



**Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem**

Faculté des sciences et de la technologie  
Département de Génie Civil & Architecture

**RAPPORT DE FIN D'ETUDE**

Présenté pour obtenir

**LE DIPLOME DE MASTER EN GENIE CIVIL  
OPTION : STRUCTURE**

Présenté par

**BOUSMAT ABDELKADER  
BELHACEN Mohamed Alaà Eddine**

**Synthèse bibliographique sur les principales dégradations  
affectant les constructions en béton armé**

**Examiner par :  
Bouhadjeb Kada**

**Encadreur  
Examineur  
Président**

*Année universitaire : 2019-2020*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCIEMENTS

Nous attribuons toute notre grâce et notre gratitude au tout puissant Dieu de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions aussi les membres de nos familles qui nous ont soutenu tout au long de notre vie.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadreur Mr. BOUHADJEB Kada, pour nous avoir guidée à réaliser ce modeste travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Les remerciements seraient incomplets sans ceux, les plus sincères, adresser à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

On tient aussi à remercier tous ceux et celle qui nous ont apporter de l'aide de prêt ou de loin pour réaliser ce modeste travail.

## DÉDICACE

On dédie ce travail a :

- Aux membres de nos familles qui ont tant fait pour nous voir concrétisé nos projets et pour les sacrifices qu'ils ont fait pour nous voir ce que nous sommes aujourd'hui.
- Nos parents particulièrement.
- A nos amis a qui nous souhaitons tous nos vœux de réussite.
- Aux enseignants qui ont tenu à nous voir réussir.
- La promotion 2019 génie civil.

# Sommaire

Remerciement.....	2
Dédicace.....	3
Sommaire.....	4
Liste des figures.....	7
Chapitre I : Introduction générale.....	8
I.1 : Objectif du projet de fin d'études .....	11
I.2. Plan de la thèse.....	11
Chapitre II : DESCRIPTION DES DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT LE BETON ARME.....	12
II.1 : Introduction.....	13
II.1.1 : Historique.....	13
II.1.2 : le béton armé.....	13
II.2 : Facteurs et origines des dégradations.....	17
II.2.1. Actions environnementales Facteurs liés à l'environnement du béton.....	17
II.2. 1.1. Ambiance climatique et atmosphérique de l'ouvrage.....	17
II.2. 1.2. Milieu Extérieur Agressif.....	18
II.3. LES DIFFERENTS ATTAQUES DE DEGRADATION.....	19
II.3.1. Réactions et attaques chimiques.....	19
II.3. 1.1. Action du gaz carbonique (carbonatation du béton).....	19
II.3.1.2. Action des chlorures .....	19
II.3.1. 3. Alkali-réaction (cancer du béton).....	19
II.3.1.4. Action des sulfates.....	22
II.3. 1.5. Corrosion.....	22
II.4. La carbonatation.....	23
II.4.1. La carbonatation.....	23
II.4.1.1. Les conséquences de la carbonatation.....	26
II.4.1.2. La mesure de la carbonatation.....	26
II.5. REACTIONS MECANIQUES.....	28
II.6. REACTIONS PHYSIQUES.....	30
II.6. 1 Retrait.....	30
II.6. 2. Ressuage.....	31
II.7 DEGRADATIONS DUES AUX FACTEURS DE TEMPERATURES EXTREMES.....	32
II.8. LES AUTRES CAUSES DE DEGRADATION DES BETONS.....	35
II.8.1. Mauvais positionnement des armatures.....	35
II.8.2. Mauvaise qualité des bétons employés.....	35
II.8.3. Vibration trop importante.....	36
II.8.4. Absence de cure du béton.....	36
II.8.5. Cycle humidité / sécheresse.....	36
II.9. Conclusion.....	36
Chapitre III : Principales méthodes de diagnostic et d'évaluation des ouvrages en béton armé.....	37
III.1 : Introduction.....	38
III.2 : Auscultation, évaluation et diagnostic.....	38
III.2.1. Définition des termes.....	38
III.2.2. Pourquoi ausculté, évaluer ou posé un diagnostic ?.....	38
III.2.3. L'auscultation sonique.....	41
III.2.3.1. Les mesures de surface.....	41
III.2.4. But de l'auscultation.....	41
III.2.5. Différences entre les techniques d'auscultation.....	42
III.2.5.1. Techniques d'auscultation destructives.....	42
III.3. Examen visuel des structures.....	42
III.3.1. Etendue de l'examen visuel.....	43
III.3.2. Principe.....	43
III.3.3. Préparation.....	44

III.3.4. Accessibilité.....	44
III.3.5. Equipement.....	44
III.3.6. Relevé.....	45
III.4. Evaluation.....	45
III.4.1. Base de l'évaluation.....	45
III.4.2. Objet de l'évaluation.....	46
III.4.2.1. Evaluation des résultats des auscultations.....	46
III.5. Diagnostic.....	46
III.5.1. Définition.....	46
III.5.2. Diagnostic d'un ouvrage.....	46
III.5.3. Réalisation d'un diagnostic.....	47
III.5.4. Rapport d'un diagnostic.....	47
III.5.5. Les principales étapes d'un diagnostic.....	47
III.5.6. Diagnostic visuel.....	49
III.5.7. Diagnostic par prélèvement.....	50
III.5.7.1. Méthodes de prélèvements.....	50
III.5.7.2. Prélèvement sur site.....	50
III.5.7.3. Prélèvement d'acier.....	51
III.5.7.4. Echantillonnage.....	52
III.5.7.5. Objectif de l'échantillonnage.....	53
III.6. Méthodes destructives.....	53
III.6.1. Le contrôle destructif et ses limites.....	53
III.6.1.1. Représentativité de l'information recueillie.....	53
III.6.1.2. Étendue spatiale de l'information recueillie.....	53
III.6.1.3. Accessibilité et sensibilité de l'ouvrage.....	54
III.6.1.4. Aspect économique.....	54
III.6.2. Essais destructifs.....	54
III.6.2.1. Le carottage.....	54
III.6.2.1.1. Introduction.....	54
III.6.2.1.2. A quoi sert un carottage.....	54
III.6.2.1.3. Le but de carottage.....	54
III.6.2.1.4. Le Principe de carottage.....	55
III.6.2.1.5. Matériel spécifique employé.....	55
III.6.2.2. Analyse en laboratoire.....	56
III.7 Conclusion.....	56
Chapitre IV : REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME.....	57
IV.1. Introduction.....	58
IV.2. LES DIFFERENTES METHODES DE REPARATION.....	59
IV.2.1 Le Ragréage.....	59
IV.2.2. Le Béton Projeté.....	60
IV.2.2.1. Définition.....	60
IV.2.2.2. Technique de projection.....	61
IV.2.3. Tissus de fibres de carbone.....	62
IV.3. CAS DE REPARATION.....	63
IV.3.1. Réparation du béton due à la carbonatation.....	63
IV.3.1.1. Technique de réparation (carbonatation).....	63
IV.3.1.2. Le Traitement des armatures.....	63
IV.3.1.3. La Réparation du béton.....	64
IV.3.1.4. La finition.....	64
IV.3.2. Réparation des désordres superficiels.....	65
IV.3.2.1. Traitement des fissures.....	65
IV.4. CONCLUSION SUR LES REPARATIONS.....	66
IV.5. LES REVETEMENTS.....	66

IV.5.1. Le revêtement imperméabilisant.....	66
IV.5.1.1. Les peintures.....	67
IV.5.1.2. Les lasures.....	67
IV.5.1.3. Les revêtements minces.....	67
IV.5.1.4. Les enduits de façade.....	67
Chapitre V : Conclusion générale.....	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	70

# Liste des figures

## **Chapitre II : DESCRIPTION DES DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT LE BETON ARME**

Fig. II.1. : Vue au microscope électronique d'un ciment durci.....	14
Fig. II.2: Procédé de fabrication du ciment et du béton.....	15
Fig. II.3: Aciers pour béton armé, .....	16
Fig. II.4: Dégradation du béton armé.....	16
Fig. II.5: Exemple de béton dégradé par l'alcali-réaction.....	20
Fig. II.6: réactions alcalis-granulats.....	21
Fig. II.7: Exemple d'échantillon carbonaté (7x7x28 cm).....	21
Fig. II.8 : Éclatement du béton dû à la carbonatation.....	21
Fig. II.9 : Corrosion par carbonatation.....	24
Fig. II.10 : En se corrodant, les aciers.....	24
Fig. II.11 : Corrosion importante en sous face d'une poutre pont Port de Mostaganem.....	25
Fig. II.12 : Oxydation générale du chevrete Pont Passiti (Oran).....	25
Fig. II.13 : Schéma de principe de la formation de la carbonatation.....	26
Fig. II.14 : La progression de la carbonatation.....	27
Fig. II.15 : Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse.....	27
Fig. II.16: Abrasion du béton.....	28
Fig. II.17: Erosion du béton.....	29
Fig. II.18: Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont.....	29
Fig. II.19: Fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes.....	29
Fig. II.20: Délamination du béton.....	30
Fig. II.21 : Ressuage du béton après vibration.....	31
Fig. II.22 : structure en béton armé dégradée par le feu.....	32
Fig. II.23 : béton après un incendie.....	33
Fig. II.24 : Exemple de dommages causés par le gel-dégel.....	35
Fig. II.25 : bétons affectés par le gel interne.....	35
Fig. II.26: béton affecté par l'écaillage.....	35

## **Chapitre III : Principales méthodes de diagnostic et d'évaluation des ouvrages en béton armé**

Fig III.1: Articulation des phases dans une démarche de diagnostic.....	45
Fig III.2 : Exemples d'équipement : Documentation, appareils de mesure, outillage.....	45
Fig III.3 : Prélèvement d'acier.....	51
Fig III.4 : Prélèvement sur le chantier.....	52
Fig III.5 : Quartage.....	53

## **Chapitre IV : REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME**

Fig. IV.1 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé.....	59
Fig. IV. 2 : Dégagement des armatures.....	60
Fig. IV. 3 : Projection de béton.....	61
Fig. IV. 4 : Béton projeté par voie sèche.....	61
Fig. IV. 5 : Béton projeté par voie humide.....	62
Fig. IV.6 : Tissus de fibre de carbone.....	63
Fig. IV. 7 : Technique De Réparation (carbonatation).....	63
Fig. IV. 8 : Traitement Des Armatures.....	64
Fig. IV. 10 : Finition.....	65
Fig. IV.11 : Mise en place d'un revêtement de surface.....	68
Fig. IV. 9 : Réparation Du Béton.....	69

## ***INTRODUCTION GENERALE***

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

Evaluer la sécurité d'un ouvrage de génie civil en service, détecter les comportements anormaux, déterminer les origines d'une dégradation ou expertiser les causes d'un incident, prévoir les évolutions futures et les risques potentiels, décider des mesures appropriées ... telles sont les missions de diagnostic et d'analyse de risques accomplies par les ingénieurs spécialisés du génie civil.

Toutefois, face à des ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes et des moyens dépassés ou inadaptables, lors de diagnostics préliminaires, en situation d'urgence ou encore en synthèse d'analyses approfondies, il est nécessaire de recourir au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir alors une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée.

L'expert joue un rôle incontournable pour le diagnostic et l'analyse de risques des ouvrages en service.

Disposer d'une capacité d'expertise appréciable apparaît donc comme un objectif essentiel des exploitants de ponts, des bureaux spécialisés qui les assistent et des services de l'administration qui les contrôlent. Les enjeux sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et des biens menacés en cas de rupture, mais aussi la gestion des ouvrages la mieux adaptée (continuité de service, optimisation de leur maintenance, durabilité).

Dans le contexte des ouvrages ponts, les travaux de recherche réalisés ces dernières décennies ont développé des approches physiques, fonctionnelles ou statistiques, et des méthodes puissantes ont été mises au point : modélisation des lois de comportement, calculs par éléments finis, modèles statistiques, études de sûreté de fonctionnement...

A partir de données abondantes (auscultation, prospection, essais...) et appuyées par l'analyse experte, ces approches sont performantes pour le diagnostic et l'analyse de risques approfondis des ponts.

En revanche, il n'y a eu que peu de travaux destinés à développer l'approche experte et les quelques initiatives visant à constituer des bases de données d'incidents de ponts. Les difficultés apparaissent très importantes : absence de méthodologie, données variées, mécanismes de vieillissement complexes et multiples, imprécision et incomplétude des informations, manque de transparence et réticence à la communication...

Toutefois, les informations disponibles peuvent rester incomplètes ou même imprécises, en raison d'incertitudes sur les dimensions géométriques, les propriétés des matériaux, les caractéristiques des dégradations ou l'environnement extérieur. De plus, la structure se situe dans un environnement où les actions qu'elle subit ne sont pas toujours précisément connues. Ceci conduit à un grand nombre d'incertitudes qu'il est nécessaire d'appréhender et de considérer dans le processus d'évaluation. Pour cette raison, l'analyse de la performance des ouvrages existants se doit d'être développée également sur des bases de suivi régulier des ouvrages en service qui comprend des inspections et des prospections (surveillance organisée, inspection détaillée périodique...), des mesures spécifiques de certains dommages et des évaluations structurales. L'évaluation structurale d'une structure ou d'un élément de structure consiste à vérifier sa sécurité structurale (ou intégrité) et son aptitude au service. Ce processus est d'une grande importance, car il permet de vérifier si la structure se trouve ou non dans des conditions acceptables de sécurité et de fonctionnement. Il est également supposé être capable de tenir compte au mieux des données spécifiques de l'ouvrage telles que son trafic réel ou l'altération de sa résistance causée par d'éventuelles dégradations.

Les visites et les inspections des ouvrages d'art, faites dans le cadre de la surveillance et de l'entretien du patrimoine, mettent souvent en évidence un vieillissement prématuré de certains éléments des structures et des équipements.

Dans la plupart des cas, les défauts sont initiés par une mauvaise conception, un choix de constituants mal adaptés aux conditions d'environnement, des erreurs dans la mise en œuvre, ou encore un manque d'entretien.

Pour ce qui concerne la conception par exemple, on note qu'une meilleure approche des problèmes à l'amont permettrait d'améliorer de nombreux points de détails. Ainsi on pourrait éviter des erreurs qui s'avèrent coûteuses durant la vie des ouvrages, moyennant des surcoûts mineurs au stade de la construction

## 1.1. Objectif du projet de fin d'études

Le présent travail consiste à une initiation à la recherche par l'élaboration d'une synthèse bibliographique portant sur le diagnostic et la réparation des ouvrages en béton armé. L'objectif de cette analyse permettra d'acquérir une expérience pour d'éventuel futur travail de recherche. Il aura pour but d'étudier les phénomènes de dégradations des ouvrages en béton à travers une analyse des pathologies existantes et leurs origines. D'une façon précise, ma recherche est centrée sur deux axes :

- Le premier axe sera consacré à une recherche bibliographique avec une revue des dégradations des structures en béton armé et leurs facteurs d'influence, ainsi que les causes des différents types de dégradations des constructions en général et du matériau béton en particulier.

Un état d'art a été réalisé sur les différentes pathologies et plus précisément sur celles en rapport avec le matériau béton armé. Le choix du béton armé est du, d'une part, au fait qu'il soit plus utilisé dans la construction des ouvrages et d'autre part, parce qu'il permet d'étudier une panoplie de dégradations.

- Le deuxième axe portera sur les procédures de diagnostic et les méthodes de réparation des ouvrages existants.

Ce travail s'inscrit donc, dans le cadre d'une analyse modeste et non exhaustive, à vocation de diagnostic et d'investigation des ouvrages en béton armé.

## 1.2. Plan de Travail

En plus d'une introduction, cinq chapitres seront présentés dans ce mémoire.

Le présent premier chapitre est une introduction générale sur les pathologies des constructions.

Le deuxième chapitre présente une revue sur les principales dégradations du béton et leurs origines.

Le troisième chapitre, est consacré au diagnostic des structures en béton armé et les différentes étapes d'investigation.

Enfin, le quatrième chapitre porte sur les méthodes de réparation des dégradations des constructions en béton armé.

## **CHAPITRE II**

# **DESCRIPTION DES DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT LE BETON ARME**

## CHAPITRE II

# DESCRIPTION DES DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT LE BETON ARME

### II.1. Introduction

Le béton armé, matériau de construction par excellence, a bénéficié de nombreuses études et de multiples expérimentations si bien que divers règlements se sont succédés de 1927 jusqu'à nos jours: circulaire de 1927 puis de 1934 ; B.A. 45, B.A. 60, CCBA 68, BAEL 80, BAEL 91, Eurocode.

L'acier et le béton forment un couple complémentaire dans lequel l'acier renforce les caractéristiques mécaniques du béton en traction et le béton protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. L'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé qui confère une protection chimique aux armatures noyées dans le béton.

#### II.1.1. Historique

Le béton dans son sens actuel fut introduit par l'ingénieur Bélidor dans "L'architecture hydraulique" en 1737. L'invention du ciment par Vicat en 1817, puis celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 préparèrent l'avènement du béton.

L'apparition des premiers bétons se situe à la fin du premier quart du 19ème siècle lorsque la chaux hydraulique, liant utilisé jusqu'alors, est remplacée par le ciment Portland.

C'est vers 1870 que l'on introduit des barres d'acier dans le béton afin de compenser sa faible résistance à la traction, donnant ainsi naissance au béton armé. Cependant, ce n'est que vers 1900 que le béton armé remplace peu à peu les structures métalliques dans la construction d'ouvrage de génie civil. Le béton prendra son plein essor lorsqu'on y introduira des armatures métalliques qui lui confèrent une bonne résistance à la traction. Ainsi, les progrès réalisés au 20ème siècle ont fait que le béton armé est devenu aujourd'hui le principal matériau de construction.

#### II.1.2. le béton armé

Le béton armé est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Il est facile à fabriquer, résistant, durable et se prête à une variété d'usages allant des travaux publics au design high-tech. Ce matériau offre aux constructeurs un outil extraordinaire pour dépasser les formes et les dimensions habituelles. Pour ces raisons, le béton armé est un matériau très demandé et l'on estime que son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir.

Le béton résiste très bien à la compression mais sa résistance à la traction est très faible (10 à 15 fois moins). C'est pourquoi on lui associe l'acier pour absorber les efforts de traction. Seulement, ces efforts sont transmis à l'acier noyé à l'intérieur du béton par le biais de l'adhérence entre les deux matériaux. Dans la pratique, le béton subit les efforts de traction avant leur transmission à l'acier et donc se fissure

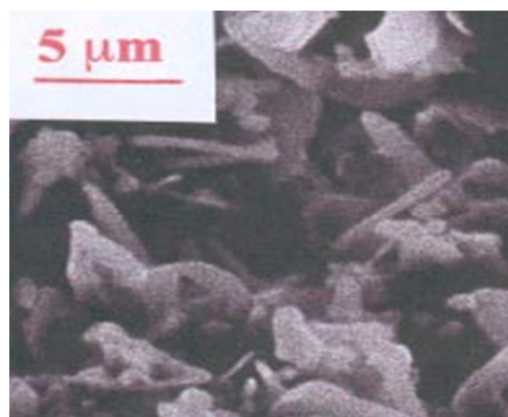
La résistance à la compression est la propriété du béton la plus communément considérée pour qualifier un béton structural. Cependant la résistance en traction est aussi un critère de qualité, particulièrement pour les bétons d'autoroute, les dalles flottantes, et d'une manière générale lorsqu'il s'agit d'efforts de cisaillement et de résistance à la fissuration[1].

### a) Le Béton

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné. Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant (hydraulique). Il est lui-même composé de clinker, associé parfois à des constituants secondaires tels que le laitier de haut fourneau, un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai et du coke métallurgique, des cendres volantes ou des fillers calcaires.

Suivant la proportion de ces éléments, on distingue cinq types de ciment : ciment Portland, ciment Portland composé, ciment de haut fourneau, ciment de haut-fourneau à haute teneur en laitier, ciment aux laitiers et aux cendres. Les autres types de ciment sont réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur. Ils sont tous indiqués pour les travaux souterrains, les ouvrages massifs en eaux agressives.

Après durcissement, une pâte de ciment est constituée de grains juxtaposés et plus ou moins enchevêtrés (Fig.II.1).



**Fig. II.1. : Vue au microscope électronique d'un ciment durci**

Les étapes de la fabrication du béton sont résumées dans la Figure.II.2

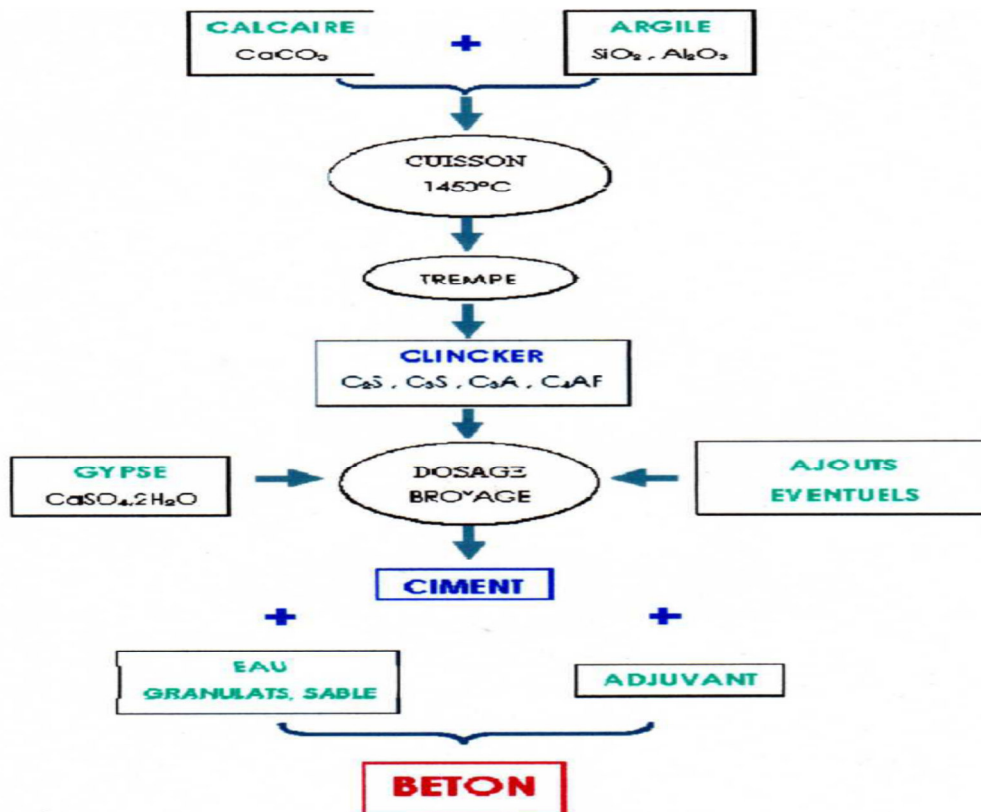


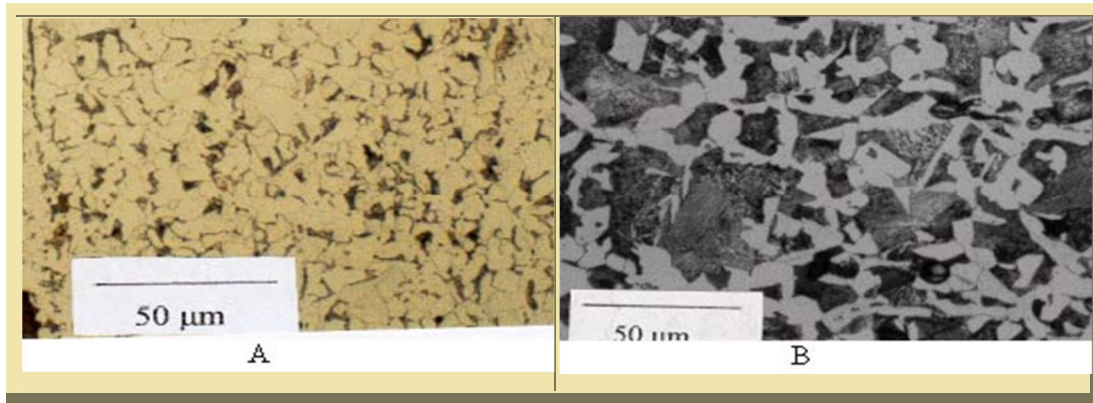
Fig. II.2: Procédé de fabrication du ciment et du béton

### b) L'acier

Les armatures du béton (armé) sont des aciers au carbone non alliés ou parfois micro-alliés (avec une très faible teneur en molybdène ou chrome, par exemple). La teneur en carbone varie généralement entre 0,2% et 0,4%.

Certaines armatures sont mises en forme par laminage à chaud (vers 1000°C) et refroidies lentement (" aciers laminés "). D'autres sont écrouis (fortement déformés) après ce laminage, pour augmenter leur résistance à la traction (" aciers écrouis ").

Des examens métallographiques permettent de caractériser ces types d'armatures (Fig. II.3).

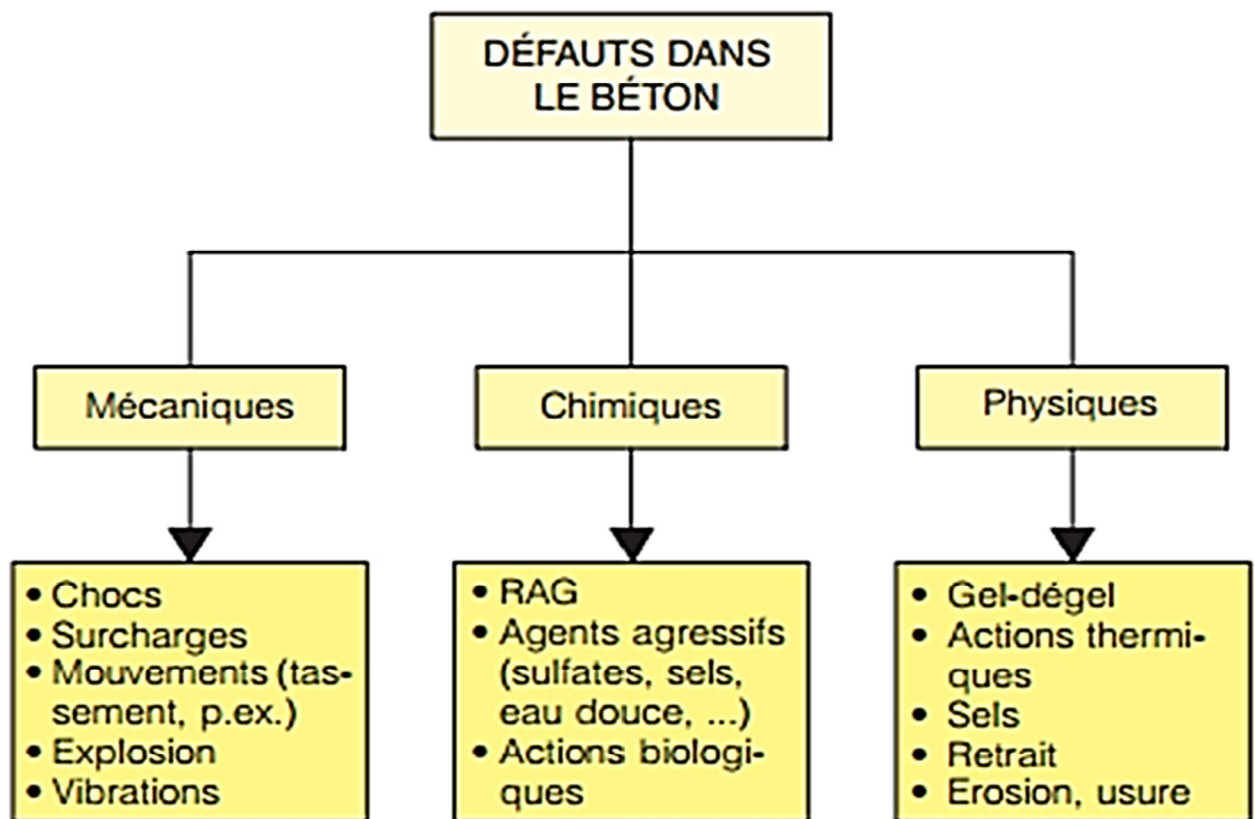


**Fig. II.3: Aciers pour béton armé,**

**Les grains à forte teneur en carbone apparaissent en sombre.**  
**A : acier " laminé "**                      **B : acier " naturellement dur "**

**II.2.1. Schéma descriptif des pathologies du béton armé**

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



**Fig. II.4: Dégradation du béton armé**

## II.2. Facteurs et origines des dégradations

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

### II.2.1. Actions environnementales Facteurs liés à l'environnement du béton

Les facteurs et origines des désordres et dégradations du béton (béton et/ou acier des armatures) et des ouvrages en béton sont très divers, et peuvent être liés à l'environnement de l'ouvrage.

C'est l'environnement dans lequel va se trouver le béton frais ou le béton durci tout au long de sa durée de vie. La notion d'environnement englobe l'ambiance climatique et atmosphérique, ou le milieu extérieur particulièrement agressif dans lequel va se trouver l'ouvrage[2].

#### II.2. 1.1. Ambiance climatique et atmosphérique de l'ouvrage

Concerne surtout le béton frais au cours de son durcissement et le béton durci. Ainsi, la durabilité et les propriétés du béton peuvent être grandement affectées par :

- la température ambiante, les cycles thermiques et l'écart de température
- l'hygrométrie ambiante (humide ou sèche), la pluviométrie, la vitesse du vent et les cycles humidité/sécheresse ou humidité/vent
- les cycles du gel/dégel, surtout si le gel est sévère

**Les agents atmosphériques chimiques** : CO<sub>2</sub>, eau de pluie, embruns marins. Ces données climatiques et atmosphériques doivent être considérées lors de l'élaboration et de la mise en œuvre du béton, au risque d'avoir des dégradations préjudiciables pour la durabilité du béton, dont quelques exemples:

- **des variations dimensionnelles et retraits excessifs**, qui peuvent engendrer des fissurations pénalisantes pour la durabilité du béton, surtout si elles sont précoces, causés par de grands écarts de température, par une ambiance sèche ou par le vent, par des cycles de température, des cycles d'humidité relative...
- **la fissuration interne du béton durci**, causée par le gel sévère due au l'utilisation de sels de déverglaçage (écaillage du béton, corrosion de l'acier des armatures).
- **dessiccation et arrêt d'hydratation du béton frais en surface** (c'est-à-dire de la peau du béton), couche très importante dans la protection de l'acier des armatures et du cœur du béton des agressions externes. Cette dessiccation peut être causée par un environnement sec, par la vitesse du vent, par une élévation de température...
- **accélération de certains processus chimiques de dégradation**, causée par un taux d'humidité relative élevé et/ou par une élévation de la température [2].

### II.2. 1.2. Milieu Extérieur Agressif

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux, industriels ou naturels, agressifs pour le béton et/ou l'acier des armatures, dont on peut citer les plus courants :

- **l'environnement marin** (eau de mer ou embruns marins sur une bande littorale). L'eau de mer contient des éléments chimiques (sulfates, chlorures, magnésium, CO<sub>2</sub>...), L'attaque de ces éléments se fait d'abord en surface puis pénètre au cœur du matériau, qui peuvent dégrader le béton mais surtout causer un gonflement du matériau puis une fissuration, et la corrosion des aciers par l'action des chlorures, ou par la carbonatation du béton.
- **les milieux sulfatiques** : eaux superficielles ou souterraines, sols et terrains chargés, eau de mer, milieux industriels..., Les sulfates ont la possibilité de dégrader le béton (ils peuvent provoquer la fissuration du béton)
- **milieux contenant des chlorures** : milieux marins ou industriels, Les chlorures ont surtout la particularité de causer la corrosion de l'acier des armatures, en dépassant leur couche superficielle protectrice, par baisse du pH du béton.
- **milieux acides, eaux pures et douces**, ont une action d'érosion et de dissolution des constituants du béton, surtout la portlandite, et causent ainsi la réduction de la compacité du béton, la chute de sa résistance mécanique..., avec comme conséquence la mise en péril de la santé des armatures.
- **actions biologiques** (micro-organismes, algues, bactéries) [2]. Les attaques bactériologiques par exemple se produisent dans des bâtiments situés dans des climats particuliers, ou dans les structures en contact avec des eaux usées (canalisations d'assainissement et stations d'épuration). Lors des longs séjours des eaux usées, l'activité bactérienne entraînera la formation des éléments chimiques, causant la corrosion des armatures, et attaquant la portlandite pour former du gypse (secondaire), qui réagit à son tour avec les aluminates du ciment, pour former de l'ettringite secondaire, occasionnant une expansion dans le béton durci [3].
- **attaque du béton par des agents chimiques et organiques** dans des milieux industriels (huiles, graisses, pétrole, solvants, eaux résiduaires, gaz...).

## II.3. LES DIFFERENTS ATTAQUES DE DEGRADATION

### II.3.1. Réactions et attaques chimiques

Les armatures en acier sont naturellement protégées par le béton qui libère une solution basique ( $\text{PH} > 13$ ). L'acier des bétons armés est passif, Cependant plusieurs agents peuvent s'attaquer à cette protection de fait et provoquer des fissurations du béton et un risque potentiel de détérioration des armatures.

#### II.3.1.1. Action du gaz carbonique (carbonatation du béton)

Au contact du gaz carbonique de l'air, le béton se carbonate, ce qui entraîne une baisse de PH de l'eau des pores du béton et supprime l'immunité dont bénéficie l'acier.

L'acidité des eaux de pluie provoque une réaction de dissolution du béton. En effet le PH élevé du béton lui confère une réactivité avec les acides d'une manière générale. Cette dissolution se manifeste aussi bien sur la pâte de ciment que sur les granulats lorsque ceux-ci sont calcaires. La surface du béton est attaquée et se désintègre, le béton devient poreux et cette porosité accélère la rouille de l'armature lors d'une réaction chimique appelé : carbonatation.

La vitesse de carbonatation dépend de nombreux facteurs tels que qualité du béton, teneur en eau, humidité relative de l'air, température, etc. [4]

#### II.3.1.2. Action des chlorures

Les chlorures présents dans un béton sont issus des constituants utilisés lors de la confection du béton, soit issus de l'extérieur (embruns marins ou sels fondants). A l'intérieur, ils sont soit liés, sous forme de chloroaluminates, soit non liés pouvant alors migrer par capillarité suite aux cycles de mouillage et de séchage, ou par phénomène de diffusion). La vitesse de pénétration des chlorures dépend encore de la porosité de la pâte de ciment; elle décroît avec le rapport E/C de façon exponentielle et dépend bien sûr de la concentration de la solution environnante en sels. La présence d'additions, telle que les laitiers, les cendres volantes et les fumées de silice, permet également de réduire sensiblement les coefficients de diffusion des chlorures dans le béton, mais toujours sous réserve d'une cure humide prolongée. A même classe de résistance, et tant que le dosage en ciment est suffisant, nous pouvons considérer que ces additions diminuent la pénétration des chlorures.

#### II.3.1.3. Alkali-réaction (cancer du béton)

L'alkali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alkali-granat, désigne la réaction chimique entre la silice mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont

préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages.

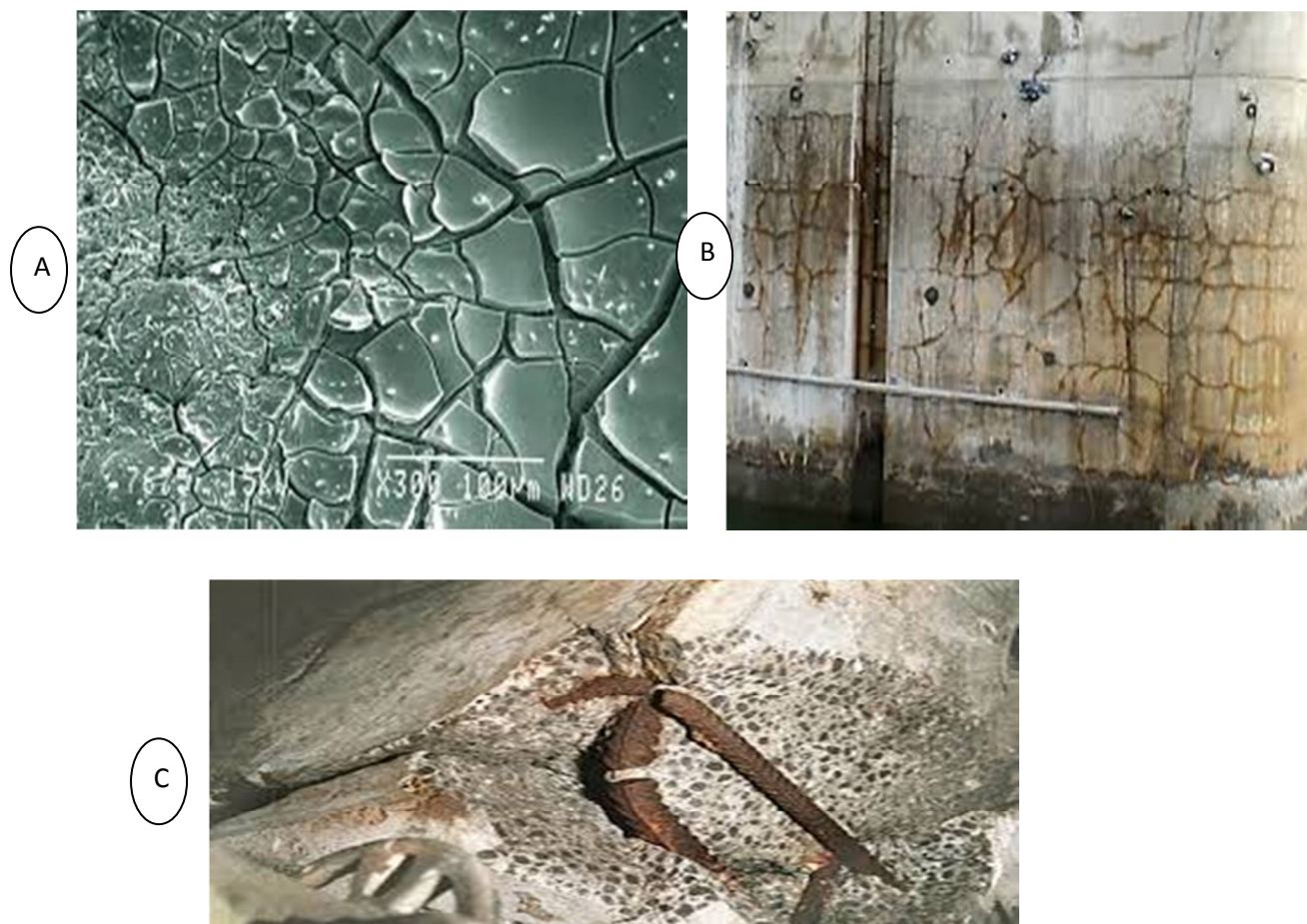
Cette réaction se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des micros faïençages et un éclatement du béton (Fig. II.4).



**Fig. II.5: Exemple de béton dégradé par l'alkali-réaction.**

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

En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures. [1]



**Fig. II.6: réactions alcalis-granulats**

Il est admis que les alcali-réactions se présentent sous trois types : réaction alcali-silice (les plus fréquentes), réaction alcali-silicate, réaction alcali-carbonate. [5]

- **réaction alcali-silice (RAS) :** Certains granulats siliceux, lorsqu'ils sont constitués de silice amorphe, mal cristallisée ou microcristalline (par exemple des verres, de l'opale, de la calcédoine...) sont attaqués par la solution interstitielle qui occupe les pores du béton.
- **réaction alcali-silicate :** La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (sains ou altérés).
- **réaction alcali-carbonate :** On désigne par cette expression la réaction manifestée par des calcaires. Sur le plan pratique, on retiendra que les expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf si le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses.

#### II.3.1.4. Action des sulfates

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ils sont présentement un risque majeur d'agression chimique pour le béton.

Ces sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique ou industrielle. La dégradation par les ions sulfates se traduit par une expansion, par exemple le sulfate de magnésium contenu dans l'eau salée qui comporte également des sels de type chlorure de sodium, Chlorure de magnésium, sulfate de calcium..., sont les plus nuisibles parmi ces sels. Ils réagissent avec la chaux hydratée pour donner du gypse, Par ailleurs, son action sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'ettringite. L'expansion due à la cristallisation de l'eau de mer jusqu'aux armatures.

L'ettringite, le gypse. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

#### II.3.1.5. Corrosion

La corrosion regroupe l'ensemble des phénomènes chimiques et électrochimiques constituant la détérioration de matériaux, en général métalliques, sous l'action du milieu environnant. Il est bien connu que l'acier se dissout en présence d'eau et de nombreuses solutions aqueuses non oxydantes. Cette corrosion est très vive dans les solutions acides et diminue d'intensité au fur et à mesure que le pH de la solution augmente, et devient pratiquement nulle aux pH voisins de 9 à 13. Pour des pH très élevés, supérieurs à environ 13, les solutions peuvent à nouveau être corrodantes. Une armature dans un béton est protégée par celui-ci tant que le pH reste à une valeur comprise entre 9 et 13. Dans le cas contraire, comme pour un béton carbonaté, la dissolution de l'acier

est susceptible de fissurer ou de faire éclater le béton d'enrobage si l'épaisseur ou la qualité de ce dernier n'est pas suffisante. On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'autre facteur étant les chlorures, le dépassement s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil (ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment). La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.[17]

## II.4. La carbonatation

### II.4.1. La carbonatation

La carbonatation du béton, vulgairement appelé « la maladie du béton », entraîne des problèmes de résistance en traction sur les structures en béton armé car les barres d'acier, censées garantir cette résistance, n'adhèrent plus au béton lorsqu'elles sont corrodées

La stabilité du film passif est étroitement liée à la valeur du pH au voisinage de l'acier. Or, lorsque le pH devient inférieur à 12 environ, le film disparaît. Par conséquent, tous les mécanismes en mesure de provoquer une diminution du pH dans le béton, peuvent donc contribuer à amorcer ou accélérer la corrosion des aciers d'armature. Dans la majorité des cas, c'est le phénomène de carbonatation qui est principalement responsable de l'abaissement du pH dans le béton.

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone atmosphérique (CO<sub>2</sub>), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume (taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural) et certains constituants du béton tel que le ciment.

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<sub>2</sub>, alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de CO<sub>2</sub> 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 (Fig.III.6).



**Fig. II.7: Exemple d'échantillon carbonaté (7x7x28 cm)**

Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la [corrosion](#) du métal peut commencer en produisant notamment des espèces plus volumineuses que les matériaux initialement présents.

Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées (Fig.III.7).



**Fig.II.8 : Éclatement du béton dû à la carbonatation**

Les exemples des figures (III.8), (III.9), (III.10) et (III.11) montrent des les différentes dégradations d'éléments structuraux d'origines diverses.



**Fig. II.9 : Corrosion par carbonatation**

**Fig. II.10 : En se corrodant, les aciers**

**sur un départ de poteau.**

**augmentent de volume(en bas),**

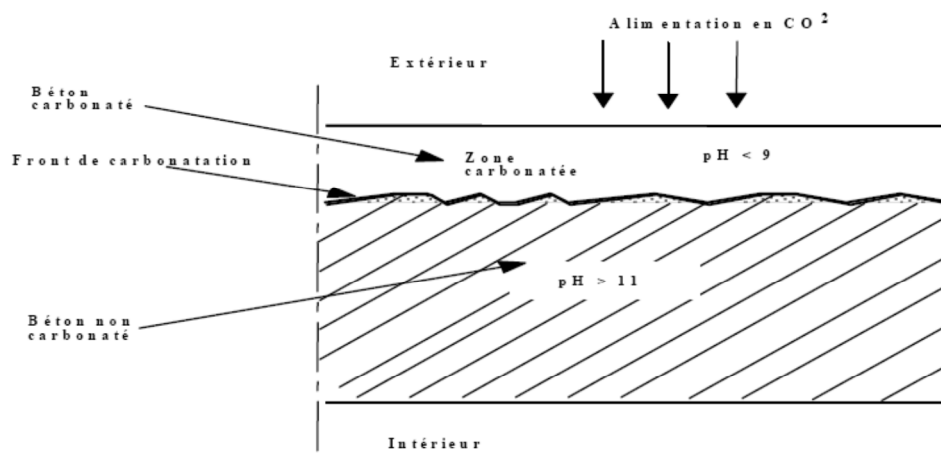
**comparé à une armature saine (en haut).**



**Fig. II.11 : Corrosion importante en sous face**  
**d'une poutre pont Port de Mostaganem.**

**Fig. II.12 : Oxydation générale du chevêtre**  
**Pont Passiti (Oran)**

Le schéma de la figure (II.12) illustre le principe de la formation de la carbonatation.



**Fig. II.13 : Schéma de principe de la formation de la carbonatation.**

#### II.4.1.1. Les conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert.[6]

#### II.4.1.2. La mesure de la carbonatation

La technique la plus simple à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée ( $\text{pH} < 9$ ) qui reste incolore, de la zone non carbonatée ( $\text{pH} > 9$  et allant jusqu'à 13) colorée en violet. Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages. Fond front

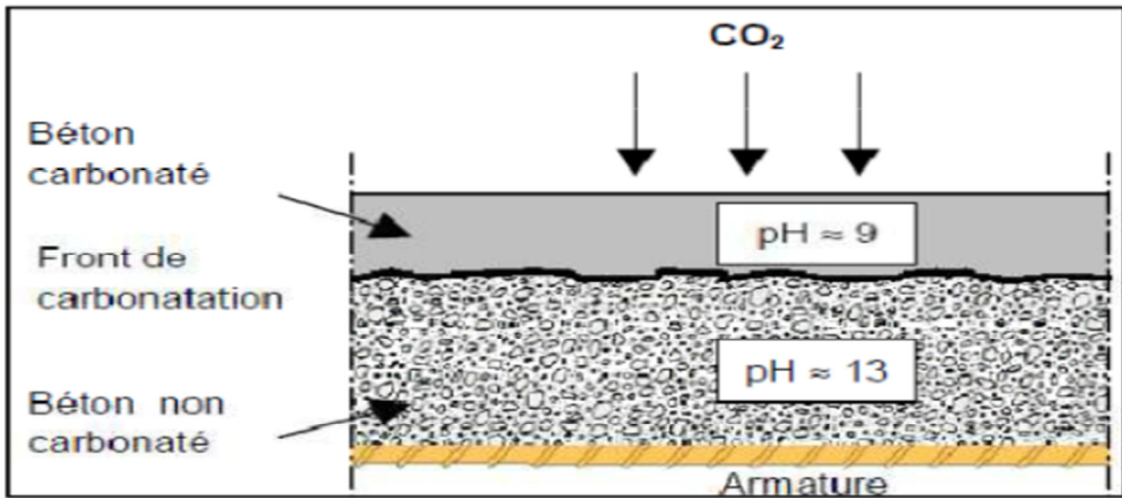


Fig. II.14 : La progression de la carbonatation

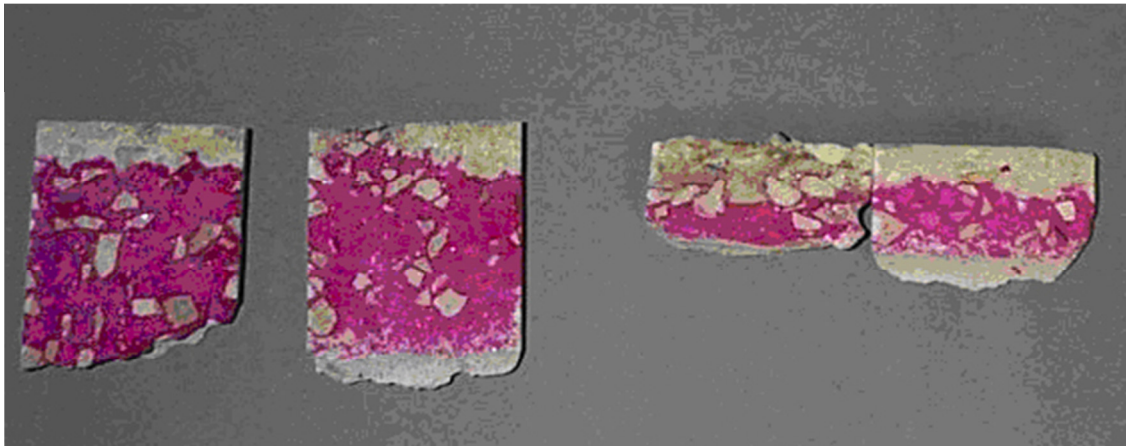


Fig.II.15 : Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse

1 : zone carbonatée (incolore)

2 : zone non carbonatée (coloration rose)

## II.5. REACTIONS MECANIKES

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

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle.[6]

Les désordres apportés par l'utilisation d'un ouvrage constituent une cause négligeable de dégradation des bétons. Il s'agit le plus souvent d'une attaque de types mécanique" : chocs, abrasion, érosion, etc.

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

L'abrasion du béton est essentiellement due à un manque de compacité du béton à la mise en œuvre. La fissuration de surface résulte d'un manque d'étanchéité au niveau des joints de coffrage ou de la reprise de bétonnage (Fig. II.5).



**Fig. II.16: Abrasion du béton**

- **érosion** : 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.

Exemples : piles de pont, sols d'ateliers, éléments bétons préfabriqués,... (Fig. II.7)



**Fig. II.18:Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont**

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



**Fig. II.19: Fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes**

- **délamination** : La délamination est provoquée par l'action conjuguée de sollicitations climatiques des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de pont. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute des plaques de béton et à la création de trous dans les tabliers de pont.[7]



**Fig. II.20: Délamination du béton**

## II.6. REACTIONS PHYSIQUES

D'un point de vue physique il est important de noter que le béton est un matériau hydraulique et poreux et qu'à ce titre, il est sujet à un certain nombre de phénomènes qui sont basés sur le comportement de l'eau en son sein et sur les échanges d'eau avec le milieu extérieur.

### II.6.1 Retrait

Le retrait est en effet un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusque à son vieillissement. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle.

Pour identifier les fissures de retrait il faut connaître le moment exact d'apparition de ces fissures en suivant leur ordre chronologique d'apparition[8][9] :

- fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage et parfois visibles à travers l'eau de ressuage (encore cause de béton frais). Ces fissures sont provoquées par le tassement de béton dans les coffrages et le ressuage
- fissures apparaissant juste après le décoffrage : Ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales. Elles sont plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause.

- fissures apparaissant plusieurs mois après le décoffrage: Ces fissures sont présentées par le retrait de dessiccation (à long terme). Parmi les facteurs qui interviennent dans le développement des fissures de retrait sont:
  - la température.
  - l'humidité relative du milieu environnement.
  - le choix de la composition de béton E/C.
  - la chaleur d'hydratation du ciment.
  - les adjuvants.

## II.6. 2. Ressuage

Le ressuage correspond à l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la face supérieure du béton frais. Il peut aussi se manifester en dessous des barres d'armature horizontales situées au voisinage de la face supérieure. Ces barres constituent des points fixes qui gênent le tassement, ce qui engendre la création des fissures qui pénètrent jusqu'au lit d'armatures.[10]

Dans l'exemple suivant, on constate qu'une partie de l'eau de gâchage s'est accumulée à la surface d'une dalle en béton fraîchement coulée (Fig. II.10).



**Fig. II.21 : Ressuage du béton après vibration**

## II.7 DEGRADATIONS DUES AUX FACTEURS DE TEMPERATURES EXTREMES

### a) Le Feu

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton. Le béton est un matériau qui présente un bon comportement lorsqu'il est soumis à des hautes températures. Et c'est l'une des raisons pour lesquelles il est largement utilisé pour la réalisation des structures porteuses des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Malgré ce bon comportement, face à un incendie, les performances du matériau peuvent être plus ou moins affectées en fonction de la température maximale atteinte, de la durée de l'incendie et de la composition du matériau (nature des granulats notamment). L'épaisseur dégradée peut varier de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Deux types de désordres peuvent généralement apparaître : la chute de la résistance mécanique et l'écaillage de surface (Fig. II.11).



**Fig. II.22 : structure en béton armé dégradée par le feu**

Ces dernières années, des incendies dramatiques ont montré que les règles sur la sécurité dans les tranchées couvertes et les tunnels étaient à revoir et ont montré qu'un incendie pouvait provoquer de graves désordres aux bétons des ouvrages de génie civil (incendie du tunnel sous la Manche le 18 novembre 1996, incendie du tunnel du Mont-Blanc le 24 mars 1999...).

Lors d'un incendie ou d'un choc thermique, l'eau interstitielle se transforme en vapeur et, si cette vapeur ne peut s'échapper assez rapidement, la pression de vapeur devient supérieure à la résistance en traction du béton, ce qui provoque une sorte d'écaillage de ce dernier. Cet écaillage progresse vers le cœur du matériau tant que l'incendie n'est pas maîtrisé et tant que la température du béton reste élevée.

Plus le béton a une perméabilité et une porosité réduites, plus les destructions sont importantes. Par exemple, lors de l'incendie du tunnel sous la Manche, dans la zone du sinistre, les voussoirs de 60 cm d'épaisseur en BHP de classe 60 ont été fortement endommagés[11][12].

De plus, si la température que subit le béton est très élevée, il se produit une destruction locale du matériau par décomposition de ses constituants et une forte chute du module d'Young. En effet, dès que la température du béton atteint :

- 110°C, les hydrates de la pâte de ciment commencent à se décomposer ;
- à 573°C, la température de fusion du quartz est atteinte ;
- à 800°C, le carbonate de chaux ( $\text{CaCO}_3$ ) se décarbonate avec libération de chaux vive, les granulats calcaires perdent une partie de leur cohésion, etc.



**Fig. II.23 : béton après un incendie**

Il faut également se préoccuper de l'effet de l'incendie sur les armatures de béton armé, en particulier s'il s'agit d'aciers doux écrouis par traction et torsion ou par torsion seule utilisés entre les années 50 et 80. En effet, une température forte peut recuire les aciers avec une forte chute (de l'ordre de 15 à 18 %) de leur limite élastique. Le même phénomène existe pour les aciers plus récents élaborés par trempe et revenu.

Cet effet est sensible si la température des armatures atteint 350°C (300°C pour être prudent, car il dépend aussi du temps de maintien de la température au niveau de l'acier).

En cas d'incendie important, des investigations spécifiques doivent donc être menées aussi bien sur le béton que sur les armatures.

#### **b) Cycle gel/ dégel :**

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

L'action du gel est une des causes principales de détérioration des ouvrages en béton et des soutènements dans les régions nordiques d'Europe, d'Amérique, d'Asie mais également dans certaines régions algériennes (infrastructures routières, remontées mécaniques, cornières ...).

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

Il est admis que cette détérioration se présente donc sous deux formes :

L'endommagement interne qui se manifeste par la formation de microfissures au sein du matériau et l'écaillage, se manifestant par une dégradation superficielle.

L'écaillage du béton est un phénomène particulièrement nocif. En effet, outre une dégradation esthétique, le décollement d'une partie de la surface du matériau, en favorisant l'intrusion de substances délétères, augmente les risques de corrosion, de carbonatation, d'attaques sulfatiques, etc...

Lors du gel, en raison des interactions entre la surface des pores et l'eau, celle-ci ne gèle pas complètement. Le matériau contient donc de l'eau restée liquide, de la glace, et de l'air dans le cas d'un milieu initialement non saturé. Les détériorations sont alors usuellement attribuées au couplage entre l'augmentation volumique de 9% due à la solidification de l'eau des pores et le transport, au sein du réseau poreux, de l'eau non gelée.

La gélivité d'un béton peut être occasionnée par une sensibilité au gel à la fois des granulats et de la pâte de ciment, les deux phénomènes ne s'additionnant pas.

La porosité de la pâte de ciment, peut d'une façon très simplifiée être assimilée à une association de bulles et de tubes (capillaires), les bulles étant reliées entre elles par des capillaires (quand la porosité est connectée). Lorsque l'eau peut se déplacer au travers des capillaires jusqu'à une bulle encore "libre", la glace peut se former sans conséquence nuisible. Si au contraire elle se forme dans les capillaires, elle peut générer de telles contraintes qu'une fissuration peut se développer.

Cependant cette expansion de volume n'est pas la seule origine des fissures. Elle induit également des mouvements d'eau au sein de la porosité. Les pressions occasionnées par ces mouvements d'eau, lorsqu'elles dépassent la résistance en traction du béton, peuvent provoquer l'apparition de fissures.

En ce qui concerne les granulats, ce sont essentiellement leur taille, leur porosité et leur perméabilité qui jouent un rôle sur leur gélivité. Les granulats les plus sensibles au gel semblent être les agrégats de grandes dimensions (les sables sont généralement beaucoup moins gélifs que les graviers) et présentant une forte porosité, essentiellement formée de pores très fins.[13]



**Fig. II.24 : Exemple de dommages causés par le gel-dégel**



**Fig. II.25 : bétons affectés par le gel interne**



**Fig. II.26: béton affecté par l'écaillage**

## **II.8.LES AUTRES CANCS DE DEGRADATION DES BETONS**

Nous avons vu que les bétons se dégradent 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[14].

### **II.8.1.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.[18]

### **II.8.2.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.

### **II.8.3.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.

### **II.8.4.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.

### **II.8.5.Cycle humidité / sécheresse**

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

## **II.9.Conclusion**

La durabilité d'un ouvrage est liée à une qualité de construction sans faille.

C'est une chaîne qui part du concepteur qui doit connaître les limites du matériau, passe par le calculateur qui doit connaître les règles de dimensionnement et s'intéresser à l'élaboration de plans allant au détail de toutes les opérations de fabrication et de réalisation.

Elle touche ensuite tous les corps de métiers : coffreur, ferrailleur, bétonnier, personnel de chantier qui doivent chacun en prendre soin jusqu'à la réception par l'utilisateur qui doit l'entretenir par des opérations de maintenance.

Si l'un des maillons de la chaîne est défaillant, la chaîne est alors défaillante. Ainsi, l'imperfection de plusieurs maillons a ici un effet cumulatif.

Les sinistres enregistrés montrent qu'ils sont la conséquence de la synergie de plusieurs défaillances (au moins deux) d'origines indépendantes.

La robustesse et l'adaptabilité du béton armé pardonne généralement une à deux défaillances ; il ne cède finalement que sous la gravité ou l'abondance des mauvaises actions que lui font subir ses constructeurs.

**Chapitre III**  
**Principales méthodes de diagnostic et d'évaluation**  
**des ouvrages en béton armé**

## Chapitre 3

# Principales méthodes de diagnostic et d'évaluation des ouvrages en béton armé

### 3.1 CHAPITRE

Ce travail concerne aux méthodes de diagnostic et d'évaluation des ouvrages en béton armé, et plus particulière à l'auscultation destructive et non destructive.

Sur l'ouvrage on peut appliquer les technique d'auscultation non destructives (qui ne cause aucune dégradation) ou destructives.

Ces méthodes voient des applications nouvelles en génie civil. De ce fait, elles sont encore en cours de développement-validation, et même si leur sensibilité a de nombreux paramètres et de mieux en mieux maitrisée, il est toujours très difficile de qualifier les résultats de manière utilisable par les bureaux d'études.

### 3.2. Auscultation, évaluation et diagnostic

#### 3.2.1. Définition des termes

**L'auscultation** (étymologiquement : action d'écouter, examen) regroupe l'ensemble des examens et des mesures spécifiques qui vise a mieux connaitre l'état réel d'un ouvrage. **L'évaluation** (détermination de la valeur) est l'estimation des fonctions de cet ouvrage. Elle permet d'aboutir à un **diagnostic** (aptitude à reconnaître) après le recensement des différents symptômes : identification des fonctions altérées, des zones atteintes, des mécanismes mis en jeu...

L'inspection visuelle (examen attentif) est la première des techniques d'auscultation mises-en Œuvre. Mais le plus souvent, pour pouvoir réaliser un diagnostic, il faut faire appel à des Techniques plus élaborées telles que des prélèvements, des mesures sur l'ouvrage...

En général, c'est seulement après la mise en œuvre de modèles de calcul que l'on peut Passer a une évaluation quantitative de l'état ou de la durée de vie de l'ouvrage.

Il ne faut donc pas confondre l'auscultation avec l'évaluation qui en découle ou avec le Diagnostic qui ne peut être établi que par l'enchaînement logique de l'ensemble de ces étapes.

#### 3.2.2. Pourquoi ausculté, évaluer ou posé un diagnostic ?

Le gestionnaire d'ouvrage peut trouver plusieurs raisons susceptibles de motiver l'auscultation d'un ouvrage:

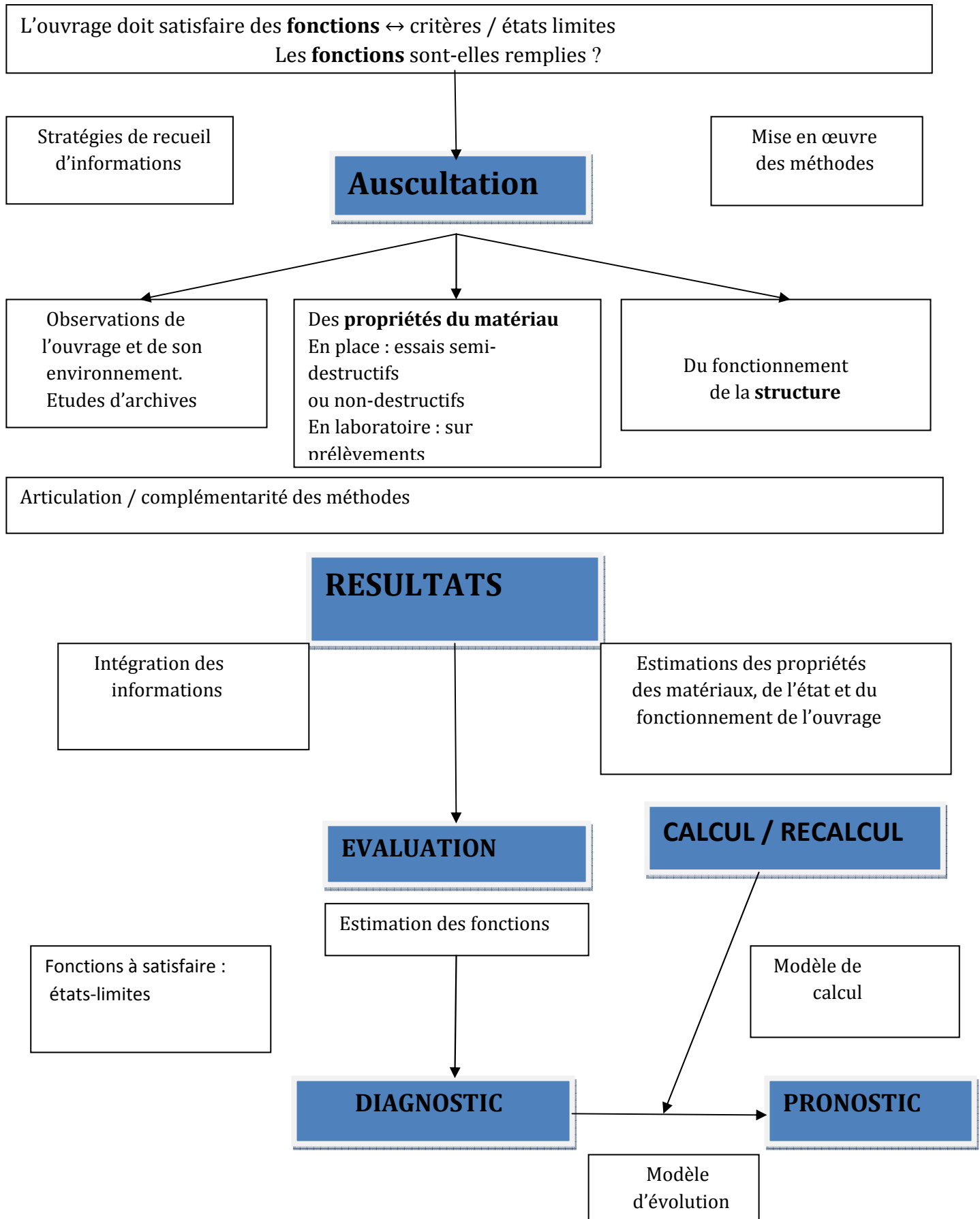
- sur un ouvrage a priori sain : il peut vouloir estimer, vérifier ou contrôler les Caractéristiques de la construction. C'est notamment le cas des ouvrages a « caractère Exceptionnel » (grand barrage...) ou des structures innovantes dont il souhaite Connaitre le comportement en service ;
- sur un ouvrage suppose endommagé : l'inspection visuelle ou l'auscultation peut alors être utilisée pour détecter l'endommagement ;

- sur un ouvrage visiblement endommagé dont les désordres sont susceptibles ou non de s'aggraver ou de mettre en cause la sécurité : il peut faire appel à l'auscultation pour caractériser l'endommagement (gravité de l'endommagement, étendue spatiale...).

Les données permettant l'évaluation de l'endommagement d'un ouvrage en béton sont nombreuses. On peut alors classer les informations recherchées en quatre catégories selon leur nature ou leur origine :

- caractéristiques de l'ouvrage : mesure de l'épaisseur de béton, mesure de l'enrobage des barres d'armatures dans un béton armé, positionnement et dimensionnement du ferraillement passif/actif, localisation des joints de coulées... ;
- caractéristiques du matériau : caractérisation de la composition, évaluation de la résistance mécanique, détermination de la porosité, détermination des conditions hydriques (degré de saturation)... ;
- caractéristiques pathologiques : détection et localisation des parties d'un ouvrage atteintes d'alcali-réaction, détection et quantification des zones d'un ouvrage contaminées par des chlorures, détection, localisation et dimensionnement de vides ou d'hétérogénéités (fissures, microfissures, déaminations, nids d'abeille)... ;
- caractéristiques issues du vieillissement : détection et quantification d'une corrosion de barres d'armature (acier passif) ou de câbles de précontraintes (acier actif), détection et quantification de dépôts en surface du béton (mousses...), évolution de la solution interstitielle, évolution microstructurale du béton (carbonatation...).

**Fig III.1 Articulation des phases dans une démarche de diagnostic**



### 3.2.3. L'auscultation sonore

L'auscultation sonore est une méthode utilisée pour caractériser la qualité du béton. Le principe de l'essai repose sur la mesure de la vitesse de propagation du son dans le matériau. On mesure la Propagation d'une première impulsion d'un train d'ondes généré par un transducteur, entre deux points déterminés du béton. On peut, à partir du temps de propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre les deux transducteurs par le temps mesuré.[15]

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

**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.

#### 3.2.3.1. 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 une présence 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.

Cependant il existe une troisième méthode, la mesure en semi transparence, qui consiste à placer l'émetteur et le récepteur sur deux faces perpendiculaires. On a recours à cette méthode lorsque l'ensemble de la structure n'est pas accessible.

Pour toutes les méthodes, l'opérateur veillera à utiliser un produit de couplage, sur la face de chaque transducteur, tel que la vaseline ou la graisse afin de limiter les interférences.

### 3.2.4. But de l'auscultation

L'auscultation d'un ouvrage existant doit, en premier lieu, déterminer si la sécurité structurale et l'aptitude au service sont assurées et si elles le resteront le futur. La réponse à cette question est difficile à apporter pour deux raisons:

- dans la majorité des cas, il faut d'abord définir les exigences requises d'un ouvrage. Des prescriptions relatives à ce problème, (normes, directives, Etc.) Manquent encore aujourd'hui dans la majorité des cas;

- dans le cadre de l'auscultation d'un ouvrage on attend généralement implicitement que l'on Donne un pronostic sur l'évolution de l'état. Pour ce faire, il faut tenir compte de facteurs tels que l'environnement, l'évolution des dégâts, les influences réciproques des diverses composantes de l'ouvrages, etc. Une évaluation avec une bonne projection dans le futur est naturellement difficile à établir.

- Un autre but de l'auscultation est l'établissement d'un document répertoriant les dégâts constatés. Ce document devrait être établi sur la base de visites régulières. Connaissant l'évolution des dégâts entre deux auscultations, il devient plus aisé d'évaluer l'état et de faire une projection dans le futur. Un relevé systématique représente également une base importante pour la recherche et le développement. Ces données permettent en effet de tirer des conclusions sur le comportement général des ouvrages. Ces données peuvent servir de base pour l'élaboration de prescriptions techniques traitant de constructions nouvelles ou de L'entretien.

### **3.2.5. Différences entre les techniques d'auscultation**

Sur l'ouvrage on peut appliquer des techniques d'auscultation non destructives (qui ne causent aucune dégradation) ou destructives. Parmi ces dernières Il y a toutes les recherches qui exigent le prélèvement d'échantillons (par exemple par carottage), l'ouverture de fenêtres d'observation appropriées ou des sondages. Les essais de laboratoire exigent le prélèvement d'échantillons. Ils fournissent en général des données relativement précises sur les caractéristiques recherchées. Ces résultats ne sont cependant Valables que pour l'échantillon testé. Pour une extension de ces résultats à l'ensemble de l'ouvrage ou à une partie de celui-ci, le nombre et la disposition des prélèvements doivent être adaptés à la dispersion prévisible des caractéristiques du matériau mis en place, en respectant si possible les règles de la statistique.

**Les techniques d'auscultation destructives** sontsouvent la seule possibilité permettant d'acquérir des données fiables sur les caractéristiques des matériaux et sur l'état à l'intérieur de l'ouvrage, soit en profondeur dans les éléments de la construction.

Mais ici également se pose le problème de l'extension des informations obtenues à l'ensemble de l'ouvrage.

#### **3.2.5.1. Techniques d'auscultation destructives**

Les techniques d'auscultation destructives provoquent des dégâts à l'ouvrage. Dans cette catégorie on trouve toutes les méthodes où des échantillons doivent être prélevés (par ex. carottages) ainsi que celles nécessitant des sondages ou des ouvertures pour rendre accessibles certaines parties d'ouvrages.

### **3.3. Examen visuel des structures**

#### **Déceler les dégâts à temps**

Nos hautes exigences vis-à-vis de la sécurité et de l'aptitude au service des constructions imposent de déceler le plus tôt possible d'éventuelles dégradations.

Ces exigences sont également confirmées par la nécessité de conserver la valeur économique de la substance bâtie. Contrairement aux possibilités offertes dans la construction moderne des machines, qui intègre dans leurs structures les appareils de diagnostic, les dégradations des structures et des ouvrages de génie civil ne peuvent être Décelées que par la surveillance.

### **Surveillance continue**

La surveillance continue, dans l'esprit de la recommandation SIA 169, «Maintenance des ouvrages de génie civil», fournit les premières indications sur les dégradations. Cette évaluation, prudente, découle des objectifs spéciaux fixés à la surveillance continue.

Au moyen de contrôles elle doit garantir en priorité les possibilités d'utilisation d'un ouvrage (Aptitude au service ou de fonctionnement). Pour la détermination de l'état existant et son appréciation, une surveillance périodique doit être prévue.

De la même manière la surveillance continue des immeubles (habitations, industries, écoles, bâtiments administratifs, etc.), par un service d'entretien (concierge), fournit les premières indications sur les dégradations. Une certitude sur l'état existant ne peut cependant être acquise que par une inspection systématique.

### **Surveillance périodique**

La reconnaissance, en temps utile, de dégradations ne peut donc être assurée que par des inspections (surveillance) périodiques. Celles-ci, dans une première étape, s'effectuent avec des méthodes d'auscultation simples et faciles à mettre en œuvre.

Avec des dépenses raisonnables, ces premiers résultats doivent permettre de conclure si, jusqu'à la prochaine inspection, aucune mesure de maintenance n'est nécessaire, ou si des recherches complémentaires doivent être entreprises. Le cas échéant, elles doivent aussi permettre de reconnaître la nécessité de mesures immédiates.

#### **III.3.1. Etendue de l'examen visuel**

L'examen visuel comprend l'observation de tous les dégâts, à tous les endroits accessibles, avec les sens et avec des moyens auxiliaires simples. Un protocole des dégradations observées est établi, précisant le genre de dégât et la situation. Il est complété par un court commentaire sur le dégât, avec une estimation sommaire de sa gravité (insignifiant, moyen, important). A ce niveau une étude spécifique de la qualité des matériaux n'est normalement pas prévue. Il sera cependant souvent recommandé d'exécuter déjà à ce moment des recherches simples, comme par exemple le contrôle de la régularité de la qualité des matériaux.

Pour des éléments de construction en béton et soumis à la flexion, il pourra s'avérer utile d'effectuer des mesures de potentiel, sur un réseau à larges mailles, afin d'obtenir une première information sur l'état de corrosion des armatures.

L'étendue de l'examen visuel est cependant déterminée avant tout par les données disponibles sur la construction de l'ouvrage, sur les matériaux utilisés et sur leurs caractéristiques. Si ces informations manquent, il sera très vraisemblablement nécessaire d'envisager des auscultations complémentaires.

#### **III.3.2. Principe**

L'examen visuel constitue, dans la plupart des cas, la première étape d'une auscultation. Dans le cadre de l'examen visuel, le chercheur s'efforce, avec l'aide de ses sens (vue, toucher, ouïe, etc.) et de moyens auxiliaires simples, de saisir en gros l'état d'un ouvrage. Ainsi que cela a été traité dans la

partie précédente (Examen visuel), celui-ci devra permettre de répondre aux questions mentionnées dans l'encadré ci-contre.

Les réponses à ces questions peuvent avoir une très grande importance pour l'ouvrage. D'une part des défauts non décelés peuvent se développer considérablement jusqu'à la prochaine inspection et, d'autre part, la décision d'exécuter d'autres recherches pour obtenir des renseignements complémentaires peut engendrer d'importantes dépenses.

Une préparation et un déroulement soigneux et attentif de l'examen visuel sont donc indispensables. Quelques points importants de ce travail sont examinés ci-après.

### **III.3.3. Préparation**

L'examen visuel, comme toutes les autres étapes de l'auscultation, doit être soigneusement préparé. La préparation commence avec l'examen des documents disponibles (plans de l'ouvrage, plan d'utilisation, plan de sécurité, etc.). Sur la base des documents et d'une visite de l'ouvrage on établira un programme détaillé de l'inspection, avec la mention du personnel et du matériel nécessaires.

### **III.3.4. Accessibilité**

L'accessibilité aux diverses parties de l'ouvrage doit être examinée. Pour l'examen visuel déjà, il est nécessaire de disposer des meilleures conditions de travail possibles. Une véritable appréciation n'est possible que lorsqu'on a réuni les conditions permettant d'accéder directement aux différents secteurs typiques de l'ouvrage.

Echelles, élévateurs, échafaudages, appareils divers, etc., ainsi que le personnel nécessaire pour l'emploi et le déplacement de ces engins, doivent être prévus.

### **III.3.5. Equipement**

Une liste détaillée de l'équipement est indiquée dans la partie précédente (Examen visuel). En fonction des ouvrages cette liste peut être complétée, mais aussi réduite. Les images ci-contre illustrent quelques-uns des équipements les plus importants pour effectuer des mesures (double-mètre, chablon à fissures, loupe graduée, etc.) et pour les documents de l'auscultation (procès-verbal, matériel d'écriture, y compris craie de marquage, appareil photographique avec flash, etc.). L'outillage permettant une première prise d'échantillons (ciseaux, massettes, etc.) ne doit pas être oublié. Sur la base des premiers éléments issus de l'examen avec ce matériel, on peut tirer des conclusions importantes pour l'organisation d'une éventuelle étape ultérieure de l'auscultation.



**Fig3.2 : Exemples d'équipement : Documentation, appareils de mesure, outillage**

### **3.3.6. Relevé**

Une documentation bien préparée ne facilite pas seulement l'exécution de l'auscultation, elle améliore également la qualité. Pendant l'exécution du travail, l'équipe sur place doit se concentrer sur de nombreux détails, auxquels s'ajoutent, dans la plupart des cas, des contraintes physiques. De ce fait, et si l'on ne dispose pas de check-lists exhaustives, des détails importants risquent facilement d'être oubliés. Pour la tenue du procès-verbal il existe de nombreux formulaires. Chacun a ses avantages et ses désavantages. L'encadré ci-dessous contient, sous forme de mots clés, un exemple pour un procès-verbal sur l'état d'un ouvrage. Les appréciations seront si possible classées en fonction de leurs urgences (par exemple en «points douteux » et «réparations urgentes»). Les documents photographiques constituent une part importante de la documentation. Il faut veiller à ce que la situation de chaque prise de vue soit repérable, si possible directement à partir de l'image (par exemple avec marquage au crayon gras sur l'ouvrage, surimpression d'un écriteau, etc.).

## **3.4. Evaluation**

L'évaluation établit la relation entre l'état dans lequel se trouvent un ouvrage et les mesures à prendre, en tenant compte des conditions marginales.

### **3.4.1. Base de l'évaluation**

Les bases de l'évaluation sont fournies par les informations contenues dans les protocoles d'auscultation ainsi que par les résultats d'analyses effectuées sur des échantillons de l'ouvrage.

D'autre part, les plans de sécurité et d'utilisation et les instructions d'utilisation posent un certain nombre d'exigences que l'ouvrage doit satisfaire. Ces exigences doivent également être prises en compte lors de l'évaluation, ceci en se demandant si l'état actuel de l'ouvrage est toujours en mesure de les satisfaire.

### **III.4.2. Objet de l'évaluation**

L'évaluation se réfère à deux objets: d'un côté aux résultats des analyses et de l'autre côté à l'état de l'ouvrage.

#### **III.4.2.1. Evaluation des résultats des auscultations**

Il s'agit ici d'analyser et d'évaluer de façon approfondie les résultats obtenus lors de l'auscultation. Cette étape doit au minimum permettre de répondre aux questions suivantes:

– Les résultats donnent-ils des informations suffisamment significatives?

Les résultats sont plus ou moins significatifs en fonction des méthodes d'auscultation, du type de prise d'échantillons (ponctuel, surfacique), de la précision des mesures, etc.;

– Les résultats sont-ils complets?

Il faut contrôler si toutes les informations que l'on jugeait nécessaires lors des travaux préparatoires ont été collectées ou s'il manque encore certains points. L'inspection peut montrer que les conditions effectives s'écartent de façon significative de ce que l'on attendait, ce qui peut ouvrir, de façon surprenante, de nouvelles perspectives. C'est particulièrement dans ces cas qu'il faut vérifier si toutes les informations essentielles ont été collectées;

– Les résultats sont-ils contradictoires?

Lors de l'évaluation des résultats de l'auscultation, il faut impérativement veiller à ce que les différentes observations puissent mener à des conclusions concordantes sur l'état de l'ouvrage. Si des contradictions subsistent, il s'agit de trouver des explications plausibles ou de procéder à des analyses complémentaires permettant de clarifier cette situation.

Ce n'est que lorsque l'interprétation des résultats est achevée qu'ils peuvent être pris en considération pour l'évaluation de l'état de l'ouvrage

### **III.5. Diagnostic**

#### **III.5.1. Définition**

Le diagnostic d'un ouvrage de génie civil consiste à :

- ❖ déterminer le niveau de sécurité de l'ouvrage, relevé ses point de faiblesse, ses défaut et ses dysfonctionnements.
- ❖ Définir judicieusement les travaux que permettent de remédier aux insuffisances constatées.

#### **III.5.2. Diagnostic d'un ouvrage**

Le diagnostic d'un ouvrage permet avant tout de déterminer l'état de santé, les éventuelles pathologies présentes ainsi que leur ampleur. Cependant le diagnostic peut avoir deux finalités. Soit il est mené afin de déterminer exactement quels sont les désordres présents en vue de leur traitement, soit il est effectué afin de connaître l'évolution des désordres dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme.

#### **III.5.3. Réalisation d'un diagnostic**

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer son état de sante et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi

que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client découvre 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.

#### **III.5.4. Rapport d'un diagnostic**

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

Il comprend :

- l'identification de la structure, le nom du demandeur,
- l'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date,
- une brève description de la structure,
- le rappel des objectifs de l'étude,
- la liste des documents consultés,
- les résultats de l'inspection détaillée,
- les résultats des essais in situ et de laboratoire,
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité,
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude,
- une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer,
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation.

#### **III.5.5. Les principales étapes d'un diagnostic**

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

- **Une visite préliminaire**

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

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

- **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'historique de la structure
- Les plans de coffrage et de ferrailage
- Les rapports d'éventuelles études antérieures
- L'orientation de la structure

- **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.

- **Inspection détaillée**

Une inspection visuelle de la totalité de la structure est mise en œuvre afin de détecter tous les signes de détérioration et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres tels que :

- la présence d'anciens revêtements ou de produits d'imprégnation,
- l'apparence de la surface du béton, présence de stalactites, d'efflorescences, de traces de Rouille,
- la présence de fissures (avec leurs ouvertures et leurs orientations, réseau),
- les détériorations de la peau du béton (épaufrures, feuilletage, éclatements...),
- la détection des zones sonnantes creux,
- les zones où le béton et les armatures ont été désorganisés (cas d'un incendie...),
- la présence d'armatures (passives ou actives) apparentes, corrodées ou non,
- le relevé des déformations de la structure,
- la détection des traces d'humidité,
- etc.

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

- **Essais en laboratoire**

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

Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure elles sont écrasées afin de connaître la Résistance à la compression du béton.

- **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.

- **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 biens qu'elle abrite (Bâtiments) ou qu'elle ne menace pas de s'écrouler.
  - Les zones à traiter en priorité
  - Des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage, maintien, renforcement ou suivi, conseil sur des 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.

### **III.5.6. Diagnostic visuel**

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

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

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

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

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

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

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

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

- Le nécessaire pour prendre des notes

### **III.5.7. Diagnostic par prélèvement**

#### **III.5.7.1. Méthodes de prélèvements**

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage. Une procédure AFREM donne des indications sur ce point.

Le forage est utilisé, par exemple, pour estimer la pénétration des chlorures. Dans ce cas, il concerne des profondeurs successives, de l'ordre du centimètre.

#### **III.5.7.2. Prélèvement sur site**

Le prélèvement constitue une phase délicate du diagnostic du béton. Le nombre et le type d'échantillons sont choisis en fonction des données fournies par l'inspection du site et par le type d'analyse à effectuer en laboratoire.

Les échantillons ne sont pas strictement représentatifs des zones les plus saines, ni des zones les plus dégradées. Les échantillons sont choisis, par un inspecteur expérimenté, pour la représentativité des

phénomènes de dégradation.

### **III.5.7.3. Prélèvement d'acier**

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcul d'une structure est interpréter demandé. Dans ce cas, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature.

Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

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

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploitée afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale. [16]



**Fig III.3 : Prélèvement d'acier**

### **III.5.7.4. Echantillonnage**

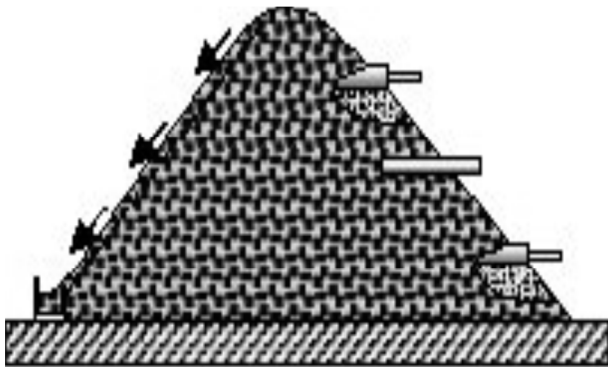
Le prélèvement d'échantillon se fait le plus souvent par carottage.

Suivant la nature et le type d'analyse la profondeur et le diamètre des carottes sont adaptés.

Dans la plupart des cas, le carottage se fera dans les espaces (si possible) dépourvus d'armature renseigné par le balayage pachométrique.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

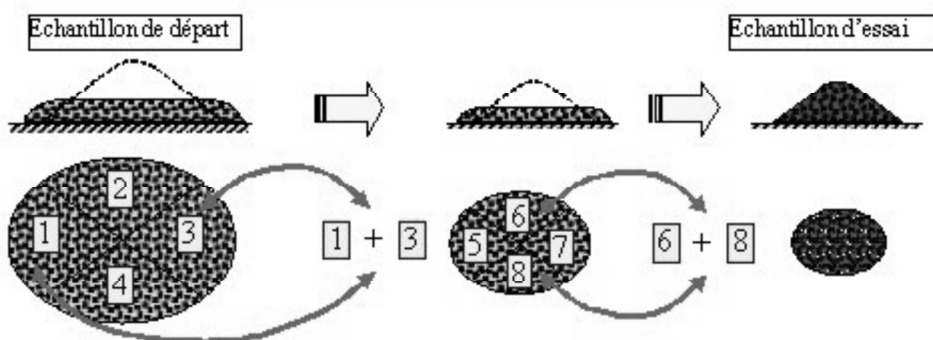
a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai. Le matériau n'étant pas homogène, le nombre de prélèvements doit être aussi grand que possible.



**Fig III.4 : Prélèvement sur le chantier**

b) Au laboratoire, prélèvement par partage de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

**Quartage** : consiste à séparer l'échantillon en 4 parties (figure). L'échantillon étalé est partagé en 4 quartssensiblement égaux. On élimine 2 fractions opposées et on réunit les 2 autres fractions. Si la quantité est encore trop importante, le quartage se poursuit selon le même processus jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.



**Fig III.5 : Quartage**

### III.5.7.5. Objectif de l'échantillonnage

- Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des **quantités réduites** de matériaux, ceux-ci doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement.
- Par conséquent il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit **représentatif de l'ensemble**.

### **III.6. Méthodes destructives**

#### **III.6.1. Le contrôle destructif et ses limites**

Si la recherche documentaire est la première source d'informations techniques permettant de juger de la conformité géométrique ou matérielle d'un ouvrage (plans d'origine, notes de Calculs...), dans de nombreux cas, ces documents ne sont malheureusement pas ou plus disponibles. En outre, on peut souvent émettre des réserves quand à la bonne conformité de l'ouvrage au regard des plans eux-mêmes.

Enfin, si des anomalies sont présumées, elles peuvent se trouver cachées dans le pire des cas, ou difficilement accessibles aux investigations extérieures directes. L'observation visuelle ne peut alors se suffire à elle-même.

Une solution naturelle consiste à privilégier l'acquisition de données (caractéristiques Mécaniques) durant la vie de l'ouvrage en multipliant les prélèvements d'échantillons. Des analyses fines des processus de détérioration et des essais en laboratoire (caractérisations Mécaniques, physiques ou chimiques) sont ensuite effectuées sur ces prélèvements. Cette solution présente de sérieuses limites que nous allons développer dans les quatre paragraphes suivants.

##### **III.6.1.1. Représentativité de l'information recueillie**

Même si le laboratoire est un lieu idéal pour la caractérisation fine de l'interface pâte/granulat par exemple, il n'est, en général, pas forcément adapté à l'analyse d'objets ou de phénomènes couvrant des échelles plus larges. De plus, l'intégrité de l'ouvrage mais également à celle du prélèvement est atteinte lors de l'extraction d'un échantillon. Par exemple, dans le cas de la caractérisation de fissures, il est quasiment impossible de prélever un échantillon fissure en maintenant jusqu'au laboratoire la fissure « en l'état », soit parce que la fissure empêche la bonne tenue de l'échantillon (fissure traversant la carotte prélevée), soit parce que la technique de prélèvement provoque elle-même de la fissuration, ou encore soit parce que l'absence de contrainte favorise le gonflement de l'échantillon (cas de la réaction alcali-silice).

##### **III.6.1.2. Étendue spatiale de l'information recueillie**

Les analyses mécaniques, physiques ou chimiques sur des échantillons prélevés ont l'avantage de fournir des informations qui sont souvent directement exploitables dans la stratégie d'évaluation. Mais l'information recueillie n'est pertinente qu'à l'échelle de l'échantillon et de sa périphérie. Dans ce sens, les grandeurs mesurées sur les carottes ne représentent qu'une information spatiale très localisée d'une infime partie de la structure. Par conséquent, les résultats obtenus à cette petite échelle sont difficilement généralisables sans hypothèse supplémentaire.

De plus, sans information préalable (campagne de pré-auscultation, par exemple),

L'échantillon est prélevé au hasard. En particulier, il peut être extrait d'une zone qui n'est pas forcément représentative des phénomènes que l'on cherche à analyser.

### **III.6.1.3. Accessibilité et sensibilité de l'ouvrage :**

Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements, soit pour des raisons d'accessibilité de l'ouvrage, soit pour des raisons de sensibilité de la structure. Par exemple, nous comprenons aisément que certains éléments d'une centrale nucléaire ne puissent subir de dégradations liées à une campagne de carottage. C'est souvent le cas pour des structures en béton armé.

### **III.6.1.4. Aspect économique :**

Dans le cadre d'un projet de diagnostic à l'échelle d'un ouvrage entier, chaque prélèvement représente un coût. Or, pour évaluer cet ouvrage avec une précision et une pertinence suffisante, il faut souvent multiplier les prélèvements. En plus de porter atteinte à l'ouvrage, cela représente une dépense supplémentaire importante non négligeable. Ces frais sont souvent supérieurs à ceux engendrés par une campagne d'auscultation.

## **III.6.2. Essais destructif :**

### **III.6.2.1. Le carottage :**

#### **III.6.2.1.1. Introduction :**

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

#### **III.6.2.1.2. A quoi sert un carottage**

Le carottage est une technique de prélèvement d'échantillon qui consiste à forer un substrat à l'aide d'une tarière pour obtenir un cylindre de matière.

L'analyse de la stratification de ce cylindre permet alors de reconstituer la nature d'un sol (carotte de sédiments), une chronologie (carotte de bois) ou encore la compression de l'atmosphère du passé (carotte de glace).

#### **III.6.2.1.3. Le but de carottage**

Le but est de déterminer la résistance du béton en place. C'est un essai destructif. Le rebouchage est effectué par notre équipe. Le but premier est de déterminer la résistance du béton.

### **III.6.2.1.4. Le Principe de carottage**

Le carottage se déroule selon les opérations suivantes :

- repérer préalablement les armatures métalliques internes au béton pour implanter le carottage et éviter les armatures ;
- fixer la carotteuse sur la partie d'ouvrage à partir de laquelle la carotte doit être extraite ;
- carotter à l'aide d'un carottier de diamètre adapté pour l'examen ou l'essai à réaliser;
- extraire la carotte et la conditionner en fonction de l'essai à réaliser ; Reboucher à l'aide d'un produit adapté (béton ou mortier sans retrait).

### **III.6.2.1.5. Matériel spécifique employé**

Carotteuse.

Carottier de diamètre adapté pour l'examen ou l'essai à réaliser (par exemple, pour les essais mécaniques et physiques, le diamètre du carottier doit être d'au moins 3 fois le diamètre nominal du plus gros granulats du béton et il est conseillé d'aller jusqu'à 5 fois le diamètre ; pour certaines analyses minéralogiques et chimiques du béton, le diamètre doit être « excédentaire » compte tenu du délavage de la zone périphérique extérieure lors du carottage à l'eau).

Rallonges pour le carottier selon la profondeur du prélèvement (pour certaines analyses minéralogiques et chimiques du béton, le carottage doit être réalisé jusqu'au cœur de la pièce).

Moyens d'accès et moyens de mise en sécurité du personnel adaptés à la localisation des prélèvements (nacelle positive ou négative, échafaudage, etc.).

Moyens d'alimentation en eau (réseau sur site ou pompe pour alimentation dans rivière ou citerne).

Moyens d'alimentation électrique (secteur sur site ou groupe électrogène).

Moyens d'alimentation pneumatique (air comprimé) pour des carottages sous l'eau ou en plafond avec de l'eau.

Système de fixation de la carotteuse (cheville ou ventouse).

-Système de détection des aciers (type Ferro scan ou Profometer par exemple).

-Système de récupération des carottes (pinces adaptées).

-Moyen d'identification des prélèvements (marqueur, etc.).

-Sacs de conservation après extraction (sac plastique ou film cellophane).

-Nécessaire pour le rebouchage (auge, mortier, truelle, taloche, etc.).

-Nécessaire pour le nettoyage (éponge, serpillière, aspirateur, etc.).

### **III.6.2.2. Analyse en laboratoire**

Les échantillons prélevés sont soumis à des analyses de laboratoire qui viennent en complément des essais réalisés in situ.

Les analyses en laboratoire permettent de compléter les observations obtenues par les observations in situ décrites précédemment (visuelles, non destructives, destructives). Elles livrent des résultats localisés mais qui sont par contre relativement objectifs et précis. Cette précision ne doit toutefois pas être surévaluée. Lorsque l'on procède à des essais en laboratoire il faut attacher une grande importance à la localisation des prélèvements ainsi qu'à la manutention des échantillons. Un seul essai en laboratoire donne, dans le meilleur des cas, une indication mais certainement jamais un résultat permettant à l'ingénieur de tirer des conclusions.

En laboratoire on fait principalement des essais de résistance et des analyses chimiques (par ex. composition chimique, etc.). Certains essais permettent en outre de tirer des conclusions sur la durabilité des matériaux (essais d'exposition aux agents atmosphériques tels que gel, ultraviolets, etc.). Du fait que ni les constats visuels, ni les analyses non destructives ou destructives ne sont en mesure de répondre aux questions évoquées ci-dessus, il est certain que les analyses en laboratoire sont un moyen extrêmement utile pour l'évaluation de l'état d'un ouvrage.

## **III.7 Conclusion**

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser.

C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles.

Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes.

Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentour. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de protection adaptée, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables

**CHAPITRE IV**  
**REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME**

## CHAPITRE IV

## REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME

## IV.1. INTRODUCTION

Dans la construction, tous les matériaux ont sans exception, une durée de vie limitée. Au fil des temps, les ouvrages connaissent plus ou moins rapidement des altérations. Tout ouvrage exposé aux intempéries doit être entretenu, réparé, ou même refait.

**Réparation :**

C'est une réhabilitation de la structure lorsque les dommages sont visibles au niveau des éléments structuraux; l'ouvrage doit retrouver son aspect initial et approximativement sa résistance de conception initiale.

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

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

[19] [20]

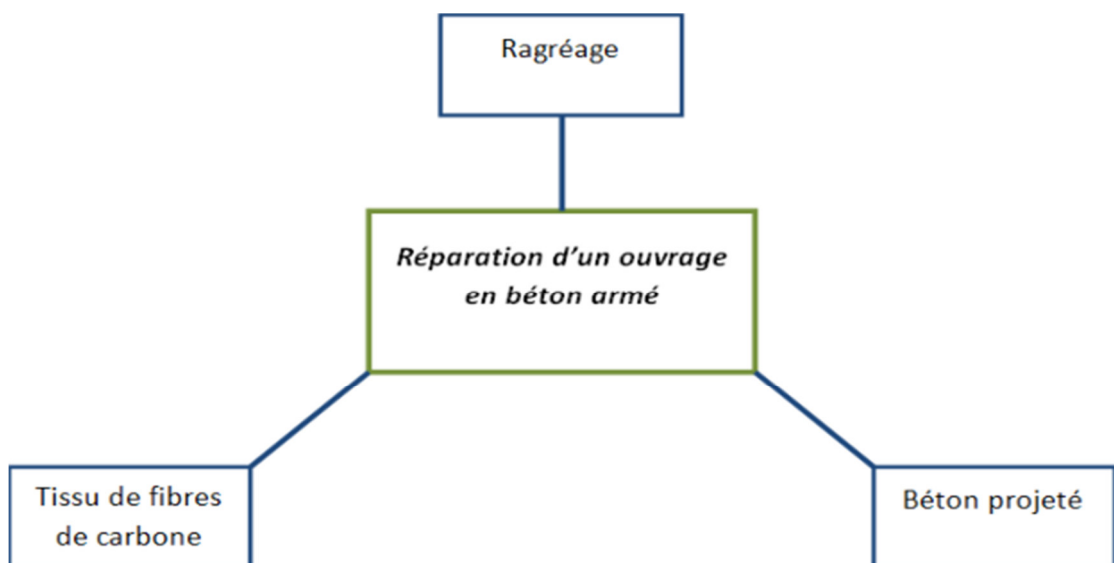


Fig. IV.1 : Schéma de la réparation d'ouvrages en béton armé

## IV.2. LES DIFFERENTES METHODES DE REPARATION

## IV.2.1 Le Ragréage

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

La préparation de surface est une étape très importante pour la pérennité des réparations, elle doit être effectuée avec soins. Il s'agit dans un premier temps d'éliminer toutes les zones présentant une faible cohésion sur l'élément à reprendre. C'est dire qu'il faut vérifier chaque zone, afin de voir s'il n'y a pas de décollement du béton, de la fissuration apparente, des épaufrures, etc. Les zones de fissuration ségrégation doivent elles aussi être éliminées.

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

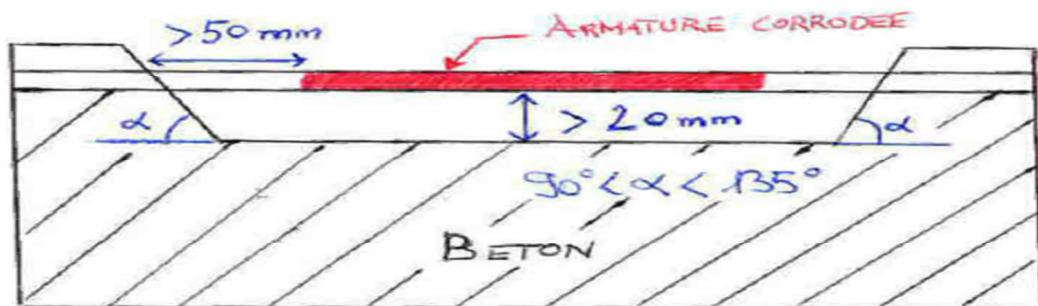


Fig. IV. 2 : Dégagement des armatures

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

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

(par brossage, par application au pinceau, etc.)

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

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

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

## IV.2.2. Le Béton Projeté

### IV.2.2.1. Définition

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



**Fig. IV. 3 : Projection de béton**

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

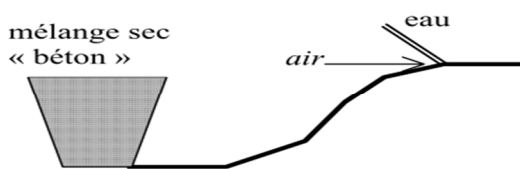
Lorsque les surfaces à réparer sont assez faibles, on privilégiera plutôt le ragréage, plus adapté aux

petites surfaces.

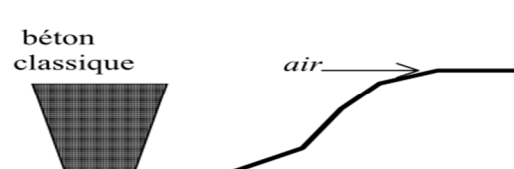
#### IV.2.2.2. Technique de projection

Il existe principalement deux techniques de projection du béton. Elles se différencient par rapport à l'emplacement de l'introduction de l'eau de gâchage dans le matériau. Il y a tout d'abord la méthode de projection par voie humide, le béton gâché est transporté jusqu'à la lance soit par pompage soit par de l'air comprimé. Il y a ensuite la méthode de projection par voie sèche pour laquelle le mélange de ciment et de granulats, non additionné d'eau au moment du malaxage, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau étant ajoutée au dernier moment, en bout de lance.

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



**Fig. IV. 4 : Béton projeté par voie sèche**



**Fig. IV. 5 : Béton projeté par voie humide**

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

- Malaxer, homogénéiser les matériaux à l'état sec ou humide
- Les transporter par canalisation, rigides ou souples, grâce à des pompes mécaniques ou à de l'air comprimé
- À projeter plus ou moins violemment, grâce à de l'air comprimé ; le matériau sur les supports à revêtir.

Cependant, selon la méthode utilisée les résultats vont présenter quelques différences. Par voie sèche, on obtiendra une résistance plus élevée que par voie humide du fait du faible rapport E/C. Mais on aura une capacité de production plus limitée, un dégagement de poussière plus important, mais surtout un risque de détérioration d'un support fragile.

Dans tous les cas, cette surépaisseur de béton est moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques. Le béton projeté n'étant pas encore carbonaté, il stoppe l'évolution de la carbonatation, le temps d'être lui-même complètement carbonaté.

Il empêche également la pénétration d'humidité grâce à sa faible porosité, ce qui protège les armatures de la corrosion. De plus, il est possible d'ajouter des inhibiteurs de corrosion dans la formulation du béton, ce qui permet de rendre plus pérennes les réparations effectuées.

### IV.2.3. Tissus de fibres de carbone

Le renforcement par tissus de fibres de carbone peut se faire sur différents types de structures et sur les différents matériaux usuels de la construction tels que le béton armé ou non, le bois, ou les structures métalliques. Ce matériau est dit composite, car il s'emploie généralement avec une résine.

Il présente beaucoup d'avantages, notamment liés à ses fortes caractéristiques mécaniques pour une masse volumique relativement faible.

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

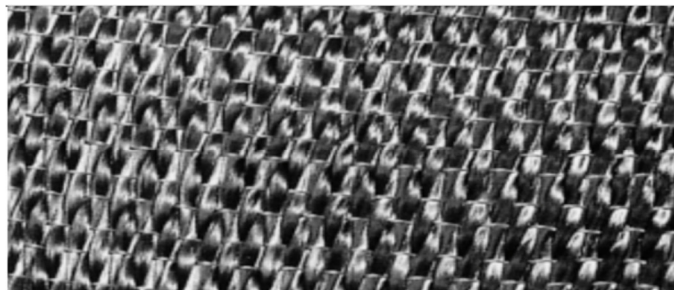
- sa faible densité.
- ses propriétés mécaniques longitudinales.
- l'absence de corrosion.
- sa très bonne tenue à la fatigue.
- sa facilité de manipulation.

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

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

Dans le cadre de la réhabilitation d'ouvrages en béton armé, la qualité du support est primordiale. Il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm. Les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique.

Cette technique peut être utilisée dans le renforcement d'un ouvrage, soit dans le cas de perte de section d'acier importante, soit lorsque la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter. Ce procédé consiste à placer des bandes de toile de fibres de carbone par collage aux endroits déficients de l'élément concerné. Il est à noter qu'une protection au feu est nécessaire



**Fig. IV.6 : Tissus de fibre de carbone**

### IV.3. CAS DE REPARATION

#### IV.3.1. Réparation du béton due a la carbonatation

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

##### IV.3.1.1. Technique de réparation (carbonatation)

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



**Fig. IV. 7 : Technique De Réparation (carbonatation)**

##### IV.3.1.2. Le Traitement des armatures

Après l'enlèvement des parties friables (toutes les parties non adhérentes) et le dégagement des armatures (manuellement ou mécaniquement), les opérations de brossage et de grattage pour éliminer la rouille peuvent s'opérer. Un inhibiteur de rouille est possible et peut être appliqué. En cas de diminution sensible de la section des aciers, il y aura lieu de renforcer ou de remplacer. L'épaisseur de recouvrement minimale des armatures devra être respectée dans tous les cas car celle-ci est un facteur important pour sa protection.



**Fig. IV. 8 : Traitement Des Armatures**

#### **IV.3.1.3. La Réparation du béton**

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



**Fig. IV. 9 : Réparation Du Béton**

#### **IV.3.1.4. La finition**

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

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

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



**Fig. IV. 10 : Finition**

### IV.3.2. Réparation des désordres superficiels

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

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

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

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

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

#### IV.3.2.1. Traitement des fissures

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration :

Ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression... de l'état et du type de support et des délais imposés pour la remise en service de l'ouvrage.

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

comprise entre 0.1 et 0.2 mm.

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

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

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

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

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

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

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

Produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques.

#### **IV.4. CONCLUSION SUR LES REPARATIONS**

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

#### **IV.5. LES REVETEMENTS**

##### **IV.5.1. Le revêtement imimpermeabilisant**

Les revêtements de surface, permettant de protéger la structure contre des attaques, sont décomposés en différentes catégories, elles sont décrites dans la suite. Chaque type de revêtement a son propre mode d'application.

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

**IV.5.1.1. la peinture**

La mise en peinture peut avoir différentes fonctions :

-Elle permet d'améliorer l'esthétique de l'ouvrage, par la mise en couleur ou la création de motifs décoratifs, en vue de lui donner un aspect particulier, ou d'homogénéiser, lorsque nécessaire, la teinte de ses parements,

-Son but peut être d'augmenter le confort et la sécurité des usagers, tout en facilitant le nettoyage (exemple : revêtement des tunnels),

-Elle permet aussi de participer à la sécurité de l'ouvrage (exemple : balisage des pylônes)

-Mais avant tout chose, elle permet de contribuer à la protection du béton.

En effet, la mise en place d'un système de peinture en couche mince, dans la mesure où il apporte une amélioration de l'imperméabilité du support peut permettre de ralentir la pénétration de l'humidité extérieure et d'améliorer ainsi la durabilité du béton.

**IV.5.1.2. Les lasures**

Les lasures peuvent être utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture du parement en béton. Il existe des lasures incolores, mais aussi colorées. L'avantage par rapport aux peintures c'est qu'elles ne sont pas **opacifiantes**.

**IV.5.1.3. Les revêtements minces**

Sont inclus dans cette catégorie :

-Les revêtements plastiques épais contenant généralement des éléments à base de résines acryliques ou polyuréthanes

-Les revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique

-Les revêtements divers à base de polyuréthane

**IV.5.1.4. Les enduits de façade**

On distingue deux catégories dans les enduits de façade :

-Les enduits traditionnels, exécutés en trois couches distinctes

-Les enduits monocouche prêts à l'emploi.

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



**Fig. IV.11 : Mise en place d'un revêtement de surface**

## *Chapitre 5*

### *Conclusion générale*

#### *Conclusion*

La durabilité d'un ouvrage est liée à une qualité de construction sans faille. C'est une chaîne qui part du concepteur qui doit connaître les limites du matériau, passe par le calculateur qui doit connaître les règles de dimensionnement et s'intéresser à l'élaboration de plans allant au détail de toutes les opérations de fabrication et de réalisation.

Elle touche ensuite tous les corps de métiers : coffreur, ferrailleur, bétonnier, personnel de chantier qui doivent chacun en prendre soin jusqu'à la réception par l'utilisateur qui doit l'entretenir par des opérations de maintenance.

Si l'un des maillons de la chaîne est défaillant, la chaîne est alors défaillante. Ainsi, l'imperfection de plusieurs maillons a ici un effet cumulatif.

Les sinistres enregistrés montrent qu'ils sont la conséquence de la synergie de plusieurs défaillances (au moins deux) d'origines indépendantes.

La robustesse et l'adaptabilité du béton armé pardonne généralement une à deux défaillances ; il ne cède finalement que sous la gravité ou l'abondance des mauvaises actions que lui font subir ses constructeurs.

Le travail mené dans le cadre de ce Projet de Fin d'Études a permis, dans un premier temps, de recenser les dégradations potentielles qui affectent les structures des ouvrages en béton armé.

Il nous avons ensuite donner l'occasion de présenté les principales techniques d'investigation et les étapes de diagnostic d'ouvrages en béton armé. On a pu voir qu'il existait deux types de diagnostic, l'un en utilisant des méthodes destructives et l'autre avec des méthodes non destructives. Il a été souligné l'importance du diagnostic dans le processus de réhabilitation et de réparation des structures en béton armé. Concernant les différentes techniques de réparation de béton armé, nous nous sommes appuyés sur un état de l'art des travaux relatifs au sujet traité.

L'objectif visé ici était de présenter un travail énumérant les principales pathologies des ouvrages avec leurs origines et particulièrement les dégradations affectant les structures en béton armé ; en traitant avec plus de détails le phénomène de la corrosion affectant les ouvrages en béton armé

Pour y parvenir, nous avons jugé indispensable :

- de présenter le matériau béton armé et les différentes pathologies dont il peut être atteint car on ne peut pas prétendre soigner un mal dans un corps si on ne connaît pas bien le corps en question.
- d'expliquer le mécanisme de la corrosion et les dommages qu'elle peut causer aux structures.
- de donner les étapes à suivre pour pouvoir établir un diagnostic fiable sur un ouvrage en béton armé.
- de présenter les méthodes de réparation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures, leur mise en œuvre.

Ce document, nous l'espérons, sera un précieux outil pour les techniciens et les ingénieurs chargés du suivi et de la maintenance des ouvrages d'art.

Par ailleurs, on constate que la corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé et pour cela, elle doit être prise très sérieusement. De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre cette pathologie alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit au non-maîtrise du phénomène de corrosion par les techniciens et les ingénieurs, soit à une mauvaise démarche adoptée lors des réparations ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate inefficace.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MEHTA, P.K. ET GERWICK, B.C., *Concrete structures, properties and materials*, Concrete International, 1982.
- [2] MEHTA, P.K. *Performance of concrete in marine environment*, ACI SP-65, pp. 1-20, 1980
- [3] MAILVAGANAM N.P, *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, FL 1992.
- [4] LCPC, *Défauts d'aspect des parements en béton*, techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées.
- [5] GODART B. & LE ROUX A., *Alcali-réaction dans le béton : mécanisme, pathologie et prévention*. C
- [6] GHOMARI F. , Pathologie des constructions, GCL 556, Université. Tlemcen 2003.
- [7] RAHARINAIVO A., ARLIGIE G., CHAUSSADENT T., *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, Presse Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998.
- [8] TAHENNI T. *Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute* , Thèse Magister en Génie Civil, USTHB, 2006.
- [9] BARON J., *Les fissurations spontanées et accidentelles du béton non armé et armé*, Le béton hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
- [10] GRIMALDI G. et al, *Visualisation des fissures des bétons par la méthode du ressuage*, bulletin de liaison des LPC n° 129, p. 51-55, janvier-février 1984.
- [11] PERCHAT J., *Béton armé : Règles BAEL. Pathologie et réparation des ouvrages*. C 2317, traité Construction ,1998.
- [12] GIACCIO G., GIOVAMBATTISTA A., *Bleeding : Evaluation of its effects on concrete behaviour.*, Matériaux and structures (RILEM) v112 pp 265 - 71, july-august 1986.
- [13] BEHR M., TROUILLET P., *Ouvrages d'art, actions et sollicitations thermiques*, bulletin de liaison des LPC n° 155, p. 57-72, mai-juin 1988.
- [14] LACHAUD R., SALOMON M., *Les altérations du béton*, Cahier de l'A.F.B.n° 225, octobre 1984. 2252, traité Construction 1995.
- [15] JOUANNEAU J.C., *auscultation des partie immergées d'ouvrages d'artpar sonar latéral*, bulletin de liaison des LPC n° 129, p. 5-12, janvier-février 1986.
- [16] BOUILLETTE J.P. *Protection des constructions en acier contre la corrosion*. C 2505, traité Construction 1983.
- [17] ITBTP, *Protection contre la corrosion des armatures du béton armé et du béton Précontraint*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1985.
- [18] LASSOUED R., OUCHENANE K. ET OUCHENANE M, *Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures et effet de la corrosion sur l'adhérence*, Colloque National : Pathologie des Constructions, Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008..
- [19] CALGARO J.A et LACROIX R., *Maintenance et réparation des ponts*, Presses de l'E.N.P.C., 1997.
- [20] MAILVAGANAM N.P et TAYLOR D.A, *Compatibility of repair systems for concrete structures*, CANMET/IRC Symposium on advanced materials, Ottawa. 1994.