de l'expansion sulfatique va dépendre :

• De la qualité du béton à savoir la composition du ciment, le mode de fabrication, la cure, l'état d'endommagement du béton avant l'attaque ;

• De l'exposition sur le site à savoir la concentration en SO4 et sa distribution dans le sol, l'humidité, les opportunités de transport ;

• Des conditions environnementales et atmosphériques à savoir les changements d'humidité, la fréquence des intempéries, la température, la surface exposée [48].

2.2.2.2.1.2. Aperçu historique

Cela fait plus de 70 ans que de nombreuses attaques par les sulfates, présents naturellement dans le sous-sol, ont été constatées sur les fondations d'ouvrages en béton en milieu marin. Les dégradations

De ces massifs de fondation sont attribuées en partie à la réaction des sulfates avec les hydrates de la matrice cimentaire.

Dès les années 1950, les premières réglementations en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique recommandaient l'utilisation de béton à faible rapport Eau/Ciment, à taux de C3A limité et à ajouts pouzzolaniques. Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne.

Les sulfates qui sont à l'origine de la destruction des ouvrages en béton peuvent être présents naturellement dans les sous-sols, intégrés dans la préparation du béton ou provenir de l'industrie (chimique et pétrochimique) suite à une pollution. Les sulfates se trouvent également associés aux alcalins dans les sels (sulfates de sodium, potassium, calcium et magnésium). On trouve aussi, dans le cadre du stockage des déchets radioactifs, des sulfates dans le déchet lui-même, ou dans les eaux de ruissellement ayant traversé des zones sulfatées (eau séléniteuses, eau d'infiltration, pluies d'acides,…).

Cinq critères majeurs de recherche dans le domaine de l'attaque sulfatique ont été définis comme prioritaires par Cohen [49] :

• Etablir des tests accélérés d'attaques sulfatiques, permettant de tester rapidement la résistance des pâtes de ciment vis-à-vis de certains facteurs reconnus et ce de manière normalisée,

• Etablir une liste d'indicateurs appropriés à mesurer ou à contrôler pendant les essais d'attaque sulfatique,

• Etablir des critères qui permettent d'affirmer de façon claire si le matériau a réussi le test,

• Etablir une méthodologie systématique pour l'analyse des données,

• Etablir une relation entre la durabilité de la pâte de ciment et celle du béton.

La détérioration des propriétés mécaniques du béton, qu'elle soit évaluée visuellement, mise en évidence par une décroissance de la résistance du matériau ou encore par des mesures d'expansion volumique, est la conséquence des réactions chimiques et des modifications microstructurales causées par l'attaque sulfatique. Il apparaît alors primordial de réaliser un contrôle des propriétés physico Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des

bétons chimiques du matériau soumis à une attaque aux sulfates mais aussi de le faire avant que la détérioration de celui-ci ne soit trop avancée (i.e. forte expansion).

2.2.2.2.1.3 Principales techniques expérimentales

Les techniques d'analyse utilisées dans le cadre d'une étude de la durabilité des bétons peuvent être divisées en deux catégories : macroscopiques et microscopiques.

Techniques macroscopiques :

• Variation de la masse : un gonflement se traduit par un gain de masse tandis qu'une perte de matière par ruine fait chuter brutalement la masse.

• La mesure de l'allongement (expansion) : c'est le paramètre qui démontre sans équivoque l'existence d'un gonflement. N'est mesurable que sur les échantillons équipés de plots, c'est-dire les mortiers.

• Mesure de la vitesse de propagation du son : permet d'évaluer de manière non destructive l'évolution des propriétés mécaniques du béton puisque la vitesse est corrélée au module dynamique. Une chute du module dynamique traduit un endommagement global du béton.

• Porosité à l'eau : c'est le premier paramètre qui gouverne la résistance et la perméabilité des bétons. Cette mesure permet donc d'identifier à priori les bétons les plus durables.

• La mesure de la résistance à la compression et à la traction : mesure les propriétés mécaniques des bétons et des mortiers, notamment leur évolution au cours de l'exposition à l'environnement agressif.

• Contrôle visuel de la fissuration : évalue le degré d'endommagement de l'échantillon testé, aide au diagnostic de l'altération [47].

Techniques microscopiques :

• La microscopie électronique à balayage (MEB) avec microsonde EDS : identifie-les modifications de la microstructure et de la micro texture des bétons et des mortiers. Cet outil permet de réaliser le diagnostic de l'altération.

• Analyse thermogravimétrique (ATG) : mesure quantitative des composants majeurs des matériaux.

• La diffraction aux rayons X (DRX) : analyse des différents minéraux qui composent les bétons

La DRX reste assez limitée en quantitatif, elle permet d'identifier les phases bien cristallisées comme la portlandien, le monosulfoaluminate (l'AFM), le gypse, l'étrangéité (l'AFt) non colloïdale et d'autres phases minérales hydratées de la pâte de ciment.

2.2.2.2.2 Réaction Alcalis-Granulats

La réaction alcalis-granulats, communément appelée RAG, est causé par le caractère instable de certains granulats dans une pâte cimentaire. Ceci est vrai lorsque le granulat utilisé pour le squelette granulaire contient un élément réactif avec les alcalis (généralement de la silice au Québec) présents dans la pâte cimentaire. Cette réaction génère des produits occupant un espace plus important que les réactifs. Il y a donc une génération de pressions internes qui provoque un patron de fissurations polygonales lorsqu'il n'y a pas de confinement. En fonction du niveau de confinement offert par les armatures, d'autres faciès de fissures peuvent être observés. On note beaucoup de fissures aux interfaces pâte-granulats et dans les granulats (Figure 2-15). Dans la documentation, certains auteurs interprètent le phénomène de RAG comme un phénomène qui agit justement à cette interface pâte-granulats. Cependant, on remarque plusieurs granulats fissurés qui laissent croire que la réaction peut également se produire à l'intérieur du granulat lui-même (Baroghel-Bouny 1994).



Figure 2-16 : Granulat fissuré par une réaction alcalis-silice

Ce qui est intéressant avec ce type de défaut, c'est qu'on ne remarque pas de perte de résistance à la compression lorsque ce phénomène en est à ses débuts. Effectivement, bien que le matériau soit complètement fissuré, il a un comportement adéquat dans les zones sollicitées en compression. La réalisation d'essais de caractérisation sur des structures sévèrement atteintes de RAG est très compliquée. En effet, la structure reprend d'importants efforts de compression, mais le prélèvement d'un échantillon intact s'avère un défi de taille. Les essais de compression en laboratoire ne reflètent donc pas fidèlement le comportement réel du matériau confiné.

Les problèmes reliés à l'évolution de ce type de dégradation sont plutôt des problèmes d'utilisation. L'expansion du béton réduit l'efficacité de plusieurs structures et en rend même certaines complètement inadéquates. De plus, l'ouverture des fissures favorise l'infiltration d'agents agressifs tels que les sels déglaçant.

2.2.2.2.3 Carbonatation

La carbonatation est un phénomène qui se produit sur des ouvrages urbains qui sont fortement exposés à la pollution, plus particulièrement au gaz carbonique (CO2). Lorsque le gaz entre en contact avec une solution basique comme celles que l'on retrouve dans le milieu poreux du béton, il se transforme en acide carbonique. Cet acide déstabilise l'équilibre de la solution localement. Il se forme alors un nouvel équilibre où certains cristaux précipitent, comme la calcite, ce qui a pour effet d'abaisser le pH de la solution. La dissolution de la portlandite rééquilibre le pH de la solution et stabilise la dégradation de la matrice. Un béton ayant une bonne réserve de portlandite non dissoute résistera d'avantage à une exposition au gaz carbonique. (Baroghel-Bouny 1994)

Il ne semble pas avoir d'impact significatif sur le comportement structural de l'élément atteint. C'est plutôt au niveau des aciers d'armatures qu'il y a problème. La baisse de l'alcalinité du liquide interstitiel environnant l'acier d'armatures provoque la dépassivation d'une couche protective en surface des armatures. Cette perte de protection est parfois à l'origine de l'initiation de la corrosion.

La carbonatation peut également avoir ses bons côtés. Dans le cas d'une structure fissurée qui n'est pas soumise à des chargements cycliques, la précipitation de la calcite présente dans la solution interstitielle peut avoir comme effet de colmater les fissures. De plus, elle réduit la porosité en précipitant la calcite. En cristallisant, la calcite bloque les chemins préférentiels pour l'intrusion d'agent contaminants, comme le chlore, au cœur du béton. De plus, l'impact au niveau de la matrice cimentaire de ce mode de dégradation est superficiel. Tant que la corrosion ne sera pas initiée, la carbonatation n'aura pas un grand impact sur le comportement structural. Cependant, des tentatives infructueuses de carbonatation induite ont démontré qu'il y a peu d'avantages à tirer profit de la carbonatation. Attaques aux sulfates

L'attaque aux sulfates est causée par une séquence complexe de réactions chimiques. Ces réactions provoquent une modification chimique et physique de la matrice cimentaire. La restructuration de la matrice conduit à une perte des propriétés mécaniques et physiques. Il n'y a pas de réaction chimique clairement identifiée qui causerait ce trouble. Toutefois, on note deux formes principales sous lesquelles les attaques se manifestent. (Matala 1995)

Les attaques aux sulfates dites internes sont celles qui surviennent en raison d'une mauvaise formulation ou encore d'une cure inadéquate. Les bétons souffrant d'une mauvaise formulation vont contenir, par exemple, un excédent en gypse qui, afin de conserver l'équilibre global du liquide interstitiel, se dissoudra sous forme de sulfates. Une surdose en aluminate favorisera la formation d'ettringite qui peut causer des pressions internes. Une cure inadéquate sera considérée comme une cure dont la température dépasse 70 °C. Comme on l'a vu précédemment avec l'ettringite différée, une température de cure trop élevée provoquera une instabilité de certains éléments tels que les monosulfoaluminates ce qui favorisera la formation d'ettringite expansive. (Matala 1995)

Les attaques aux sulfates de type externe surviennent lorsqu'un agent agressif intrusif parvient à s'infiltrer dans le liquide interstitiel et à bouleverser l'équilibre. Leurs actions sont

multiples, mais on observe en général la dissolution de plusieurs éléments de la matrice cimentaire. La dissolution de ces éléments engendre un affaiblissement de la matrice ainsi que la cristallisation de nouveaux éléments dans des endroits non désirés.

La formation de ces nouveaux éléments génère ainsi des pressions internes qui favorisent la fissuration. (Matala 1995)

2.2.2.2.4 Décalcification

Dans le chapitre sur la carbonatation, on a discuté de la dissolution de la portlandite lors de la neutralisation de l'alcalinité du béton par une exposition au gaz carbonique. Un phénomène semblable se produit ici, mais la neutralisation est provoquée par un lessivage du réseau poreux macroscopique. Les mouvements d'eau sont influencés par les propriétés de ce réseau poreux. On observe ce phénomène surtout dans les ouvrages en maçonnerie ou encore dans les vieux ouvrages qui sont dotés d'un réseau poreux permettant facilement les déplacements d'eau. (Matala 1995)

L'action de ce phénomène est donc de mettre en solution la portlandite, qui se trouve expulsée vers la surface du béton. L'eau sous pression dans les petits pores entraine la portlandite à se dissoudre. Le déplacement de l'eau par séchage, ou autre, entraine l'eau chargée en ions vers des pores plus gros où la pression est moins élevée. Cette diminution de pression favorise la précipitation. Lorsque ce phénomène survient, on observe souvent des dépôts blanchâtres en surface de l'élément de béton.

Sur la Figure 2-16, on observe la formation d'un précipité de calcite à la suite d'un écoulement unidirectionnel de l'eau dans les fissures longitudinales dans le bas d'une poutre en béton précontraint. La structure en question était étudiée en prévision de son démantèlement et l'ouverture des gaines de précontrainte s'est effectuée dans un point haut du tracé parabolique. L'eau de pluie s'y est ensuite infiltrée et s'est acheminée jusqu'au point bas des gaines, s'infiltrant ensuite dans les fissures provoquant ainsi un lessivage local, visible au bas des poutres.

Le principal impact de ce mode de dégradation est l'augmentation de la porosité dans les zones affectées par le lessivage. Une augmentation de la porosité se traduit par une perte de résistance en compression. En général, ces zones sont superficielles et contribuent peu à la résistance de la pièce à l'ultime. Cependant, le béton de recouvrement est important afin de résister aux sollicitations environnementales et une détérioration de ses propriétés de transport peut accélérer la dégradation de la matrice. Heureusement, les réparations de ce type de défaut son peu coûteuses et souvent pratiquées.



Figure 2-17 : Précipité de calcite suite à un lessivage du béton

2.2.2.3 Désordres physiques

Contrairement aux désordres chimiques, les phénomènes de dégradation d'ordre physique ne sont pas initiés par des perturbations de l'équilibre du liquide interstitiel. Certains découlent plutôt d'une combinaison de mouvements d'eau provoqués par une perturbation des pressions internes, de changements de phase ou encore de phénomènes de cristallisation. Dans les deux cas discutés ci-après, un gradient de température est à l'origine de ce changement de pression.

2.2.2.3.1. Gel-Dégel

La température au Québec est un facteur qui a une influence directe et indirecte sur la durabilité des ouvrages en béton de ciment. En plus d'encourager l'épandage de produits abrasifs, les nombreux cycles de gel/dégel provoquent des déplacements d'eau dans le réseau poreux qui causent des pressions internes nuisibles à l'intégrité structurale des ouvrages d'arts. La présence de glace dans le réseau poreux du béton n'est pas nocive en soi. C'est plutôt sa formation qui sollicite fortement la matrice, comme il est illustré à la Figure 2-17.

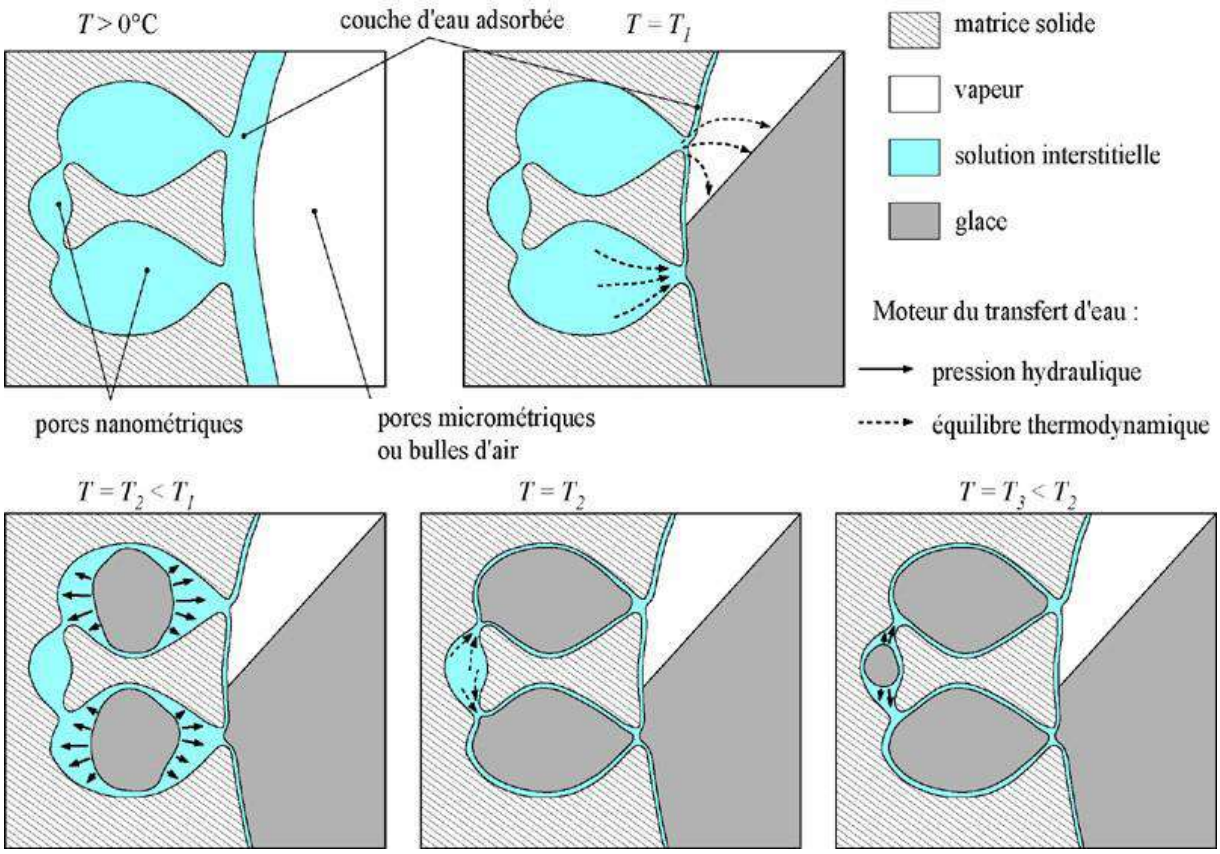


Figure 2-18 : Étapes de formation des cristaux de glace dans un matériau poreux

Le passage d'une température au-dessus du point de congélation à une température de plus en plus froide provoque un changement d'équilibre de la solution interstitielle. Le liquide contenu dans les plus gros pores sera le premier à passer sous la forme solide en raison de la pression moins élevée qui y règne. Un pore non saturé absorbera mieux l'expansion liée au passage à la forme solide du liquide interstitiel puisqu'il y aura de la place pour l'expansion. Lorsque la température continue à descendre, l'équilibre favorise la forme solide du liquide dans de plus petits ports et des cristaux de glace s'y forment. L'expansion de ces cristaux pousse l'eau dans les capillaires, ce qui génère d'importantes pressions. Moins la distance entre deux bulles d'air est élevée (facteur d'espacement), moins importantes seront les pressions sur la matrice cimentaire. Parfois, l'eau se retrouve piégée entre deux fronts de glace. Ceci provoque des fissurations locales qui, à l'échelle macroscopique, provoquent de l'écaillage en surface du béton.

La résistance à la traction du béton aidera grandement à réduire l'écaillage. Les pressions nécessaires pour provoquer l'amorce d'une fissure sont directement reliées à la capacité de la matrice à reprendre des efforts de traction. (Fagerlund 1975)

L'impact de ce mode de dégradation sur la matrice cimentaire est de causer une perte de matériau en surface en raison de l'écaillage. Une diminution du béton d'enrobage se traduit par une moins grande capacité à résister aux sollicitations environnementales. Ceci peut

engendrer l'émergence de nouveaux types de dégradation. Il y a également amorce de fissures qui peuvent constituer des zones de concentration de contraintes nuisibles pour l'atteinte de la résistance ultime de design.

2.2.2.4 Corrosion des armatures passives par infiltration d'ions chlore

Parmi tous les modes de dégradation des structures en béton, la corrosion des barres d'armature est sans doute le plus répandu et celui qui occasionne le plus de coûts de réparations.

Le béton est un milieu hautement alcalin qui provoque la formation d'un film passif, à l'interface de l'acier, la protégeant ainsi contre la corrosion. En raison de ces caractéristiques, l'acier dans le béton sain ne corrode généralement pas. Toutefois, un béton qui résiste mal à l'infiltration d'agents agressifs, tel que les chlorures, et à l'environnement auquel il est soumis, permettra un dé passivation de ce film, ce qui engendrera une initiation de la corrosion. (ACI-Committee-222 2001)

La corrosion se produit dans un milieu humide et oxygéné. C'est pourquoi les conditions d'exposition météorologiques d'une structure auront un impact significatif sur sa durabilité.

Un problème courant relié à la corrosion est que les produits de la réaction occupent un espace plus grand que les réactifs. La Figure 2-18, schématise les volumes relatifs des différents produits de corrosion et l'acier. Il en résulte donc une génération de pression interne et une amorce de fissures. Avec le temps, l'acier perd son adhérence avec le béton et son aire nette diminue. Ces conséquences ont un impact direct sur le comportement en service, la capacité de reprise des efforts à l'ultime et la ductilité de l'ouvrage. C'est en parti pourquoi tant d'argent est investi dans la recherche et le développement de nouvelles techniques pour contrôler ce phénomène de dégradation.

2.2.2.4.1 Initiation de la corrosion

Avant de s'initier, la corrosion doit être précédée par la dé passivation de l'acier. Cette rupture du film peut être locale ou généralisée. Généralement, un abaissement du pH de la solution interstitielle provoque l'instabilité du film. Les chlorures contribuent à l'abaissement du pH. Selon la Fédéral HighWay Administration (FHWA) des États-Unis, une concentration de 0.05% kg de chlorures par kg de béton permet d'initier la corrosion. Du côté du Ministère des Transports, on est un peu plus conservateur avec une concentration acceptée de 0.3%

2.2.2.4.2 Propagation de la corrosion

La corrosion de l'acier dans le béton est un processus électrochimique. Ceci implique qu'il y a formation d'une zone anodique et une zone cathodique. La zone anodique libère des électrons par la réaction de mise en solution du Fer.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

La zone cathodique consomme les électrons largués par l'anode en transformant l'eau et l'oxygène en ions hydroxyde.

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

L'ion ferreux en solution réagit alors avec l'ion hydroxyde pour former les produits de corrosion insolubles.

Lorsque les zones anodiques et cathodique sont séparées, on parle d'une corrosion par macro pile. Lorsqu'elles sont très rapprochées, on parle alors d'une micro pile. [50]

En fonction du pH de la solution et de la disponibilité de chacun des réactifs, les produits de corrosion peuvent prendre plusieurs formes. Chacune de ces formes ont la particularité commune d'occuper un espace plus grand que le métal de base. Ceci génère des pressions internes qui provoquent ultimement la fissuration de béton. [50]

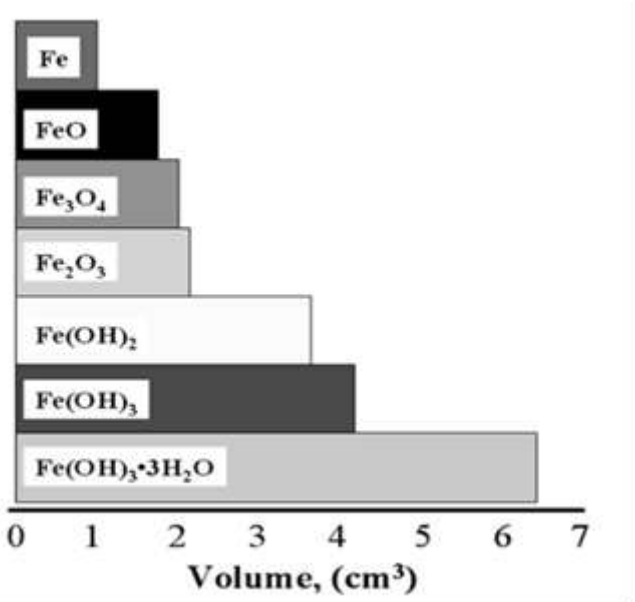


Figure 2-19: Volumes relatifs de l'acier et de ses produits de corrosion

2.2.3 Épaufrure

2.2.3.1 INTRODUCTION

Les signes apparents extérieurs des désordres d'un ouvrage en béton sont souvent des fissures, des désagrégations et des épaufrages. Les causes de ces problèmes sont multiples, les plus fréquemment rencontrées sont :

2.2.3.1.1 Déplacements des coffrages :

Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids de béton frais, mais ils sont toujours déformables. La déformation provoquée par le béton frais peut alors entraîner, dans les parties déjà durcies mais encore jeunes, l'apparition de fissures importantes.

Pour empêcher l'apparition de telles fissures il faut :

- Vérifier que le coffrage est bien conçu ;
- Revêtir la surface du bois utilisé pour le coffrage afin d'empêcher l'absorption qui induit un gonflement du bois;
- Vérifier périodiquement les montages et l'exécution pendant le coulage.

2.2.3.1.2 Ségrégation du béton frais :

Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (tassement) : par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et, dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment.

Les conséquences du phénomène se traduisent par la cassure du béton frais avec des fissures visibles qui suivent le tracé des armatures les plus proches [51].

Pour colmater les fissures superficielles, il suffit de différer le réglage des surfaces et de commencer la cure du béton le plutôt possible après sa mise en place ; ce traitement retarde en effet la prise, cela réduit la différence entre la ségrégation en surface et celle en pleine masse.

2.2.3.1.3 Décoffrage prématuré :

La vitesse et l'économie actuellement recherchées dans la construction ont pour conséquence que le coffrage est retiré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante.

Le décintrement et le décoffrage prématurés d'un béton peuvent entraîner:

- des déformations excessives de pièces minces fléchies;
- une fissuration des parties tendues;
- une microfissuration préjudiciable au niveau de la durabilité de la structure.

Pour éviter ces problèmes, il faut laisser les étais et les coffrages en place jusqu'à ce que le béton soit assez résistant.

Le durcissement du béton en cours de prise est influencé par un certain nombre de paramètres liés au béton et aux conditions thermiques dans lesquelles il est placé:

- Le dégagement de chaleur du béton en cours de prise et un facteur prépondérant; il est évidemment relié à la chaleur d'hydratation et au dosage du ciment constituant le béton; la connaissance du degré d'avancement des réactions ou degré de maturation du béton, peut être appréciée par la mesure du dégagement de chaleur et , après calibrage, elle devient un outil non destructif permettant d'estimer la résistance du béton au jeune âge;
- Les conditions climatiques dans lesquelles est placé le béton jouent également un rôle non négligeable; à cet effet, le coffrage constitue une enveloppe de protection plus ou moins efficace suivant sa nature: un coffrage constitué par un matériau isolant génère un traitement thermique passif du béton;
- Lorsque les conditions climatiques sont trop sévères pour permettre un décoffrage dans les délais souhaités, le béton peut être soumis à un traitement thermique actif.

2.2.3.1.4 Ondes de chocs :

Le béton est susceptible de s'épaufrer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures).

La résistance aux chocs peut être améliorée par l'emploi pour la confection du béton, d'agrégats anguleux et rugueux et par l'utilisation de sections fortement armées [51].

2.2.3.1.5 Désordres dus à un défaut de conception :

Si certains schémas de fissuration correspondent à un type de sollicitations bien défini, on peut aussi, à partir du relevé des fissures, essayer de comparer l'état d'une structure à celui prévu par le calcul, dans le but de déceler des anomalies de fonctionnement. Si le tracé des fissures est conforme au schéma prévu, une indication sur le risque de dépassement d'un chargement normal est donnée par la valeur de l'ouverture des fissures et sa variation [51], [52].

Des fissures correspondant à un schéma non prévu constituent, aussi, une indication de fonctionnement anormal.

La plupart du temps, les fissures résultent d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier.

2.2.3.2 Conclusion

Les désordres existants dans le gros œuvre se manifestent généralement par des fissures, des déformations et flèches excessives, des traces d'écrasement ou de cisaillement, de flambement ou de gonflement. Ils peuvent être causés par l'insuffisance de résistance des matériaux, relativement aux charges appliquées, l'insuffisance des dimensions des armatures, leur mauvaise disposition. Mais ils peuvent être dus à des surcharges excessives, des vibrations ou des changements des sens répétés des efforts, des tassements différentiels, l'attaque des matériaux par l'humidité et les agents extérieurs.

1. INTRODUCTION :

La région de Médéa qui se situe au nord algérien, a connu ces dernières années des problèmes de dégradation qui ont touché des constructions de différentes natures: habitation, équipement et ouvrages d'art. Ce travail se base sur des informations concernant les ouvrages dégradés de la région, recueillies au niveau des agences locale du contrôle technique de la construction (CTC centre), au niveau de la direction des travaux publics, au niveau de la direction du logement et des équipements public et à partir des visites sur site. Ces dernières ont été nécessaires afin de reconnaître la nature des désordres, de décrire leur localisation et d'analyse r leur évolution pour enfin arriver aux facteurs caractérisant les problèmes touchant la région. L'enquête s'est portée sur le maximum d'information concernant des exemples d'ouvrages dégradés de la région de Médéa : âge, plan, nature des matériaux (ciment, dosage,…) et la nature de l'environnement. L'objectif de ce travail et modeste mais précis, c'est d'arriver à rassembler les facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages en béton armé de la région étudiée, et faire apparaitre leurs fréquences.

2. LES FACTEURS INFLUANT SUR LA DEGRADATION DES OUVRAGES DANS LA REGION DE MEDEA :

Pour chaque type d'ouvrage, les fréquences des différents facteurs d'influence sur la dégradation sont données sous forme d'histogramme selon les rapports de surveillance visuelle des ouvrages. Ces rapports de diagnostic ont pour objectif de permettre aux gestionnaires d'acquérir les éléments de connaissances et des méthodes pour essentiellement :

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

2 .1 . Codification : Pour faciliter la présentation et la lecture des histogrammes, les données seront codifiées par des numéros comme suit :

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

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

Code 3 : Les facteurs liés à la conception.

Code 4: Les facteurs liés à l'environnement (l'agressivité du sol et les conditions climatiques).

Code 5 : Les facteurs liés aux conditions d'exploit action.

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

2 .2 . Données et résultats obtenus :

2.2.1. Les facteurs d'influence sur les ouvrages à usage d'habitation :

La dégradation des ouvrages à usage d'habitation a connu la même croissance que celle de la réalisation. Jusqu'à maintenant un nombre de logements de différents sites de la région ont réclamé des symptômes de dégradation, après une période de leur réalisation. Le tableau 3-1, représente des exemples de logements dégradés dans la région de Médéa.

Désignation de l'ouvrage	**Description de l'ouvrage**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la dégradation**
400 logements à Médéa (photos 3-1,3-2,3-3,3 -4)	-Structure auto-stable en R+4 à usage d'habitation	-Fissures au niveau des éléments porteurs	-Glissement des terres -Absence d'organisation (chantier et travaux) [53]
200 logements à Ksar el Boukhari (photo 3 -5 ; 3-6)	-Structure auto-stable en R+5 à usage d'habitation	-Affaissement des terres sous dallage	-Le réseau d'assainissement n'a pas été réalisé correctement. [53]
Un logement a la cité Kouala-Médéa (photos 3-7,3-8)	-Structure auto-stable R+3 à usage d'habitation	-Fissures au niveau des cloisons extérieures et intérieures	-Tassement différentiel du sol -Mauvaise conception [53]
des logements du quartier ENASRE à Ouzera dans la wilaya de Médéa photos (3-12,3-13 ; 3-14 ; 3-15)	deux blocs en (R+2), l'ossature de la structure est constituée de portiques, (poteaux et poutres) en béton armé avec un plancher en dalles pleines.	-Fissures horizontales et verticales sur plusieurs murs intérieurs et extérieurs. -Affaissement du carrelage dans quelques endroits.	-Détérioration plus aux moins importante du béton de plusieurs éléments à savoir (dalles pleines, escalier, poteaux et poutres). -Infiltration des eaux sous les dalles et à travers les parois extérieures. -L'enrobage des armatures endommagé -Certaines armatures des dalles pleines, escalier et poteaux sont complètement corrodées.
100 logements à la	-Structure auto-stable	-Fissure répétés au	-Vieillissement des

cité Takbou- Médéa (photos 3-9, 3-10 3-11)	à usage d'habitation	niveau des éléments porteurs -Eclatements de béton en zones d'appuis	matériaux -Mauvaise mise en œuvre de plusieurs éléments -Non-respect des dispositions constructives -Mauvaise résistance à la compression du béton [53]
48 Logements Ouzera Medea (photos 3-16, 3-17, 3-18)	Il s'agit d'un bloc en (R+3), l'ossature de la structure est constitué de portiques, (poteaux et poutres) en béton armé avec un plancher traditionnel en corps creux.	-Des fissures horizontales et verticales non prononcées au niveau des murs -Des fissures obliques plus moins prononcées au niveau des ouvertures des portes, fenêtres et les murs de séparations -Des infiltrations des eaux sous plafonds	-Un léger tassement dû à l'infiltration des eaux pluviales au niveau des semelles -Absence des barbacanes et système de drainage derrière le mur

Tableau 3-1 : Ouvrages à usage d'habitation dégradés dans la région de Médéa

Les images suivantes représentes un reportage photographique qui nous donne une idée sur les désordres rencontrés lors de nos visites aux sites précisés dans le tableau (3-1).



Photo 3-1 : Projet 400 logements au pôle urbain- Médéa
Tassement de la structure du bâtiment [53]



Photo 3-2 : Projet 400 logements au pôle urbain- Médéa
Tassement de la structure du bâtiment [53]



Photo 3-3 : Projet 400 logements au pôle urbain- Médéa
Glissement des terres [53]



Photo 3-4 : Projet 400 logements au pôle urbain- Médéa
Glissement des terres [53]

Commentaire pour l'ouvrage : 400 logs à Médéa
C'est un désordre du a un glissement des terres et qui affecte les éléments porteur de l'ouvrages



Photo 3-5 : Projet 200 logements à la cité zobra- Ksar el boukhari
Réseaux d'assainissement défectueux [53]

Commentaire pour l'ouvrage : Les investigations effectuées sur place n'ont décelé aucune anomalie majeure sur les éléments structuraux juste un Tassement des remblais sous dallages et altération du sol d'assise.



Photos3-6 : Projet 200 logements à la cité zobra- Ksar el boukhari
Vue à l'intérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries



Photo 3-7 : Projet construction privée à la cité kouala- Médéa
Fissures apparentes [53]



Photo 3-8 : Projet construction privée à la cité kouala- Médéa
Fissures apparentes [53]

Commentaire pour l'ouvrage : les désordres sont du a un glissement des terres



Photo 3-9 : Projet 100 logements à la cité Takbou- Médéa

Fissure au niveau de la poutre [53]



Photo 3-10 : Projet 100 logements à la cité Takbou- Médéa
Fissures apparentes au niveau de la poutre[53]



Photo 3-11 : Projet 100 logements à la cité Takbou- Médéa

Mauvaise mise en œuvre du béton au niveau du nœud [53]

Commentaire pour l'ouvrage : fissure généralement au niveau des nœuds



Photos3-12 : Logements du quartier ENASREà Ouzera dans la wilaya de Médéa

Armatures corrodées



Photos3-13: Logements du quartier ENASRE à Ouzera dans la wilaya de Médéa

Eclatement d'enrobage et armatures corrodées



Photos 3-14: Logements du quartier ENASRE à Ouzera dans la wilaya de Médéa

Fissures au droit des dalles pleines



Photos3-15: Logements du quartier ENASREà Ouzera dans la wilaya de Médéa
Affaissement du carrelage



Photos3-16 : 48 Logements Ouzera Medea

Dégradation et basculement des murs de soutènements



Photos3-17 : 48 Logements Ouzera Medea

Fissures diagonales au droit des murs intérieurs et façades



Photos3-18 : 48 Logements Ouzera Médéa

Infiltration des eaux sous plafonds

Interprétation des résultats :

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

o Dans 24% des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien, mais les conséquences sont moins graves ;

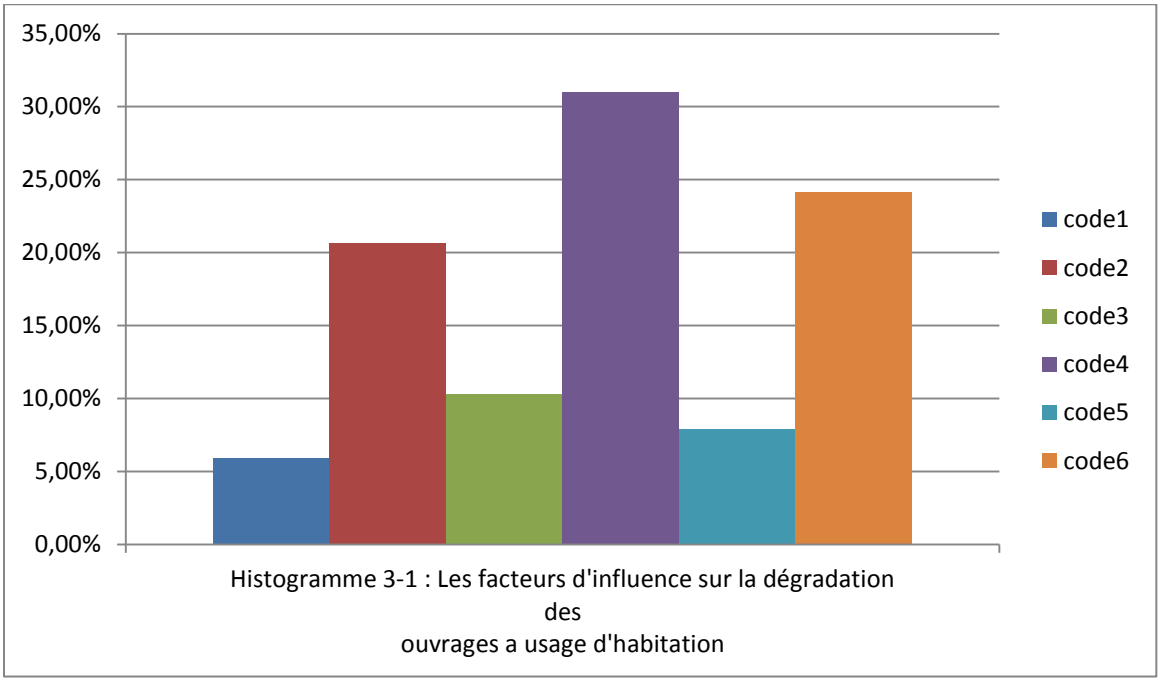
o Les facteurs li ès à l'exploitation (7%) ;

o Les facteurs liés à l'environnement (l'agressivité du sol et condition climatiques) (31%), surtout les conditions climatiques qui engendrent la mauvaise qualité du béton (période d'été);

o Dans 10% des cas, les facteurs d'influent ce sont liés aux défauts de conception, surtout dans le domaine d'auto -construction ;

o Dans 20% des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre, dont la conséquence est la mauvaise qualité du béton ;

o Les facteurs liés à la nature des matériaux (6 %).



Histogramme 3-1 : Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages a usage d'habitation

La majorité des cas dégradé dans les ouvrages a usages d'habitation son liée au : facteurs lié à mise en œuvre et manque d'entretien (absence de cure)

2.2.2. Les facteurs d'influences sur les ouvrages d'équipement :

La dégradation des ouvrages à usage d'équipement a connu la même croissance que celle du précédent, mais vu que la croissance de réalisation du premier type d'ouvrage est très importante que celle du deuxième, la dégradation des ouvrages du deuxième type paraît moindre. Le tableau 3-2, représente l'ensemble des ouvrages dégradés à usage équipement de la région.

Désignation de l'ouvrage	**Année de réalisation**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la Dégradation**
-Salle gymnastique Médéa (photo 3-18,3-19)	2011	-Chute partiel de la toiture -Torsion des profilés porteurs -Eclatement des	-Surcharge du a la neige - Faible béton au niveau des interactions

		interactions béton charpente	béton charpentent -Défaut de conception [53]
-La piscine du complexe sportive Médéa (photo3-20a 3-26)	1978	-Corrosion des armatures -Eclatement de béton -Infiltration des eaux - Ségrégation du béton	Différence de la température n'est pas pris en charge -Manque d'entretien -Présence du chlore [53]
-BMPG K.E.B		-Fissure au niveau de la maçonnerie -augmentation du joint de dilatation	-Sol agressive -Manque d'entretien [53]
-Polyclinique à Souagui	-Plus de 30ans	-Fissure au niveau des éléments porteurs -Affaissement du carrelage	-Sol non étudié cause principale du désordre [53]
-Siege daïra Tablat		-Fissure au niveau de la maçonnerie -Affaissement du carrelage	-Tassement du sol -Manque d'entretien [53]
-Mur de clôture Tamezguida		Basculement du mur -Fissures vertical importants dans la maçonnerie	-Mur non étudie -défaut de conception [53]
-Ecole Silakhdar Tablat	-1970	-Fissure au niveau de la maçonnerie -Affaissement du carrelage	Tassement de la fondation -Séisme de 2003 a aggravé l'état des fissures -vieillissement des Matériaux [53]
CEM (Mohamed Bouslimani, Draa Smar) photo(3-27;3-28)		- Fissure au niveau du dallage extérieur et mur de clôture -Eclatement des revêtements sur certains cloisons extérieures. -Affaissement du dallage périphérique autour du bloc. -Affaissement du dallage et du carrelage de la cour de récréation. -Fissure au niveau du	-la mauvaise évacuation des eaux qui s'infiltrent directement aux éléments d'infrastructure, tout en sachant que les terres qui constituent l'assiette de l'ouvrage est argileuse, sensible lorsqu'elle est au contact de l'eau.

		dallage extérieur et mur de clôture. -Déformation du caniveau.	
CEM (Fodil Skander Médéa)(photo3-29;3-30;3-31)		- Des fissures horizontales, verticales et obliques assez prononcées au niveau des cloisons intérieures et extérieures. - Des fissures obliques plus au niveau des ouvertures (fenêtres) -Eclatement de béton	la mauvaise évacuation des eaux qui s'infiltrent directement aux éléments d'infrastructure.
CEM Khadidja Benyakhlef MEDEA(photo3-32)		-Fissures au droit du mur de soutènement. -Déformation plus au moins importantes du mur de soutènement -Effondrement du faux plafond -Réseau d'évacuation des eaux usées complètement défectueux	-Absence de raccordement des descentes des eaux. -Réseau d'évacuation des eaux usées complètement défectueux -Présence et stagnation des eaux autour des blocs. -Présence et stagnation des eaux derrière le mur de soutènement -Système d'évacuation (drainage) des eaux derrière le mur de soutènement est défectueux. -Manque d'entretien périodique.
mosquée TIBHIRINE (Draa Smar)(photo3-33a3-36)		-les fissures constatées au niveau des éléments structuraux -les fissures constatées au niveau des maçonneries	-La mauvaise disposition des armatures entraîne un éclatement du béton la mauvaise évacuation des eaux qui s'infiltrent directement aux

			éléments d'infrastructure
C.E.M à Djoueb MEDEA(photo3-37)		Renversement du mur	•C'est l'eau le plus grande responsable de l'instabilité constatée sur le mur •Sous-estimation de la charge de poussée de la terre (dimensionnement). •Absence de drainage, l'eau s'est accumulée derrière le mur ce qui donne une pression hydrostatique excessive •Réalisation de mur sans dallage de protection. •Chaînage insuffisant la longue du mur. •Insuffisance des barbacanes (infiltration des eaux).

Tableau 3-2 : Ouvrages à usage d'équipement dégradés dans la région de Médéa

Les images suivantes représentent un reportage photographique sur les désordres rencontrer lors de nos visites aux sites précisées dans le tableau (Tableau 3-2)



Photo 3-19 : Salle de gymnastique à la résidence universitaire 2000 lits au pôle universitaire Torsion des profilés [53]



Photo 3-20 : Salle de gymnastique à la résidence universitaire 2000 lits au pôle universitaire

Eclatement des interactions béton-charpente [53]



Photo3-21: La piscine du complexe sportive Médéa

Infiltration des eaux



Photo3-22 : La piscine du complexe sportive Médéa

Enrobage des aciers détérioré



Photo3-23 : La piscine du complexe sportive Médéa

Armatures de la poutre complètement corrodées



Photo3-24 : La piscine du complexe sportive Médéa

Ségrégation du béton (Armature apparente)



Photo3-25 : La piscine du complexe sportive Médéa

Mauvaise reprise de bétonnage



Photo3-26 : La piscine du complexe sportive Médéa

Concentration du chlore sur les parois du bassin



Photo3-27 : CEM (Mohamed Bouslimani, Draa Smar)

Fissure au niveau du dallage extérieur et mur de clôture



Photo3-28: CEM (Mohamed Bouslimani, Draa Smar)

Eclatement des revêtements mortier au ciment

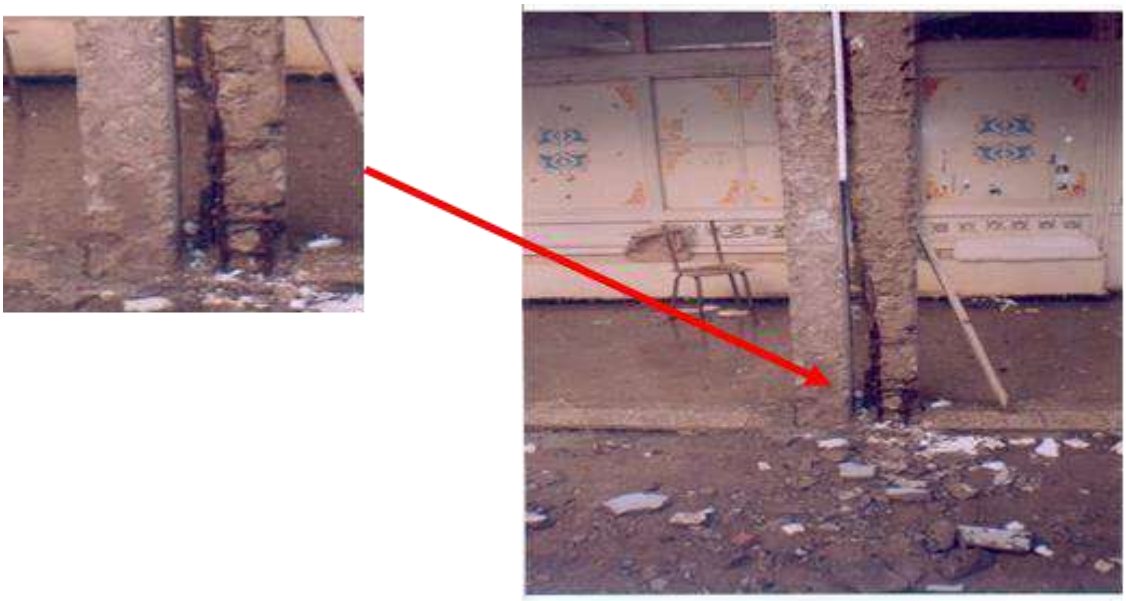


Photo3-29 : CEM (Fodil Skander Médéa)

Eclatement de béton



Photos3-30 : CEM (Fodil Skander Médéa)
Fissures horizontales au niveau des murs extérieur



Photos 3-31 : CEM (Fodil Skander Médéa)
Fissures obliques au niveau des murs intérieurs



Photo3-32: CEM Khadidja Benyakhlef MEDEA
Réseau d'évacuation des eaux usées complètement défectueux



Photos 3-33 : Mosquée TIBHIRINE (Draa Smar)
Vue à l'intérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries



Photos 3-34: Mosquée TIBHIRINE (Draa Smar)
Vue à l'extérieur sur les fissures constatées au niveau des maçonneries en pierre



Photos3-35 : Mosquée TIBHIRINE (Draa Smar)
Vue à l'extérieur sur les fissures constatées au niveau des éléments structuraux (un amorce-poteaux et chainage partie apparente)



Photos3-36 : Mosquée TIBHIRINE (Draa Smar)
Vue sur le basculement entre les deux blocs (mosquée et l'extension)

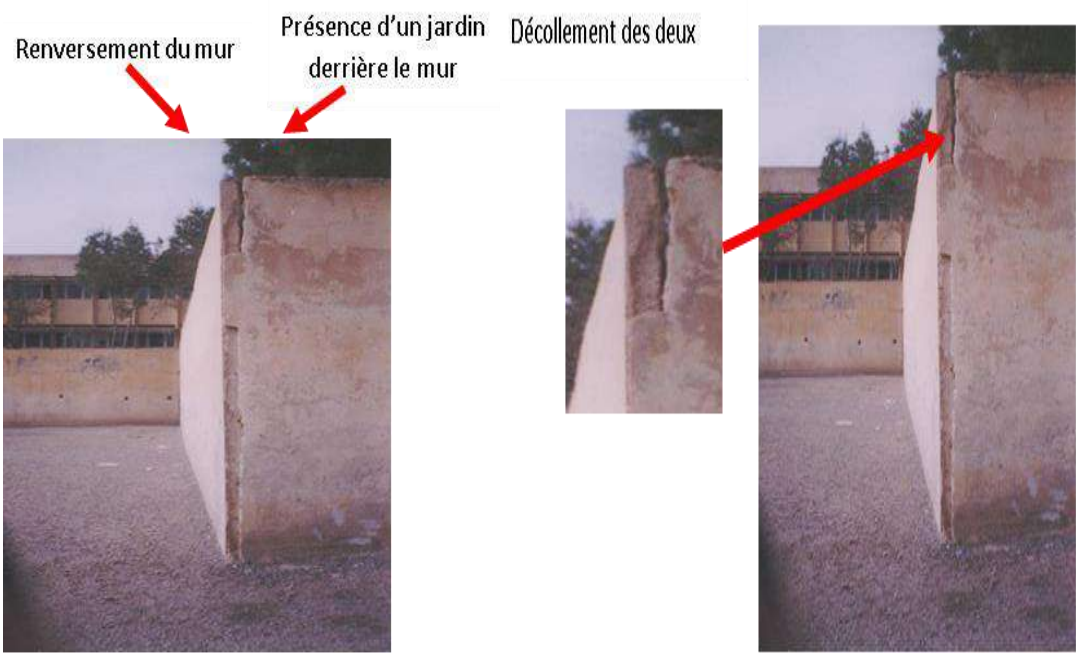


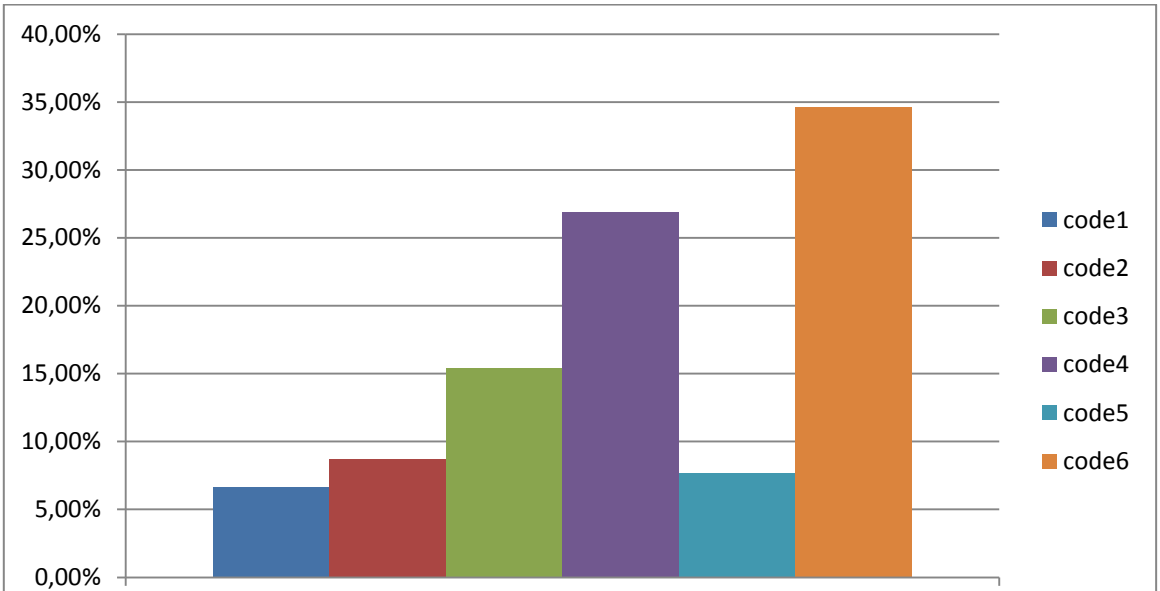
Photo3-37 : C.E.M à Djoueb MEDEA

Renversement du mur

Interprétation des résultats :

Selon l'histogramme figure 2, on remarque que les facteurs liés aux défauts de conception et aux manque d'entretien dont la conséquence l'étanchéité, sont les facteurs les plus importants suivis par les facteurs liés et à l'environnement (l'agressivité du sol et conditions climatiques),

- Dans 15% des cas, les facteurs d'influence sont liés à conception ;
- Les f acteurs liés à l'exploitation (7%) ;
- Les facteurs liés à l'environnement (l'agressivité du sol et condition climatiques) (63%);
- Dans 35 % des cas, les facteurs d'influence sont liés au manque d'entretien ;
- Dans 9% des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre, dont la conséquence est la mauvaise qualité du béton ;
- Les facteurs liés à la nature des matériaux (7 %).



Histogramme 3-2: les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'équipement.

Généralement ces ouvrages sont affecté par des facteurs qui son liée à la l'environnement et l'absence d'entretien

2.2.3. Les Ponts :

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

Désignation de l'ouvrage	**Situation de l'ouvrage**	**Désordre constaté**	**Facteurs d'influence sur la Dégradation**
-Ouvrage d'art pont OUED BOUHENECHE (photo 3-38)	-Chemin Wilaya le 51 au PK 6+500	-Eclatement du béton d'enrobage	-Mauvaise qualité du béton -Manque d'entretien [53]
-Ouvrage d'art pont OUED CHAIR (photo 3-39)	-Chemin Wilaya le 20 au PK 17+200	-Dislocation du béton -Corrosion des armatures	-Déficience de l'étanchéité -Dégradation du Revêtement [53]
-Ouvrage d'art pont OUED EL MALAH (photo 3-40)	-Chemin Wilaya le 20 au PK 26+800	-Enroulement des éléments métallique -Eclatement du	-Absence du revêtement -Absence de

		béton d'enrobage	protection contre l'affouillement des semelles des culées [53]
-Ouvrage d'art pont OUED LAHRECHE (photo 3-41)	-Chemin Wilaya le 88 au PK 0+045	-Instabilité du des talus -Engraissement du lit de l'oued	-Défaut d'entretien -Déficience de l'étanchéité [53]
-Ouvrage d'art pont OUED TARCHA (Photo 3-42)	-Chemin Wilaya le 94 au PK 0+140	-Efflorescence du béton en sous face de dalle -Fissure et éclatement du béton d'enrobage	-Ségrégation du béton -Absence du system d'évac**uation** d'eaux pluvial -Absence d'un système de drainage [53]
-Ouvrage d'art pont OUED BOUKMOURI (Photo 3-43)	-Route national 01 au PK 150+900	- Eclatement du béton d'enrobage -Corrosion d'armature	-Mauvaise qualité de béton -Manque d'entretien -Infiltration des eaux de ruissellement [53]
Ouvrage d'art pont OUED ELMALEH REBAIA(photo3-44)		-Fissure et éclatement du béton	-Manque d'entretien
Ouvrage d'art pont SEGHOUANE (Photo 3-45)	-Route national 01		-Mauvaise mise en œuvre
Ouvrage d'art pont OUED ELHAMAME (Photo 3-46)		-Engraissement du lit de l'oued - Eclatement du béton d'enrobage	-Manque d'entretien -Dégradation du revêtement
Ouvrage d'art pont OUED ELZABOUDJ (Photo 3-47)		- Eclatement du béton d'enrobage -Corrosion d'armature	-Mauvaise qualité de béton -Manque d'entretien -Infiltration des eaux de ruissellement

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

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



Photo 3-38 : Ouvrage d'art - pont OUED BOUHENECHE [53]



Photo 3-39 : Ouvrage d'art - pont OUED CHAIR [53]



Photo 3-40 : Ouvrage d'art - pont OUED EL MALAH[53]



Photo 3-41 : Ouvrage d'art - pont OUED LAHRECHE [53]



Photo 3-42 : Ouvrage d'art- pont OUED TARCHA [53]



Photo 3-43 : Ouvrage d'art- pont OUED BOUKMOURI [53]



Photo 3-44 : Ouvrage d'art - pont OUED ELMALEH REBAIA



Photo 3-45 : Ouvrage d'art - pont SEGHOUANE



Photo 3-46 : Ouvrage d'art - pont OUED ELHAMAME

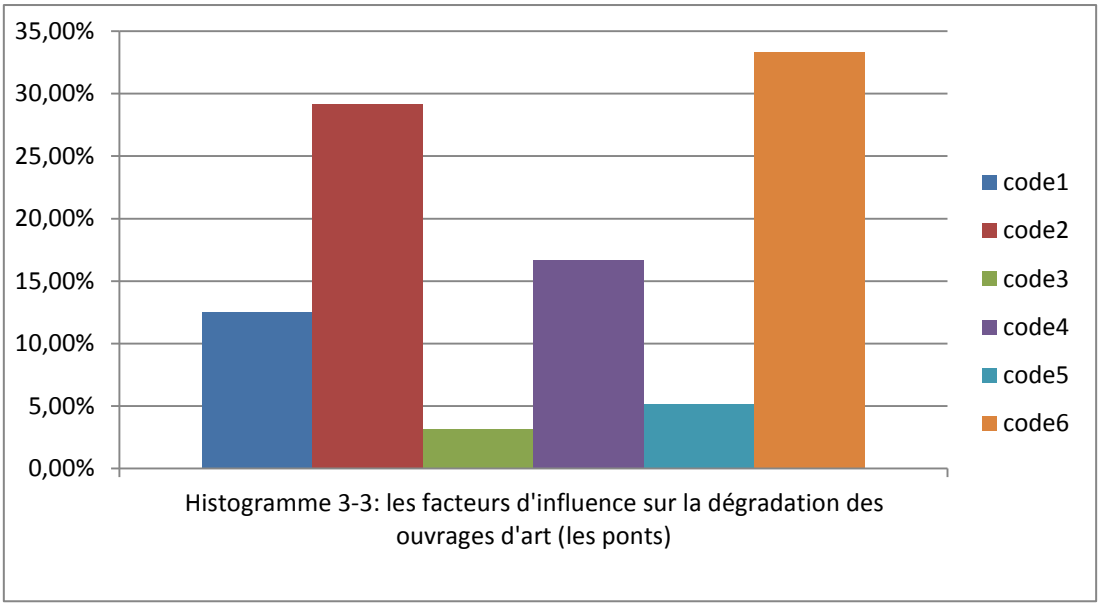


Photo 3-47 : Ouvrage d'art - pont OUED ELZABOUDJ

Interprétation des résultats :

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

- Dans 33 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien;
- Dans 5 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'exploitation;
- Dans 17% des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'environnement ;
- Les facteurs liés aux défauts de conception (3 %) ;
- Les facteurs liés à la mise en œuvre (29 %) ;
- Les facteurs liés à la nature des matériaux (13 %).



Histogramme 3-3: les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages d'art (les ponts)

4. Conclusion :

Nous avons vu que l'établissement d'un diagnostic se faisait en plusieurs étapes. La détermination des investigations à mener sur la structure est basée sur l'étude préalable des documents et une visite préliminaire de l'ouvrage. On effectue ensuite une inspection détaillée de l'ouvrage au cours de laquelle est réalisé un relevé des désordres. Ceux-ci sont qualifiés et quantifiés dans la mesure du possible à l'aide d'appareils et des techniques bien précises.

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

➢ Réparation pont oued chellif RN au PK 151+950

1 – INTRODUCTION

Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de constructions les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellant état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses. Il est quelque fois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, alors que les connaissances actuelles sur le ciment et le béton sont très approfondies.

Les questions que l'on se pose lors du diagnostic d'un ouvrage peuvent être résumées de la manière suivante :

Quelles sont l'origine et l'étendue des désordres ?

Quelles sont leur évolution probable et leurs conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ?

L'ouvrage est-il réparable et quelles sont les méthodes de réparation et/ou de protection appropriée ?

2 – DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

2.1 Localisation

Le pont **OUED CHELLIF** objet de l'étude de réparation est situé sur la route nationale n° 01. Cet ouvrage permet le franchissement d'oued **CHELLIF au point kilométrique 151+950.**

2.2 Nature de la structure

L'ouvrage est un pont en béton précontrainte d'alignement droit développant une longueur totale de 116.52 mètres, il est composé de trois (3) travées isostatiques.

Les travées sont constituées de cinq (05) poutres précontrainte de 31.9mètres d'longueur chacune. Le faisceau de poutres est entretoisé en about par des poutres en béton précontrainte. La dalle de couverture et de roulement portée par le faisceau de poutres est d'une épaisseur de 0.25 mètre.

Quant à l'infrastructure, elle est composée de deux appuis de rives qui sont des culées de type remblayées et deux appuis intermédiaires formés par des chevêtres parallélépipédiques portés par trois fûts circulaires.



Potho4-1 : *présentation de l'ouvrage*

3-DESCRIPTION DES DESORDRES OBSERVEES SUR LES PILES

De nombreux désordres ont été constatés sur cet ouvrage principalement fissuration du béton et corrosion des armatures provoquant l'éclatement du béton d'enrobage. Ces dégradations ont été observées sur les fûts,

3.1 Fûts : La dégradation se manifeste sous les formes suivantes:

-fissurations parallèles, verticales et équidistantes, la position des fissures coïncide le plus souvent avec la position des aciers ;

- Eclatement par endroits et début de décollement de plaques de béton ;
Corrosion importante des armatures observée après décapage de béton d'enrobage fissuré.



Potho4-2. Corrosion des armatures

4-CAUSES DE DEGRADATION

Ainsi la cause principale des dégradations est l'attaque chimique par les ions de chlorure (Cl-) qui provoque la corrosion des armatures et cette dernière engendre l'éclatement du béton.

Le manque d'enrobage dans certains endroits et la mauvaise qualité du béton remarquée par l'état du parement et la présence des niches de graviers ont favorisé la corrosion des aciers.

5. RÉPARATIONS

5.1 Elimination des causes directes

- Démolition des murs cachés construits sur les sommiers des supports (à faire en urgence) ;
- Mise en place de joints de chaussée étanches y compris dans les zones des trottoirs ;
- Elargissement des ouvertures des gargouilles.

5.2 Fûts

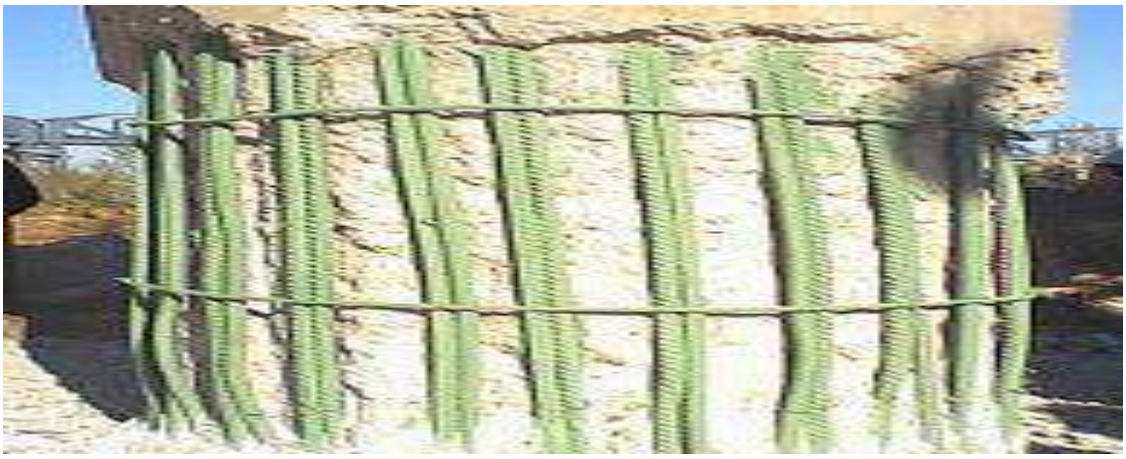
La réparation concerne les fûts endommagés cités précédemment. Les opérations à exécuter sont :

5.2.1 Préparation de la surface

- Piquer tout le béton détaché ou désagrégé sur toute la hauteur des fûts (y compris les parties enterrées) jusqu'à atteindre le béton sein (Figure 3);
- Mettre les armatures à nu en les dégageant d'au moins 2 cm tout autour ;
- Débarrasser les barres d'armatures de toutes les traces de rouille par sablage ;
-Rinçage et nettoyage par sablage de toute la surface du béton ;
- Les barres non exposées aux jets de sables doivent être nettoyées à l'aide d'une brosse métallique ;
- Traitement des armatures corrodées (Figure 4) par un produit anticorrosion généralement sous forme de kit pré-dosé composé de résine et durcisseur.
- Renforcer les armatures dont la section à diminuer par le rajout de nouvelles barres (Figure 4) en assurant un recouvrement total à la base des fûts, si les barres existantes sont fortement corrodées ;



Potho4- 3. Piquage du béton



Potho4-4. Traitement des armatures corrodées

5.2.2 Coffrage

Le coffrage, de préférence métallique, doit être muni de cales d'espacement destinées à assurer l'enrobage des armatures avec une augmentation du diamètre des fûts de 20 cm par rapport au diamètre initial. Cette augmentation de la section à pour but de facilité le coulage du béton et de renforcer la résistance des fûts.



Potho4-5. Renforcement des fûts dégradés

6. CONCLUSION

Ce chapitre présente les résultats du diagnostic et réparation réalisé sur un pont en béton armé. L'un des objectifs de cette étude était de déterminer les causes de dégradation des chevêtres et des fûts du pont. Les résultats des investigations convergent vers une attaque chimique par les ions de chlorures (Cl-) qui a provoqué la corrosion des armatures et cette dernière engendre l'éclatement du béton.

➢ *Réparation d'un ouvrage dégradé*

1-INTRODUCTION

Les ouvrages du génie civil présents sur nos territoires remplissent une fonction de service auprès de la population. Il s'agit par exemple d'assurer le transit de personnes et/ou de marchandises (ponts, tunnels, écluses, etc.) ou la distribution d'une ressource vitale (château d'eau, réservoir). Le maintien de ces ouvrages est nécessaire au bon fonctionnement de la société moderne puisqu'ils sont des points de liaison indispensables à la connexion des réseaux. De plus, certains d'entre eux, de par leurs valeurs architecturales, constituent une richesse historique et culturelle.

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.

Le projet qui nous a été confié, consiste à trouver les différent cas pathologique et établir une réparation à des désordres qui nous les retrouverons sur cette ouvrage.

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

Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un diagnostic nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné.

Au cours de ce travail, j'ai été amenée à réaliser de nombreux diagnostics sur cette structure en béton armé. Ce rapport a pour but de présenter le déroulement d'un diagnostic ainsi que les moyens techniques à notre disposition pour caractériser les désordres.

Cette étape est capitale pour préconiser des réparations adaptées et durables. L'objet de ce travail a également été l'occasion d'analyser une technique d'investigation plus en détails : l'auscultation ultrasonique, dans le cadre de la rédaction d'un guide d'utilisateur.

2-DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage étudié se trouve dans la wilaya de MEDEA justement au quartier REMALI, C'est un immeuble de (R+1) à usage d'habitation, comporte un RDC et un seul étage.

Notre structure est construite en **1978,** elle à un **âge** de 37 ans.

La dégradation est débuté a peut prêt en 2002.



Potho4-6 : présentation de l'ouvrage



Potho4-7 : *présentation de l'ouvrage*

2-1- Caractéristique géométrique de l'ouvrage

2-1-1- Dimension en élévation

La hauteur totale de la structure est du **6.40 m,** distribuée comme suite :

⇨ Hauteur des étages est : **3,20 m.**

⇨ Hauteur de RDC : **3,20m**.

2-1-2-Dimension en plan :

La largeur totale de la structure est du **15 m**



Potho4-8 : Caractéristique géométrique de l'ouvrage

Dans cet ouvrage nous sommes essentiellement intéressés à la dégradation du béton au-dessous de balcon

2-2- caractéristique géométrique des balcons

Le balcon est situé dans le premier étage

→ La hauteur de balcon par rapport au sol est de **3.20 m**

→ La longueur de balcon est de **8 m**

→ La largeur de balcon est de **1.7 m**





Potho4-9 : Caractéristique géométrique du balcon



Photo4-10 : vue générale du balcon

3-DESCRIPTION DES DESORDRES OBSERVEES SUR LE BALCON

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

Ces dégradations ont été observées au-dessous de balcon.



Photo4-11: La partie dégradée du balcon



photo4-12 : *La zone le plus touché (dégradé)*

Les figures 05 et 06 illustrent les dégradations constatées. Ces dernières se manifestent sous formes suivant :

→→ Epaufrure.

→→ Corrosion avancée des armatures.

→→ Détérioration du béton d'enrobage.

→→ Fissuration multidirectionnelle du béton.

→→ Désordre de mise en œuvre-ségrégation-.

→→ Colonisation biologique.

→→ Lixiviation du béton.

3-1- L'épaufrure :

Définition :

Les épaufrures correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragments laissant souvent Les armatures oxydés apparents ;

Les épaufrures sont logiquement la suite logique de la corrosion des Armatures de peau.



Photo4-13 : éclatement de béton et armatures apprentis

- **Les Causes**

-La corrosion d'armature qui provoque des pressions et gonflement qui mène a l'éclatement.

- **Le désordre**

1-laissant souvent les armatures Oxydés apparentes.

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

3-2 Corrosion des aciers d'armature

➢ Les Causes

La cause la plus provoqué cette corrosion c'est le problème d'infiltration d'eau qui diffusent à travers le béton de la dalle constituant le balcon et qui s'évaporent à la surface du béton.

La deuxième cause c'est l'absence des systèmes d'évacuation de l'eau ce qui permet aux eaux de pluie de pénétrer à travers les microfissures et attendre l'armature.

La troisième cause c'est l'enrobage qui est mal réalisé.



Photo4-14 : Absence d'étanchéité et système d'évacuation permet d'infiltration de l'eau

➢ Les désordres

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

- fissuration du béton au droit de l'armature ;
- décollement du béton au droit de l'armature ;
- armatures apparentes de plus en plus corrodées ;
- armatures foisonnantes avec perte de section.

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

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

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

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



Photo4-15 : présence de la corrosion de l'armature au-dessous de balcon



Photo4-16 : diminution du diamètre des armatures

3-3 Détérioration du béton d'enrobage.

Un enrobage insuffisant ne permet pas au béton de protéger les armatures de par son caractère basique .Il y a donc un risque plus élevé de corrosion des armatures.

Nous avant remarqué dans notre structure un éclatement important de béton voisin l'armature, cet Eclatement est dû essentiellement de la corrosion des armatures, cette corrosion provoque un gonflement, Une expansion qui pousse le béton qui se trouve autour de l'armature.



Photo4-17 : éclatement de béton d'enrobage



Photo4-18 : éclatement de béton d'enrobage dans différent endroit

➢ **Les Causes**

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

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

➢ **Le désordre**

La conséquence du au éclatement du béton d'enrobage sont multiple :

- ❖ L'exposition des armatures qui était couverte précédemment par le béton d'enrobage au agent agressif et notamment au air atmosphérique ce qui provoqué la corrosion.
- ❖ Diminution important des sections du béton qui diminuer la résistance.

3-4 Fissuration multidirectionnelle du béton

L'ouvrage est constitué de plusieurs fissure dû au plusieurs facteur thermique et mécanique et notamment dû au l'absence de cure et de maintenance du béton, ce qui permet d'évolution des microfissures au fissure qui laisse l'infiltration facile de l'eau a l'intérieure du béton.



Photo4-19 : présence de fissuration au-dessous du balcon

➢ **Les Causes**

Les causes des fissurations du béton sont plusieurs notamment :

- Présence permanent de **l'eau** qui créer des microfissures qui avec le temps devient des fissures que soit continu ou discontinus.
- Absence du poteau aux milieux des poutres porteur (travée très long).ce qui provoqué la **fléché** du porte au milieu
- Corrosion de l'armature provoque la fissuration par gonflement.
- L'humidité aussi provoqué des microfissurations
- Faute de réalisation et surtout apprêt la mise en œuvre du béton (retrait, ressuage,).

Les désordres

Les conséquences de fissuration du béton sont beaucoup parmi, ces conséquence on distingue :

- Facilité de mouvement et transport de l'eau et agents agressif a l'intérieure du béton.
- La propagation des fissures contrôle la résistance.
- Chute important de la résistance à la compression et à la traction.

3-5 Désordre de mise en œuvre-ségrégation:

Quelques zones de **ségrégation** ont été observées localement (voir figure12). La ségrégation est due à une vibration insuffisante du béton lors du coulage de l'élément qui engendre des caractéristiques physiques et mécaniques amoindries du béton (grande porosité, cohésion et résistance plus faible du béton…).

De nombreuses zones de **ragréage** ont été relevées, principalement sur les arêtes de poteaux. Ces ragréages ont certainement été réalisés lors de la construction du bâtiment, suite à des défauts observés sur les deux poteaux après son décoffrage : ségrégation ou enrobage insuffisant.



Photo4-20 : Ségrégation observée sur les deux poteaux

3-6 Colonisation biologique.

Ce désordre n'a aucune conséquence autre qu'esthétique lorsqu'il se limite à la présence de mousse. Il témoigne cependant de la présence d'humidité pouvant conduire au développement de la corrosion. La croissance de végétaux plus importants (arbustes) peut néanmoins conduite à une désorganisation structurelle ponctuelle.



Photo4-21 : Colonisation biologique

3-7 Lixiviation érosion, cavitation du béton.

Ces pathologies se caractérisent par la présence de granulats apparents sur le parement de l'élément en béton et sont toutes les trois dues à l'action de l'eau.

- Lixiviation : dissolution ponctuelle de la matrice cémenteuse.

- Erosion : « usure » de la matrice cémenteuse par les particules solides contenues dans l'eau.

- Cavitation : effet dynamique de l'eau.



Photo4-22 : Lixiviation du béton

➢ **Les désordres**

- ❖ Lessivage (délavage) des hydrates de la pâte du ciment.
- ❖ Augmentation de porosité du béton.
- ❖ Chute de résistance à la compression.
- ❖ Augmentation du fluage.

4-Techniques de réparation

➢ Elimination des causes directes

- Elargissement des ouvertures des gargouilles.

La technique la plus utilisée est le ragréage : consiste à reconstituer une partie de béton détérioré en appliquant un nouveau mortier ou résine

4-1-Nature des produits utilisés

- Les mortiers avec des ciments classiques ou spéciaux (prompt, alumineux, ..)
- Les résines époxydiques
- Les liants mixtes: hydrauliques + époxy

- remarque: dans ce cas de produits le dosage est délicat et il est conseillé d'employer des mortiers préposés,

4-2-Principes du traitement

4-2-1- Préparation du support

• élimination du béton endommagé (carbonaté) et non adhérant jusqu'à mise à nu du béton soin.

• Élimination de la peinture, poussière, huile, graisse et débarrasser les aciers de la rouille.

La préparation du support se fait par:

- Burinage, repiquage au marteau, sablage ou dépoussiérage à l'eau ou à l'air comprimé pour le béton,
- Burinage, brossage, sablage pour les armatures,

Remarque:

Avant le traitement de l'armature corrodée il est conseillé un dégagement par burinage d'un minimum de 2cm derrière l'armature.

4-2-2 Application d'une couche d'accrochage

• La couche d'accrochage a une fonction de coulage entre le vieux béton et le mortier de réparation.

• Elle est à base de résine époxy (primaire) si elle devrait assurer la protection des armatures (passivation).

• Elle est à base de liant hydraulique (mortier d'accrochage), avant l'application de la couche

D'accrochage, il faut humidifier la surface D'accrochage, (éviter l'excès d'eau) pour le mortier à base de liant hydraulique ou mixtes (liant + résines) par contre pour les résines il faut que la surface Soit sec.

4-2-3 Mise en œuvre du mortier de réparation

• Le mortier de réparation est appliqué immédiatement après l'application de la couche

D'accrochage (s'il est appliqué sur un primaire époxy celui-ci doit être encore poisseux (collant ou gluant).

• Un bon compactage s'impose du pt de vue adhérence et étanchéité. le mortier de réparation doit respecter certain critères:

- Une tenue verticale sans coffrage
- Adhérence supérieur à la cohésion du support
- L'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs
- Un coefficient de dilatation thermique équivalent au Béton support,

4-3- Traiter cas de dégradation

• Cause : manque d'enrobage



Photo4-23 : manque d'enrobage

Réparation des bétons :
Les réparations seront réalisées par l'application d'un revêtement de protection des armatures et d'un mortier de ragréage sur sols et ciels des balcons:
• Eliminer la rouille présente autour de l'armature par sablage avec remplacement de celle-ci dans le cas où sa section a diminué d'au moins 20 %.

• Sablage de l'ensemble des bétons

• Nettoyage et dépoussiérage des zones à réparer.

• Application bicouche d'un traitement anti corrosion sur les armatures afin de les prévenir de toute corrosion ultérieure.

• Application d'un produit de ragréage appliqué manuellement. Il s'agit d'un mortier hydraulique amélioré au moyen de fibres, d'adjuvants ou de polymères.

• La surface obtenue sera lissée et égalisée

• Objectifs

– Arrêter la corrosion des armatures

– Prévenir l'apparition de nouveaux désordres

– Etre efficace et durable

– Restaurer l'esthétique du bâtiment

– Redonner le milieu alcalin (pH >13)

• D'où une méthodologie spécifique

4-3-1 -Méthodologie de réparation

• Préparer soigneusement le support

– Purger le béton dégradé

– Dégager les armatures

– Eliminer la rouille

• Ne jamais laisser les armatures brossées ou sablées sans protection

4-3-1-1 Protéger les armatures

• Primaires d'accrochage

• Produits anticorrosion

• Produits passivant

• Peintures

4-3-1-2Mise en œuvre (mortier hydraulique)

• Support propre et dépoussiéré

• Humidifier les parties à réparer

• **Attention** à la température (gel, canicule)

• Tourner avec le soleil

• En cas de vent

– Produits de cure éliminée avant peinture

4-3-1-3La finition et la protection

• La durabilité de la réhabilitation

– Dépend du choix technique

– De sa mise en œuvre (applicateur)

• Application de peintures (genre RPE)

– Imperméabilisant

• Laisser respirer le support

• Etendre la finition dans les zones non touchées (action préventive)

Recommandation

L'objectif ultime du diagnostic est de proposer en connaissance de cause les principes qui doivent guider le gestionnaire d'ouvrage et/ou le bureau d'étude dans son choix de méthode de protection et de réparation des structures en béton:

- **-Protection du béton**

1-Protection contre la pénétration.

2-Contrôle de l'humidité.

3-Restauration des bétons.

4- Renforcement structure.

5- Résistance physique.

6-Résistance aux éléments chimiques.

- **-Protection des armatures**

1- Préservation ou restauration de la passivité.

2- Augmentation de la résistivité.

3- Contrôle cathodique.

4- Protection cathodique.

5- Contrôle des zones anodiques.

5. Conclusion :

Ce projet présente les résultats du diagnostic et réparation réalisé sur un balcon en béton armé. L'un des abjects de cette étude était de déterminer les causes de dégradation de balcon, et proposé la réparation possible.

Les résultats des investigations convergent vers une corrosion d'armature qui engendre l'éclatement du béton.

Pour réparer ce problème ont a utilisé des méthodes de réparations simple, normalisé et efficace

Malgré un état général structurel ne portant pas atteinte à sa stabilité, cet ouvrage doit impérativement subir des réparations pour maintenir les caractéristiques mécaniques des éléments, aujourd'hui ponctuellement amoindries.

Cette affaire n'a pas présentée de difficulté particulière, la majorité des désordres sont clairement dus à la corrosion des armatures et facilement identifiable.

CONCLUSION GENERALE :

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 très bas, sous réserve d'utiliser un super fluidifiant permettant de préserver une ouvrabilité et une compactibilité satisfaisante.

Nous avons vu que l'établissement d'un diagnostic se faisait en plusieurs étapes. La détermination des investigations à mener sur la structure est basée sur l'étude préalable des documents et une visite préliminaire de l'ouvrage. On effectue ensuite une inspection détaillée de l'ouvrage au cours de laquelle est réalisé un relevé des désordres. Ceux-ci sont qualifiés et quantifiés dans la mesure du possible à l'aide d'appareils et des techniques bien précises.
La dégradation des ouvrages dans la région de Médéa est devenue un sujet incontournable, après les problèmes survenus ces dernières années sur des différents sites de la région et pour des ouvrages de toute nature ce qui a révéler des lacunes supposées connues mais en réalités négligées par les praticiens ainsi que la gravité des conséquences de l'indifférence du personnel sous-traitant envers plusieurs paramètres, qui ont été pendant longtemps mal jugés.

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

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. Et il doit être intégré dans la formation de l'ingénieur pour que ce dernier puisse reconnaître et éviter les défauts touchants les structures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

[2] Cent ans de béton armé. 1949, Éd. Science et Industrie.

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

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

[5] Rougeau P., Guiraud P., «La durabilité dans le contexte normatif européen», LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'école des Ponts et Chaussées, mai 2008.

[6] Capmas A., «Béton et développement durable», LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'école des Ponts et Chaussées, mai 2008.

[7] Assié S., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Durabilité des bétons autoplaçants », Institut National des Sciences Appliqués de Toulouse, le 29 Octobre 2004.

[8] Zhu W., Quinn J., Bartos P. J. M., «Transport properties and durability of self-compacting concrete», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp, 451-458, 23-25 October 2001.

[9] Zhu W., Bartos P. J. M., «Permeation properties of self-compacting concrete», Cement and Concrete Research, 33, pp, 921-926, 2003.

[10] Tang L., Andalen A., Johansson J. O. and Hjelm S., «Chloride diffusivity of self-compacting concrete», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp, 187-198, 13-15 September 1999.

[11] Rougeau P., Maillard J. L. and Mary-Dippe C., "Comparative Study on properties of selfcompacting
concrete and high performance concrete used in precast construction", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp, 251-261, 13-15 September 1999.

[12] Audenaert K., De Shutter G., "Chloride penetration in self-compacting concrete" Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp, 818-825, 17-20 august, 2003.

[13] Aitcin P. C., Neuville A. et Acker P., «Les différents types de retrait du béton», Bulletin du LCPC 215, réf, 4184, pp, 41-51, mai - juin 1998.

[14] Audenaert K., De Shutter G., «Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete», Proceeding (SP 212) of the Dixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp, 451-465, juin 2003.

[15] Carde C., «Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés due à la lixiviation des matériaux cimentaires», Thèse de Doctorat, I,N,S,A Toulouse, 1997.

[16] Merdia A., Talah A., Kharchi F. et Chaid R., "Contribution à l"étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté", Colloque International CMEDIMAT2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.

[17] Mather B., « Sulphate attack on hydraulic cement concrete », Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p12-23, 2000.

[18] Norme Française NF P 15-010, Octobre 19897.

[19] Baron J., « Introduction à la durabilité des bétons », p 23-38, La durabilité des bétons, Presse de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.

[20] MESLEK Mohamed, la durabilité du béton Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de License en Génie civil

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

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

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

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

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

[26] Traitement des fissures – FABEM – Guide du STRES.2010

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

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

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

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

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

[33]. Bertrand SCHWARTZ, "Réhabilitation des bâtiments. Structures et enveloppe, solutions techniques", Edition Lavoisier, 2010.

[34]. PASCALE JOFFROCY, " La réhabilitation des bâtiments: Conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements", Editions du Moniteur, 1999.

[35]. PIERRE GISSEROT, " Entretien et exploitation des bâtiments public", Editions du Moniteur, 1977.

[36]. JEAN PERRET," Guide de la maintenance de bâtiments", Editions du Moniteur,1997.

[37]. PIERRE LARAPIDIE," Pas de bonne réhabilitation sans diagnostic", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Avril 1994.

[38]. GEORGES BORNAND, " Le diagnostic en habitat existant", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Mars 1985.

[39]. LEBON.B, " Réhabilitation et développement urbain", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Novembre 1982.

[40]. PATRICK BERGER, VINCENT BARRE, " Réhabilitation: 9 opérations exemplaires", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Décembre 1982.

[41]. MAURICE BUISSON, LOUIS BOURGINE, " Expertise des constructions en vue de leur consolidation", Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment, Tome 2, Librairie Aristide Quillet, 1976.

[42] ESSELIMANI Mohamed, Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie civil, Option Structures diagnostique et étude pathologique de site CEM benyekhlaf khadidja médéa

[43] MÉMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER EN GÉNIE CIVIL Spécialité : Construction Par : Mr. Touhami TAHENNI

[44] Brunetaud X., Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, «Etude de l'‟influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'‟amplitude de la réaction sulfatique interne au béton », Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris, le 08 Décembre 2005.

[45] Pavoine A., «Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite», Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003.

[46] Mehta P. K., "Concrete: structure, properties and materials"; Prentice-Hall, p, 105-169, Ed, 1986.

[47] Planel D., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Les effets couplés de la précipitation d'‟espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons», Université de Marne La vallée, UFR des Sciences et Technologies, le 04 Juin 2002.

[48] Skalny J. et Pierce J. S., « Sulphate attack issues», Seminar on sulphate mechanisms, Quebec City, Quebec, Canada, October 5 and 6 1998.

[49] Cohen M. D. et Mather B., "Sulfate attack on concrete – Research needs", ACI Materials Journal, Vol, 24, N° 1, pp., 177-202, 1991.

[50] (ACI-Committee-222 2001)

[51]**.** SIDNEY M.JOHNSON, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.

[52]**.** VICTOR DAVIDOVICI, " Enseignements tirés de la fissuration des structures en béton armé", Formulaire du béton armé, Tome 2, Editions du Moniteur, 1997, (286-295).

[53] CHAOUI Abdelraouf, Diagnostic des structures en béton armé dans la région de Médéa, Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master en génie civil

[54] Spécificités des dégradations dans les bétons du patrimoine Luc COURARD et Astrid LEJEUNE Université de Liège, Belgique Journée d'études, Beez, 9 novembre 2012

ANNEXES
Normalisation NF P 95-101

AFNS NF P 95-101 93 ■ 1012372 0479223 179 ■

ISSN 0335-3931

norme française

NF P 95-101
Novembre 1993

Indice de classement : **P 95-101**

Ouvrages d'art

Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie — Reprise du béton dégradé superficiellement

Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés

E : Engineering structures — Repair and strengthening of concrete and masonry constructions — Consolidation of the deteriorated concrete skin — Specification pertaining to the technique and the materials used

D : Bauwerke — Instandsetzung und Verstärkung von Bauwerken aus Beton und Mauerwerk — Verstärkung des beschädigten Betons — Spezifikationen über die angewandte Technik und die eingesetzten Werkstoffe

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 5 octobre 1993 pour prendre effet le 5 novembre 1993.

correspondance À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux internationaux ou européens sur le même sujet.

analyse Dans la série des normes P 95-101 à P 95-107 qui concernent les techniques de réparation d'ouvrages d'art, le présent document définit les spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés pour la reprise du béton dégradé.

descripteurs **Thésaurus International Technique** : ouvrage, réparation, renforcement, béton, constituant, mise en œuvre, essai, contrôle, réception, hygiène, sécurité.

modifications

corrections

éditée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), tour europe cedex 7 92049 paris la défense — tél. : (1) 42 91 55 55

AFNOR 1993 © AFNOR 1993 1er tirage 93-11