



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : Génie Civil et d'Architecture
DÉPARTEMENT : Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Khelifi Abdellah
Khelaif Sarah

DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Génie Civil
OPTION : Structures

Thème

**Etude de la fissuration dans les structures en béton armé,
étude des cas réel**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr Zaidi Ali	Professeur	Président
Mr Krobba Benharzallah	M.A.A	Examinateur
Mr Merah Ahmed	M.C.A	Rapporteur
Mr Khenfer Mohamed Mouldi	Professeur	Co-rapporteur

Promotion : 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la connaissance de la science et de nous avoir aidé afin de réaliser ce modeste travail.

*Nous souhaitons adresser nos vifs et profonds remerciements à notre promoteurs **Mr MERRAH AHMED** et **Mr Khenfer Mohamed Mouldi** Qui nous a guidés pendant le travail et nous a orienté vers les axes les plus pertinents, nous les remercions pour leur ouverture d'esprit et leur grande disponibilité.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à l'ensemble des enseignants du département de génie civil pour leurs efforts durant toute la durée de nos études de spécialité et encore une grand merci à **Mr T. BENTABET.***

Nos gratitudes sont également à tous les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail. Enfin nous n'oublierons pas ceux qui ont participés d'auprès ou de loin à la réalisation de ce projet.



Dédicaces

Rien n'est aussi beau que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur, à ceux qu'on aime à la frontière de l'imagination.

Je dédie ce modeste travail :


A ma très chère mère et à mon père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutiens permanents, leurs réconforts moraux, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction pour me voir atteindre ce but.

A mes frères et sœurs pour tous leurs soutient durant mon cursus.

A toutes ma famille sans distinction, pour leurs contributions d'une manière ou d'une autre pendant ses années.

A mon binôme khelaif Sarah et sa famille.

A tous mes amis, Mohamed, Yousef, Touhami, Zakaria, Anes, onnar, et Mohamed Dabaj, Sidahmed, najib, hamza biji, youcef, karime pour leurs soutiens inconditionnels.



A tous mes amis du département de génie civil que je ne nomme pas, mais qui ont été présents à un moment ou à un autre au cours de ces cinq (05) ans, et qui le seront un bon moment.

kH. Abdellah



Dédicaces

Je m'incline devant Dieu tout puissant qui m'a ouvert la portée du savoir et m'a aidé à la franchir ;

Je dédie ce lapidaire travail fruit de mes labeurs

A Source d'affectation de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour....Ma chère Maman Fatima Zahra .

A Source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté...Mon cher papa Lakhdar ;

A mes très chères sœurs, Iman, Houda, Ikram et Wafa

A toute la famille khelaif et la famille Daheuret la grande famille.

A ma chère binôme khelifi Abdellah et sa famille pour laquelle je souhaite une vie pleine de joie et de réussite ;

A tous mes amis(es) Nana, Amel, Sara, Ikram, Manel, Rofi, Missou, Maroua, Houda, Hadjer, Nadia, Imane

A toute la promo 2019 Du Génie civil.

En fin, à tous ceux qui je porte dans mon cœur.

KH.SARAH

Résumé :

La conception des structures en béton armé consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Il est nécessaire que les structures en béton armé soient capables de reprendre les efforts qui leur sont appliqués tout au long de leur vie.

En effet, les dégradations des ouvrages en béton armé sont dues à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Afin de réhabiliter un ouvrage en béton armé, il est important d'effectuer un diagnostic, grâce à cela, il est possible de proposer une méthode de réparation adéquate ainsi qu'une protection contre les attaques aux futures. Un suivi de l'ouvrage peut être réalisé afin de déterminer l'évolution des différentes pathologies.

Dans le but d'appliquer les connaissances théoriques acquises sur la pathologie des constructions, deux cas pathologiques réels ont été étudiés de la phase de diagnostic jusqu'à la phase de proposition de solutions. Ces deux cas pathologiques sont dus principalement au changement de la capacité portante du sol de fondation causé par les infiltrations des eaux usées et des eaux pluviales par manque de drainage. Les solutions proposées pour ces cas pathologiques avant d'entamer la phase de réparation sont de vérifier les réseaux d'assainissement et d'eaux pluviales.

Mot clés : Fissuration, Diagnostic, Pathologie, Réparation, Étude des cas

ملخص:

يهدف تصميم الهياكل الخرسانية المسلحة أساساً إلى توفير مستوى مقبول من الأمان لتقليل المخاطر المرتبطة بالكوارث وتدهور حالة المباني وفقدان الأرواح. من الضروري أن تكون هذه الهياكل قادرة على تحمل الجهود المطبقة عليها على طول المدى. في الواقع، تدهور الهياكل الخرسانية راجع إلى الضغوطات الناتجة عن القوى الدائمة أو المطبقة. من أجل إعادة تأهيل الهيكل الخرساني المسلح، من المهم إجراء تشخيص، الذي يمكننا من اقتراح طريقة اصلاح مناسبة بالإضافة إلى الحماية من الهجمات المطبقة على المدى البعيد. تمكننا متابعة حالة المبنى من تحديد تطور حالة تدهوره. من أجل تطبيق المعارف النظرية المكتسبة فيما يخص حالة تدهور المبنى، تم دراسة حالتين انطلقا من التشخيص وصولاً إلى اقتراح الحلول. هاتان الحالتان راجعتان أساساً إلى التغيير في قدرة تحمل تربة الأساسات الناتجة عن تسرب مياه الصرف الصحي ومياه الأمطار بسبب النقص على مستوى شبكة الصرف. تتمثل الحلول المقترحة لهذه الحالات المتضررة قبل الشروع في مرحلة الإصلاح، في فحص شبكات الصرف الصحي ومياه الأمطار. الكلمات المفتاحية: التشخيص، الأضرار، تصليح، دراسة حالة.

Abstract:

The design of concrete structures is essentially about providing an acceptable level of safety to reduce the risks of failure, disaster and loss of life. It is necessary for reinforced concrete structures to be able to resume the efforts applied to them throughout their lives.

Indeed, the deterioration of concrete structures is due to operational or environmental stresses. In order to rehabilitate a reinforced concrete structure, it is important to carry out a diagnosis, thanks to which it is possible to propose an adequate repair method as well as protection against future attacks. A follow-up of the work can be carried out in order to determine the evolution of the different pathologies.

In order to apply the theoretical knowledge acquired on the pathology of constructions, two real pathological cases were studied from the diagnostic phase to the solution proposal phase. These two pathological cases are mainly due to the change in the load-bearing capacity of the foundation soil caused by infiltration of wastewater and rainwater due to lack of drainage. The solutions proposed for these pathological cases before starting the repair phase are to check the sewerage and stormwater networks.

Key Words: cracking, Diagnostic, Pathology, reparation

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Introduction</i>	2
<i>I. Définition du matériau</i>	2
<i>I.1 Le Béton</i>	2
<i>II. Les méthodes de mise en œuvre du béton</i>	4
<i>II.1 Fabrication du béton</i>	4
<i>II.2 Le coffrage</i>	5
<i>II.3 Le bétonnage</i>	6
<i>II.3.1 Pathologies du bétonnage</i>	6
<i>III. Association béton acier</i>	8
<i>III.1 L'acier</i>	8
<i>III.2 Béton armé</i>	8
<i>III.3 Les raisons l'association béton /acier</i>	9
<i>III.4.1 Fonctions d'adhérence</i>	9
<i>IV. La fissuration dans le béton</i>	9
<i>IV.1 Comment caractériser une fissure ?</i>	9
<i>IV .2 Evolution d'une fissure</i>	12
<i>IV .3Emplacement des différentes fissures</i>	12
<i>IV .4 Causes de la fissuration</i>	15
<i>IV .5 Corrosion des armatures par Carbonatation</i>	17
<i>IV.6 Corrosion</i>	19
<i>V. Les moyens de prévention et remèdes des fissures dans le béton</i>	21
<i>V.1 Les moyens de prévention des fissures</i>	21
<i>V.2 Les moyens de réparation des fissures</i>	23
<i>V.2.diagnostic</i> :.....	23
<i>V.2 .1 La démarche de diagnostic</i>	23
<i>V.2 .2 Préparation du surfaces</i>	25
<i>V.3 Méthodes de réparations</i> :.....	26

Sommaire

V.3.1 Le ragréage	26
V.3.2 Projection.....	27
V.3.3 Renforcement par matériau composite :	27
V.3.4 Traitement des fissures	28
V.3.5 Réparation et renforcement des structures.....	31
V.2 .5Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures.....	33
Conclusion	34
Introduction	36
II.1 Choix des investigations	36
II.2 Types investigations.....	37
II.2.1 Investigations non-destructives	37
II.2.1.1 Relevé visuel.....	37
II.2.1.2 Le relevé du ferrailage.....	39
II.2.1.3 Le scléromètre	41
II.2.1.4 L'auscultation sonique.....	42
II.2.2 Investigations destructives	43
II.2.2.1 Carottage d'éléments en béton armé.....	43
II.2.2.2 Prélèvements d'aciers	44
II.2.2.3 Potentiel de corrosion.....	45
II.2.2.4 Test à la carbonatation.....	47
II.2.3 Méthodes numériques des investigations.....	48
II.2.3.1 Caractérisation de la fissuration du béton lors d'essais en laboratoire en utilisant le traitement d'image.....	49
II.2.3.2 Simulation de la fissuration par éléments finis via le code Cast3M	49
II.2.3.3 Instrument d'analyse de la corrosion canin +.....	50
II.2.3.4 Méthode Globale/Locale Fissuration des Structures en Béton.....	51
Conclusion	51
Introduction	51
III.1 Premier cas : Lycée 1000 places pédagogique	51
III.1.1 Description et données de l'ouvrage.....	51
III.1.1.1 Description de l'ouvrage :.....	51
III.1.2 Constats visuels.....	53
III.1.3 Les causes probables de la fissuration	57
III.1.4 Les solutions envisagées	57

Sommaire

<i>Recommandation et conclusion</i>	<i>58</i>
<i>III.2 Deuxième cas : Siège de la Radio de Laghouat.....</i>	<i>59</i>
<i>III.2.1 Description de l'ouvrage.....</i>	<i>59</i>
<i>III.2.2 Caractéristiques géotechniques du sol d'assise</i>	<i>60</i>
<i>III.2.3 Constats visuels.....</i>	<i>61</i>
<i>III.2.4 Les causes probables de fissuration.....</i>	<i>63</i>
<i>Recommandations et conclusion.....</i>	<i>64</i>
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>67</i>
<i>Bibliographie</i>	

Liste des Figures et Tableaux

Listes des Figures

Figure I-1: Ségrégation des éléments en béton armé.....	6
Figure I-2: Vibration du béton au moment du coulage.....	8
Figure I-3: Phénomène Le Faïençage.....	10
Figure I-4: Microfissure.....	11
Figure I-5: Fissure.....	11
Figure I-6: Lézarde.....	12
Figure I-7: l'emplacement de différents types des fissures sur un ouvrage en béton.....	12
Figure I-8: retrait plastique.....	15
Figure I-9: Alkali-réaction du béton.....	16
Figure I-10 : Réactions sulfatiques.....	17
Figure I-11: présentation schématique de phénomène de la carbonatation.....	17
Figure I-12: phénomène de la carbonatation.....	18
Figure I-13: phénomène du Corrosion.....	19
Figure I-14: Sondages carottés.....	21
Figure I-15: construction en sous-sol partiel.....	22
Figure I-16 : construction en terrain argileux proche la végétation.....	23
Figure I-17: schéma représente le démarche de diagnostic.....	24
Figure I- 18 : fissure oblique au niveau du mur.....	24
Figure I-19: Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101.....	25
Figure I-20:l'application du mortier et Finissage par taloche.....	26
Figure I-21: Projection par voie humide et sèche.....	27
Figure I-22: Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone.....	28
Figure I-23: Calfeutrement des fissures.....	29
Figure I-24: calfeutrement d'une fissure à l'aide d'un mastic.....	30
Figure I-25: Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature.....	29
Figure I-26: Les différents traitements des fissures.....	31
Figure I-27 : renforcement des poteaux.....	32
Figure II-1: Schéma du choix d'investigation.....	35
Figure II-2: Mesure d'une fissure à l'aide d'un fissure-mètre.....	37
Figure II-3: Représentation schématique de Réponse en fonction de la densité d'armature.....	39
Figure II-4: schéma qui représente le Principe de la détection linéaire.....	40
Figure II-5 : Le principe de la détection par fenêtre.....	40
Figure II-6: Détection des armatures d'un balcon.....	40
Figure II-7: Scléromètre de notre laboratoire de GC.....	40
Figure II-8: les appareils d'auscultation sonique de notre laboratoire de GC.....	42
Figure II-9: Schéma qui représenté les investigations destructives.....	43
Figure II-10: Carotteuse manuelle de notre laboratoire de GC.....	44
Figure II-11: Prélèvement d'aciers.....	45
Figure II-12: Principe du potentiel de corrosion.....	46
Figure II-13: Cartographie du potentiel de corrosion.....	46
Figure II-14: Mesure du potentiel de corrosion.....	47
Figure II-15: Graphique enrobage-carbonatation.....	48
Figure II-16 : le pachomètre.....	48
Figure II-17 : Evaluation de la largeur de la fissure en chaque point le long de la discontinuité.....	49
Figure II-18: appareil de la mesure de corrosion canine + de notre laboratoire de GC.....	50
Figure II-19 : Carte potentiel de corrosion.....	49

Liste des Figures et Tableaux

<i>Figure II-20: Illustration de la méthode Globale/Locale sur une éprouvette en L</i>	50
<i>Figure III-1: Plan de situation de lycée 1000 places</i>	51
<i>Figure III-2 : bloc dégradé</i>	52
<i>Figure III-3: Plan de RDC et Plan de masse</i>	52
<i>Figure III-4: Fissures inclinées des murs extérieurs et intérieurs</i>	53
<i>Figure III-5: Dégradation de la peinture et fissure d'interaction (mur –structure)</i>	53
<i>Figure III-6: Endommagement des crépis des murs</i>	54
<i>Figure III-7: Fissures inclinées au niveau du voile de sous bassement en gros béton</i>	54
<i>Figure III-8: Fissures au niveau cloisons au droit des ouvertures</i>	55
<i>Figure III-9 : Fissures inclinées au niveau des longrines</i>	55
<i>Figure III-10 : regard endommagé</i>	56
<i>Figure III-11: Présence de l'humidité à proximité des regards endommagés</i>	56
<i>Figure III-12: Témoins en verre placés sur les longrines</i>	56
<i>Figure III-113: chemisage de la semelle</i>	57
<i>Figure III-14 : collage de la semelle filante</i>	58
<i>Figure III-15 : ferrailage de regard renforcé</i>	58
<i>Figure III-16 : Situation du Siège de la Radio Laghouat</i>	59
<i>Figure III-17 : Façade principale de la radio</i>	59
<i>Figure III-18 : Corrélacion des coupes lithologiques des sondages carotte</i>	60
<i>Figure III-19 : des végétaux a coute de l'ouvrage.</i>	61
<i>Figure III-20: des fissures au niveau des cloisons</i>	62
<i>Figure III-21: Ouverture excessive des joints de dilatation</i>	62
<i>Figure III-22: Fissure de maçonnerie</i>	62
<i>Figure III-23: des fissures inclinées à intérieur de l'ouvrage</i>	63
<i>Figure III-24: exemple d'implantation d'écrans antiracine pour un arbre seul appartenant au propriétaire du projet ou au voisin.</i>	65
<i>Figure III-25: voile polyester avec protection plastique et écran béton classique</i>	65

Liste de tableaux

<i>Tableau 1: description et les types des fissures :</i>	13
<i>Tableau 2 : présente les principaux facteurs qui influencent la vitesse de carbonatation du béton</i>	17
<i>Tableau 3: les résultats - sur l'auscultation sonique des bétons :</i>	41

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton armé est un matériau de base de structures largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. Il peut se dégrader sous l'influence de causes liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. A partir du moment où une pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage, il est important de diagnostiquer d'une part d'où vient le problème, à quel degré il affecte l'édifice. Dans un second temps, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage.

Le diagnostic est une étape importante en présence de pathologies. En effet, si la source du problème est mal connue, les réparations préconisées ne correspondront pas réellement à ce qui est nécessaire et l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques. Pour effectuer un diagnostic, différents moyens d'investigation sont disponibles. On a d'une part les méthodes destructives, pour les structures pouvant être localement dégradées et les méthodes non destructives pour les ouvrages nécessitant d'être préservés tels que les bâtiments classés monuments historiques, et aussi les investigations par des méthodes numériques.

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

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

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et de définitions sur le béton et ses constituants, tel que le ciment, les adjuvants, etc..... .Ce chapitre comprend aussi l'étude de la pathologie et des désordres affectant le béton armé et sa durabilité ainsi que les techniques de réparations et de protection et de suivi des structures en béton armé.

Le deuxième chapitre présente les méthodes et les moyens d'investigations des cas pathologiques qui peuvent se présenter dans le domaine de la construction.

Le troisième chapitre est consacré à la mise en valeur des connaissances acquises dans les deux chapitres en faisant l'étude de deux cas réels, du diagnostic des désordres aux propositions de réparations possibles sur des structures en béton armé.

Enfin notre travail est clôturé par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I
Synthèse
Bibliographique

Introduction

Ce chapitre présente une revue de documentation sur les caractéristiques de béton armé et les méthodes de mise en œuvre, par la suite les types et les causes de fissuration de béton armé, en fin les techniques de prévention et réparation des désordres.

I. Définition du matériau

I.1 Le Béton

Le béton est le matériau le plus utilisable dans le monde pour la réalisation des plusieurs structures parce qu'il contient plusieurs avantages, la facilité d'utilisation (matériau moulable) et aussi le côté économique (pas très coûteuse).

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

Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%. Le produit obtenu s'appelle le ciment, elle fait prise par hydratation. Le ciment Portland composé de clinker, de gypse (5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). [1]

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

La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après l'ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte du ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. [1]

Ces composés sont principalement les silicates tricalcique C_3S et bi-calcique C_2S qui donnent du silicate mono-calcique hydraté CSH qui sont responsable de la résistance, ainsi que de la chaux libre hydratée CH dite « portlandite » qui est responsable de la durabilité, formant un gel microcristallin à l'origine du phénomène dit « de prise ». Ce sont les cristaux de silicate mono-calcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux constituants du matériau où ils ont pris naissance, confèrent à ce dernier sa résistance. C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques.

L'aluminate tricalcique C_3A donne quant à lui, par hydratation, de l'aluminate mono-calcique hydraté, ainsi que de la chaux libre hydratée. L'aluminate mono-calcique hydraté

joue un rôle important dans le développement des résistances. Il contribue, par la rapidité relative de sa réaction, à la montée des résistances aux jeunes âges.

La réaction chimique qui permet au béton (de ciment) de faire prise est assez lente : à peine 75% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température lors de son durcissement. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale). Le délai de 28 jours a été choisi afin de pouvoir contrôler la résistance (4 semaines après avoir coulé le béton). [2]

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes, composés de roches carbonatés [CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] ou siliceuses (SiO_2) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, la calcite (CaCO_3) est la plus commune, sont assez tendres et très stables et s'associent très bien aux liants. La calcite constitue l'essentiel des calcaires, avec une substitution fréquente de Ca par Mg (calcaires magnésiens, calcaires dolomitiques, dolomies) qui conduit à un minéral plus dur les granulats constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.[1]

L'adhérence du ciment aux éléments de granulats joue un rôle capital à la résistance à la traction et à la fragilité du béton, elle permet de réduire le risque de fissuration

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Les adjuvants les plus courants peuvent être organiques ou inorganiques et sont habituellement classés selon leur fonction :

- ✓ Les réducteurs d'eau qui ont pour fonction de diminuer le rapport E/C du béton tout en conservant la maniabilité désirée.
- ✓ Les retardateurs qui permettent de ralentir le durcissement de la pâte.
- ✓ Les accélérateurs qui permettent d'accélérer le développement de la résistance au jeune âge du béton et d'accélérer sa prise.
- ✓ Les super plastifiants qui sont des polymères organiques solubles dans l'eau et dont la synthèse conduit à de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Leur principale action est de s'enrouler autour des grains de ciment de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, entraînant une dispersion des grains
- ✓ Les agents entraîneurs d'air qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène.

Le béton avec super plastifiant et retardateur de prise présente une ouvrabilité plus élevée à celle des mortiers sans adjuvants, cette ouvrabilité augmente avec l'augmentation de pourcentage d'adjuvant. L'ajout du super plastifiant dans le béton a provoqué une importante amélioration de l'ouvrabilité. Une importante amélioration de la résistance du béton a été aussi enregistrée grâce à la réduction de la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'un béton maniable.

II. Les méthodes de mise en œuvre du béton

La mise en œuvre du béton est une opération très importante, dont dépendent en grande partie la réussite d'un ouvrage et sa pérennité dans le temps, le béton passe par différentes étapes:

II.1 Fabrication du béton

Le béton est fabriqué principalement par

➤ Des centrales à béton prêts à l'emploi –BPE- (le béton est livré dans ce cas à l'état frais sur les chantiers) ;

Les avantages apportés par la fabrication du béton en centrale BPE

✓ Les avantages techniques (suivi le caractéristique des matériaux grâce à des contrôles de laboratoire, qui permettent de s'assurer également de la conformité des constituants) ;

✓ Les avantages économiques (réduisant les investissements en matériel et en hommes. la ponctualité des livraisons et délais de réalisation courts);

✓ La simplification de l'organisation du chantier. [3]

Les inconvénients de la fabrication du béton en centrale BPE

✓ Le béton BPE ne peut pas être transporté pour une longue distance (moins de 20km en zone urbaine et 30km en zone semi-urbaine) ;

✓ Le temps de transport du BPE est très réduit (1h30 maximum) ;

✓ Après son arrivée sur le chantier, le temps de malaxage dans le camion est 30 minutes maximum ;

✓ Le matériel utilisé pour le transport du béton devra être fréquemment nettoyé. [3]

➤ Les produits préfabriqués en béton ;

Les avantages des produits préfabriqués en béton :

✓ La construction en béton préfabriqué est moins coûteuse ;

✓ C'est une construction solide et stable ;

✓ Les éléments en béton préfabriqué sont durables et respectueux de l'environnement.

Les inconvénients des produits préfabriqués en béton

✓ La limitation au niveau architectural, les possibilités de modifications futures, l'empreinte environnementale ;

- ✓ Le système de construction se prête beaucoup moins à une architecture plus classique et traditionnelle.
- des centrales à béton de chantier ;

Les avantages des centrales à béton de chantier :

- ✓ Le béton est malaxé sur chantier ;
- ✓ Le coût du transport est réduit ;
- ✓ La possibilité de production en continu 24 heures sur 24.

Les inconvénients des centrales à béton de chantier :

- ✓ La nécessité de contrôle périodique de la centrale à béton travaille automatiquement pour avoir le poids exact des matériaux utilisés.
- Pour les petits chantiers, le béton peut être fabriqué tout simplement dans des bétonnières ;

Les avantages de béton fabriqué dans des bétonnières :

- ✓ moins cher par rapport du béton de centrale lorsque vous n'avez besoin que de petites quantités de béton (autour de 1 à 2m³ maximum) ;
- ✓ elle est extrêmement simple d'utilisation (bouton marche / arrêt, démarrage Immédiat...).

Les inconvénients de béton fabriqué dans des bétonnières :

- ✓ Nécessite un endroit sec pour stocker la bétonnière au long de l'année ;
- ✓ Ne Permet de réaliser que des faibles quantités de béton ;
- ✓ Les quantités d'agrégats et d'eau utilisés lors du malaxage ne peuvent pas être exactes. [3]

Dans le cas de chantiers à grande ampleur, la bétonnière ne sera pas suffisante pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de la diversité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohésion.

II.2 Le coffrage

Sur chantier, les outils utilisés pour le moulage du béton sont les coffrages. Pour les ouvrages verticaux, tels que les murs et les voiles verticaux .Le coffrage a pour but de maintenir et de contenir le béton frais jusqu'à son durcissement et de lui conférer la forme souhaitée. Il y a deux types de coffrage très utilisés, les coffrages en bois sont parmi les premiers matériaux utilisés pour la réalisation de coffrages, Du fait de sa texture et de ses possibilités d'assemblage, et les coffrages métalliques se sont beaucoup développés en particulier dans le bâtiment. Ils permettent de rationaliser la mise en œuvre du béton.et la

phase de décoffrage d'un ouvrage ne doit intervenir qu'en fonction de la satisfaction de deux exigences principales suivantes :

- ✓ La résistance mécanique du béton ;
- ✓ La recherche de l'homogénéité de la teinte (fonction des variations des temps de coffrage et des conditions climatiques). [4]

II.3 Le bétonnage

Le béton doit être mis en place avant tout commencement de prise par des procédés lui conservant son homogénéité, Le bétonnage ne doit pas se faire à partir d'une, hauteur supérieure à 3.00 mètres dans le cas des éléments horizontaux de grandes surfaces (planchers radier. etc.), il est recommandé à ce que la hauteur de chute ne dépasse pas 80 cm. Pour la mise en place du béton par déversement de benne dans les murs et les poteaux de plus de 3.00 mètres de hauteur, la benne doit être prolongée par un tube afin de limiter la chute libre du béton.

II.3.1 Pathologies du bétonnage

+ Ségrégation

Si le ferrailage est dense sur une hauteur importante, il faut prévoir des goulottes pour conduire le béton jusqu'au fond de moule et éviter ainsi qu'il "cascade" à travers les armatures (risque grave de ségrégation).



Figure I-1: Ségrégation des éléments en béton armé

+ Bétonnage par temps froid

Lorsque la température mesurée sur chantier est inférieure à +5°C, la mise en place du béton n'est pas autorisée, les solutions appropriées par temps froid, il est indispensable :

- ✓ D'adapter la composition du béton : utilisation d'un accélérateur de prise et de durcissement ;
- ✓ D'apporter et de maintenir une quantité de chaleur au béton frais ;
- ✓ De maintenir les dispositions de protection en place au-delà des délais habituels ;
- ✓ De protéger les coffrages du froid ;
- ✓ D'éviter de bétonner en fin d'après-midi. [4]

Bétonnage par temps chaud

Il faut éviter par temps chaud (ambiance supérieure à 30°C) et sec (ambiance inférieure à 55% humidité), que le béton ne perde, du fait de l'évaporation, une proportion trop importante de son eau. Les précautions spéciales à prendre, pour le bétonnage par temps chaud, Il est préférable par temps très chaud (entre 30 et 40°C) de bétonner l'après-midi ou en fin de journée.[4]

Interruption et reprise de bétonnage

Les interruptions de bétonnages d'un élément de structure doivent être évitées autant que possible. S'il ne peut en être ainsi, des précautions doivent être prises pour assurer une bonne adhérence du béton nouveau sur le béton ancien ; il faut notamment repiquer et nettoyer à vif la surface de reprise pour y faire saillir les graviers, mouiller longuement et abondamment cette surface afin de saturer d'eau le béton ancien et, enfin éliminer l'eau en excès à l'air comprimé avant de reprendre le bétonnage.

Le Nettoyant Sikadur est un produit inflammable contenant des solvants aromatiques. Il doit être utilisé en extérieur. Les résines époxydiques et le durcisseur peuvent engendrer une irritation de la peau et des muqueuses.

Vibration des bétons

La vibration des bétons est obligatoire (sauf dans le cas des bétons auto-plaçant) pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques et, en particulier, une compacité maximale et des parements de qualité. La vibration appliquée au béton frais a pour fonction, en le fluidifiant, de favoriser l'arrangement optimal des grains qui sont les constituants du béton (gravillons, sables, fines ciments...). Les grains s'imbriquent les uns dans les autres et laissent le moins de vide possible entre eux, les plus fins s'insèrent entre les plus gros .la vibration permet un remplissage optimal des coffrages. La fréquence et la durée de vibration doivent être Adaptées à la composition du béton et aux caractéristiques de l'ouvrage. Il faut vibrer « ni trop, ni trop peu ».la durée de vibration est importante, car si elle est trop courte le béton est insuffisamment serré, si elle est trop longue, elle peut entraîner une ségrégation de ses constituants, une teinte de surface hétérogène, et une migration des gros granulats vers le bas. [4]



Figure I-2 : Vibration du béton au moment du coulage

Cure de béton

La cure doit commencer dès le début de la prise du béton, elle doit être poursuivie pendant une semaine dans les cas normaux et pendant dix jours en cas de temps très sec et chaud. La cure peut être effectuée, soit par humidification soit par enduit temporaire imperméable.

III. Association béton acier

III.1 L'acier

Le béton a une bonne résistance à la compression mais mauvaise résistance à la traction. Pour palier à cette insuffisance, on dispose dans la partie tendue des armatures. Les armatures pour béton armé sont généralement des assemblages de barres en acier à caractéristiques de forme, de résistance et de section bien déterminées il y'a deux types d'acier : Les Hautes Adhérences désignent les barres, les treillis soudés, ainsi que les fils, et les ronds lisses, l'absence d'aspérité sur leur surface réduit leur résistance mécanique. Ils sont principalement employés pour des aciers de levage. [5]

III.2 Béton armé

Le béton armé est un matériau composite, constitué de béton et d'acier. Le béton et l'acier sont associés en fonction de leurs qualités et de leurs coûts respectifs. Le béton résiste bien à la compression et mal à la traction. Il est moulable et permet la réalisation de formes complexes. Facile à mettre en œuvre et peu coûteux, le béton résiste assez bien au feu et aux intempéries. Il nécessite peu d'entretien. L'acier, très coûteux, résiste bien à la traction et à la compression. Le béton armé permet de réaliser des constructions monolithiques qui résistent bien aux effets dynamiques et d'exploitations. Nous calculerons les structures en béton armé à l'aide des règlements aux états limites.

III.3 Les raisons l'association béton /acier

- ✓ Le béton résiste bien à la compression ;
- ✓ L 'acier résiste bien à la traction ;
- ✓ L 'acier adhère au béton, ce qui permet la transmission des efforts d'un matériau à l'autre ;
- ✓ Il n'y a pas de réaction chimique entre l'acier et le béton et en plus le béton protège l'acier de la corrosion ;
- ✓ Le coefficient de dilatation des deux matériaux est pratiquement le même. [5]

III.4 L'adhérence

Dans les constructions du béton armé les efforts sont appliqués au béton et non pas aux aciers ceux-ci seront sollicités grâce à la liaison avec le béton. La transmission des efforts a lieu le long de la surface latérale des barres grâce au phénomène d'adhérence. L'adhérence désigne l'action des forces de liaisons qui s'opposent au glissement de barres suivant l'axe par rapport au béton qui l'entoure. [5]

III.4.1 Fonctions d'adhérence

✚ **Entraînement des barres** : L'association entre le béton et l'acier est efficace parce qu'il y a adhérence entre deux matériaux ; ce qui permet le transfert des efforts entre eux [8]

✚ **Ancrage des barres** : Appelé scellement, si la barre est trop courte, elle risque de s'arracher du béton sous l'effet de l'effort de traction. La barre doit être suffisamment longue pour être convenablement ancrée (scellée) et pour reprendre tous les efforts de traction. [8]

✚ **Distribution de la fissuration** : L'adhérence permet de répartir les fissures. Plus l'adhérence est grande (meilleure), plus le nombre de fissures augmente mais la largeur cumulée reste la même, donc l'adhérence évite la formation de grandes fissures concentrées. [5]

IV. La fissuration dans le béton

La fissure de béton est un phénomène courant que personne ne peut éviter. Sauf si le béton est bien conçu au départ et selon des règles de calcul établies. D'où l'importance des sélections meilleurs ouvriers locaux lors de vos travaux. En cas de problème, il faut vérifier le degré d'ouverture de la fissure et son côté préjudiciable ou non.

IV.1 Comment caractériser une fissure ?

Une fissure peut être caractérisée par 3 éléments :

- Ouverture : largeur entre lèvres qui peut être évaluée à l'œil nu et peut se mesurer avec précision à l'aide d'un fusiometre
- Trace : le développement de la fissure visible sur toutes les surfaces de la structure

- Profondeur : selon son caractère traversant ou non, la fissure peut être qualifiée de différente façon :

- Fissure de surface : fissure qui ne traverse pas l'épaisseur de la structure, l'ouverture dans ce cas est maximum en surface et nulle au sein du matériau ;

- Fissure traversant : fissure visible sur au moins 2 faces de la structure ;

- Fissure aveugle : fissure transvasant mais non accessible d'un ou plusieurs côtés de la structure.

Parmi les différents types de fissures, on distingue :

Faièncage

Le faièncage se développe en un réseau de microfissures de moins de 0,2 mm, à la différence de la microfissure de mur, le faièncage n'intéresse que la couche superficielle du revêtement. la maçonnerie reste intègre. Le faièncage n'est pas une conséquence d'un mouvement différentiel du sol sous un ouvrage [6]



Figure I-3 : Phénomène de Faièncage

Microfissure

La microfissure présente une ouverture linéaire inférieure à 0,2 mm, au tracé plus ou moins régulière. La microfissure du mouvement différentiel concerne toute l'épaisseur de l'ouvrage, le mur, la poutre en béton armé, la jonction entre les matériaux. [6]

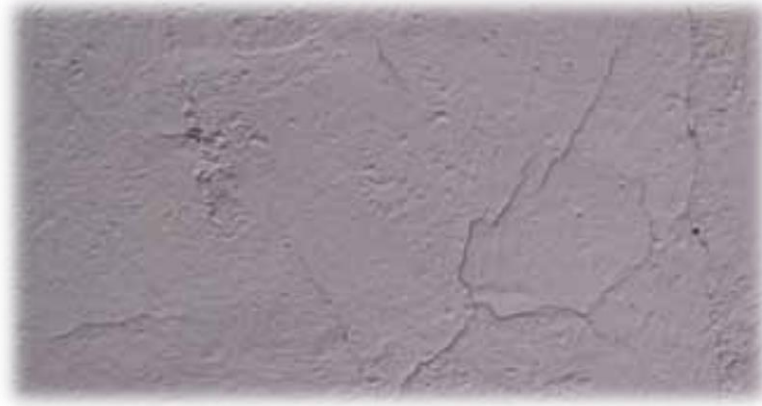


Figure I-4 : Microfissure

+ *Fissure*

La fissure se définit par une ouverture de 0,2 à 2 mm. Elle peut concerner toute l'épaisseur du mur.[6]



Figure I-5: Fissure

+ *Lézarde :*

Une ouverture supérieure à 2 mm. La mesure de l'évolution de la fissure s'effectue à l'aide d'une jauge.[6]

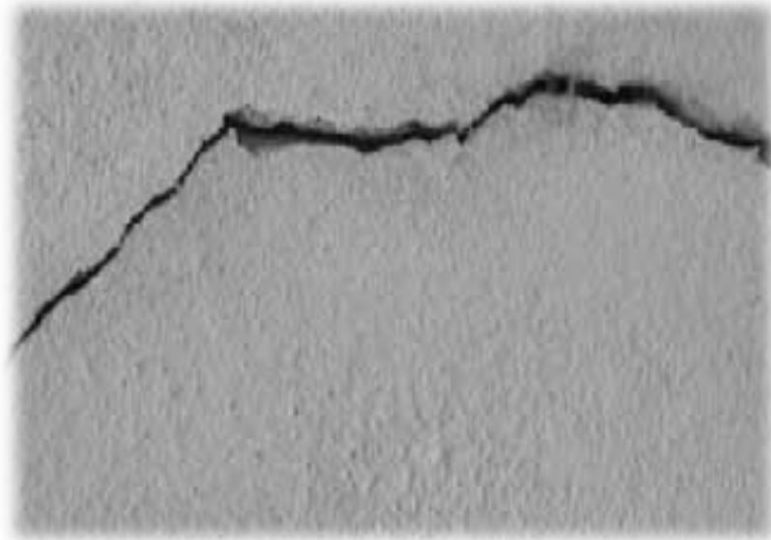


Figure I-6: Lézarde

IV.2 Evolution d'une fissure

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

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

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

✓ Les fissures actives ou évolutives, l'ouverture de la fissure varie dans le temps. Une faible variation de 0.2 à 0.4 mm pour origine les fluctuations de température jour-nuit et été – hiver ou une cause hydrométrique. Une forte amplitude de l'ouverture de la fissure, ou l'ouverture-fermeture, signifie que les facteurs de risques incidents sur les dommages sont toujours actifs. le souffle d'une fissure est l'amplitude de la variation à l'ouverture et la fermeture d'une fissure active.[7]

IV.3 Emplacement des différentes fissures

La figure ci-dessous est un exemple d'identification de l'emplacement de différents types de fissures sur un ouvrage en béton. [8]

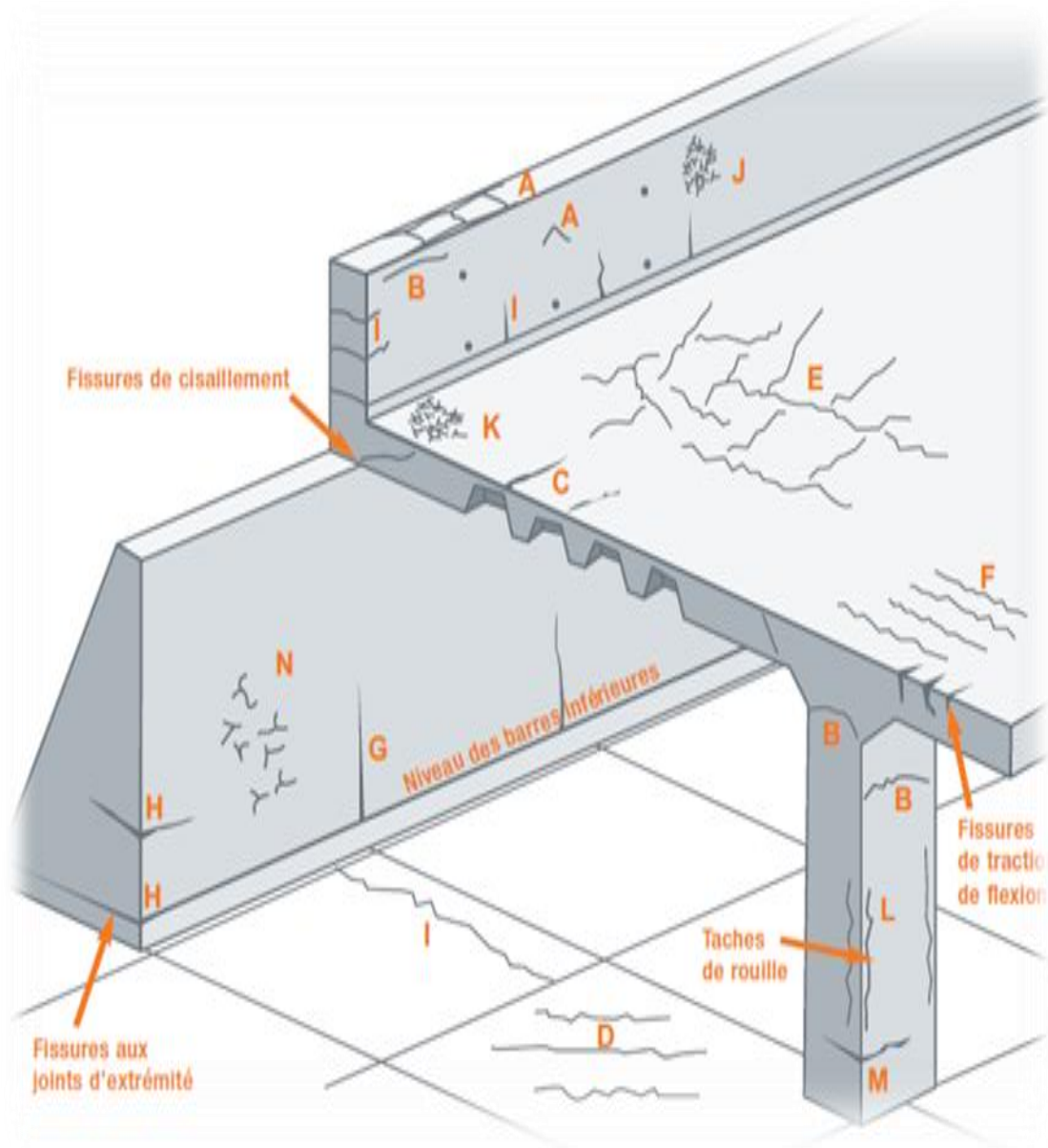


Figure I-7 : Emplacement de différents types des fissures sur un ouvrage en béton.
[8]

Chapitre I: Synthèse Bibliographique

Tableau 1: Description et types des fissures

Causes de fissures	Identification	Localisation Fréquentes	Causes Primaries	Causes Secondaires	Délai d'apparition	Prévention
Tassement plastique	A (au-dessus de l'armature)	Sections profondes	Resuage excessif	Séchage rapide à jeune âge	10 minutes à 3 heures	Réduire le resuage (air entraîné et vibration supplémentaire)
	B (en voûtes)	Sommet des colonnes				
	C (changement d'épaisseur)	Dalles ondulées Ou gaufrées				
Retrait plastique	D (diagonal)	Pavages et dalles	Séchage rapide à jeune âge	Faible taux de resuage	30 minutes à 6 heures	Améliorer la cure initiale L'ajout de fibres synthétiques (ne remplace pas la cure)
	E (aléatoire)	Dalles de béton armées				
	F (excès d'armatures)	Dalles de béton armées	Séchage rapide à jeune âge et armature près de la surface			
Retrait Thermique	G (retraits externes)	Murs épais	Chaleur d'hydratation élevée	Refroidissement rapide	1 à 2 jours ou 3 semaines	*Réduire la température du béton *Choix du liant *Isoler le coffrage
	H (retraits internes)	Dalles épaisses	Gradient excessif de température			
Retrait De séchage (hydraulique ou dessiccation)	I	Murs et dales minces	Joints inefficaces	Retrait excessif ou cure insuffisante	Plusieurs semaines ou plusieurs mois	Réduire la teneur en eau et améliorer la cure
Faiénçage	J (au contact des surfaces coffrées)	Surfaces très lisses	Coffrages imperméable	Cure Insuffisante	1 à 7 jours, parfois beaucoup plus tard	Améliorer la cure ou la finition
	K (surfaces finies)	Dalles	Talochage excessif ou carbonatation			
Corrosion des armatures	L (conditions environnementales normales)	Poutres et colonnes	Enrobage insuffisant	Béton de faible qualité	Plus de 2 ans	Éliminer les causes
	M causes (infiltration de chlorure de calcium)	Béton armé	Excès de chlorure de calcium			
Réaction Alcalis granulats	N	Présence d'humidité	Granulats réactifs combinés à un Ciment à haute teneur en alcalis		Plus de 5 Ans	Éliminer les causes
Retrait endogène	O	Au cœur et à la surface des éléments en BHP	Cure précoce à l'eau déficiente (80-90.% du retrait)		De quelques Heures à 28 j	Cure à l'eau précoce, prévoir des joints de retrait

IV.4 Causes de la fissuration

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

- ✓ Les causes dues aux propriétés des matériaux, par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant ;
- ✓ Les causes directes externes, notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité ;
- ✓ Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations;
- ✓ Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

✚ Causes physiques

Le retrait plastique : le retrait plastique se produit quand de l'eau de gâchage s'évapore d'un béton en phase plastique. Dès que l'eau de ressuage a disparu, le béton se dessèche à la surface. La pression dans les capillaires remplis d'eau baisse, provoquant une diminution du volume et le développement des contraintes de traction dans la masse durcissant qui peuvent entraîner des fissures.[9]



Figure I-8 : Retrait plastique

- **Les contraintes thermiques** : Cette contraction se manifeste, suivant les éléments de structure considérés, dans un laps de temps variant de quelques dizaines d'heures à quelques semaines après la mise en œuvre. du béton, la durée augmente avec la taille de la

pièce. On conçoit que, s'agissant d'un matériau en phase de durcissement, les contraintes mises en jeu seront beaucoup plus élevées pour le retrait plastique.

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

- **Cycle gel/ dégel** : Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. [11]

- **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. [9]

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

- **Vibration trop importante** : Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élançements du béton. [9]

- **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. [10]

✚ Causes chimiques

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



Figure I-9: Alcali-réaction du béton

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

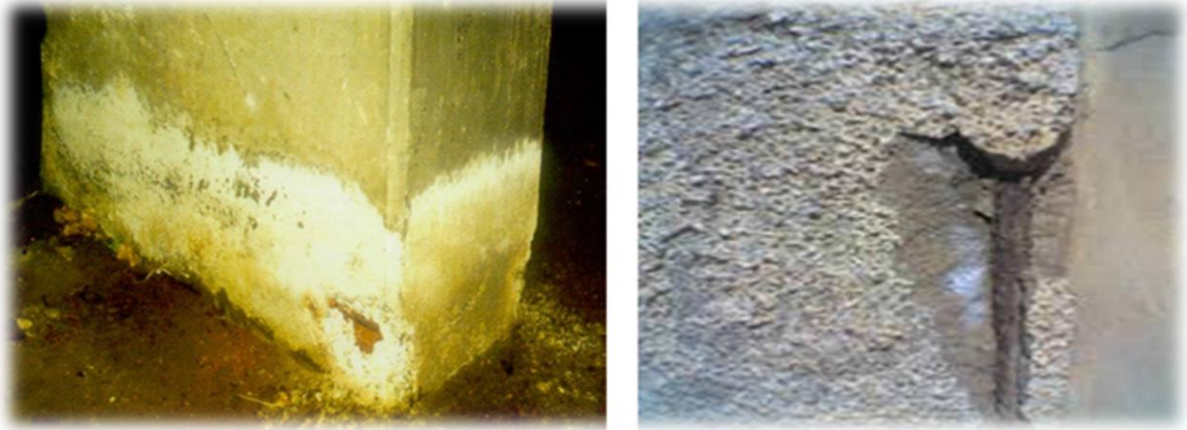


Figure I-10 : Réactions sulfatiques

IV.5 Corrosion des armatures par Carbonatation

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes. La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone de l'air et certains constituants du béton tel que la portlandite. La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau. La carbonatation entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'acier, censées garantir cette résistance, gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, les aciers sont alors mis à nu.[31]

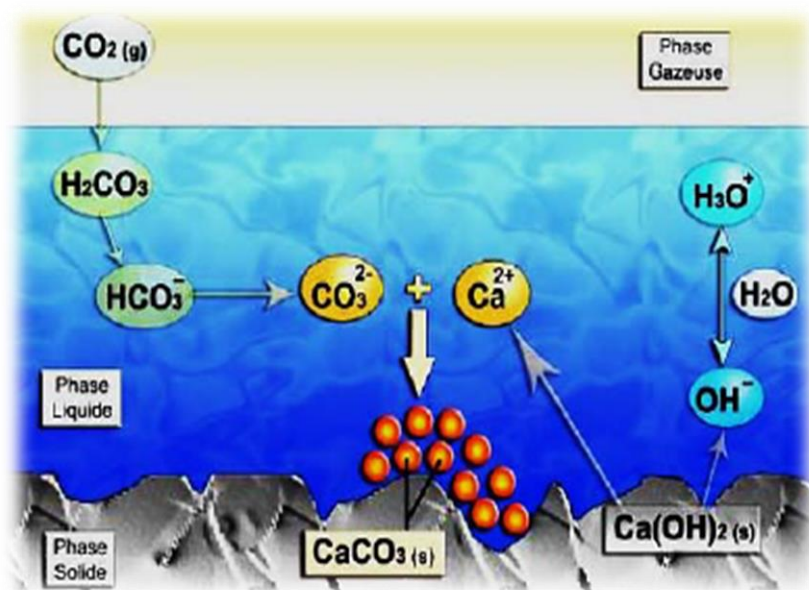


Figure I-11 : Présentation schématique de phénomène de la carbonatation [31]

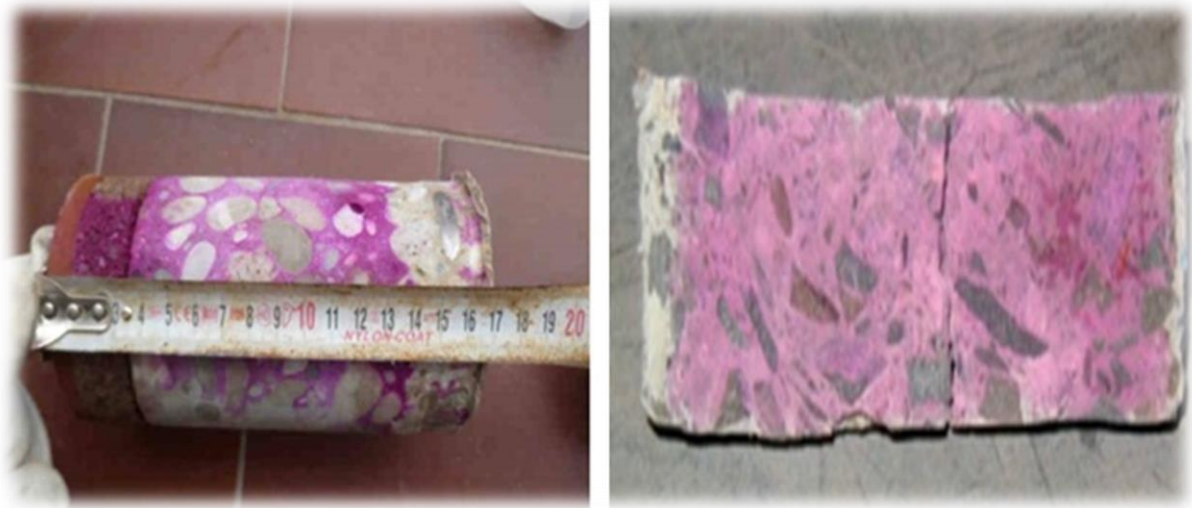


Figure I-12 : Profondeur de carbonatation

✚ Les facteurs qu'influencent à la carbonatation

Tableau 2 : Principaux facteurs qui influencent la vitesse de carbonatation du béton [31]

<i>Facteur</i>	<i>Influence</i>
E/C (eau/ciment)	Plus ce rapport est bas, plus la vitesse de carbonatation est faible
Dosage en ciment	Une augmentation de dosage se diminue la profondeur de carbonatation à un temps donné.
Types de ciment	Les bétons de ciment avec des constituant secondaires (laitier, cendres, volantes, pouzzolanes) se carbonatent plus rapidement sur les bétons au ciment portland.
Résistance à la compression	La vitesse de carbonatation diminuée si l'augmentation de résistance se traduit par une diminution de la porosité et une augmentation des produits.
Cure	Une bonne cure diminue la vitesse de carbonatation, car le béton sera plus compact et l'hydratation de ciment augmentée.
Humidité	Vitesse de carbonatation maximum pour une humidité compris entre 40% et 80%
Température	Une augmentation de la température augmenter la vitesse de carbonatation.

La corrosion de l'acier par carbonatation du béton est un phénomène de dégradation majeur des structures en béton armé, qui débute par le dioxyde de carbone se dilue dans l'eau contenue dans la structure poreuse du béton. Cette réaction permet à l'hydroxyde de calcium (portlandite) de se diluer à son tour dans l'eau interstitielle, de réagir avec le CO₂ et de précipiter sous forme de carbonate de calcium, ce qui fait baisser le pH de celle-ci à une valeur proche de 9, toutefois, cette réaction peut conduire à une dégradation due à la corrosion des armatures avec le temps.

IV.6 Corrosion

La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico-chimiques entre le matériau et son environnement entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération des propriétés mécaniques, électriques et esthétiques...etc.).[12]

✓ Il existe plusieurs types de corrosions :

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

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

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

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

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



Figure I- : Phénomène de Corrosion (ouvrage parking)

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton ci-dessous les facteurs prépondérants contribuant à la corrosion et on présente :

Facteurs d'influence :

Influence de l'enrobage

L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature. Parfois, la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures. [9]

Influence de l'humidité

L'effet du taux d'humidité, ou degré de saturation en eau, dans le béton est important car la vitesse de corrosion dépend fortement de ce taux, celui-ci influençant directement la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène. Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton augmente mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion. Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton n'augmente mais en contrepartie la diffusion de l'oxygène vers les armatures se fait de plus en plus difficilement. L'humidité relative la plus favorable à l'apparition de la corrosion est de 70 à 80%. [12]

Influence de la résistivité du béton

La résistivité électrique affecte de manière significative la corrosion des armatures puisqu'il existe une relation entre la corrosivité et la résistivité du béton. La résistivité du béton est fonction de la composition de la solution interstitielle, de la microstructure du béton (taille et distribution des pores), de l'humidité et de la teneur en sels ainsi que de la température. La valeur de la résistivité du béton se situe le plus souvent entre 103 et 107 ohm/centimètres.

Effet de l'oxygène

Dissous dans la solution interstitielle, l'oxygène est primordial dans la réaction cathodique du processus de corrosion des armatures dans le béton. Plus la teneur en oxygène n'est importante, plus la vitesse de dissolution de l'acier augmente. [13]

Autres agents agressifs

Des sels, contenus dans l'eau pénétrant le béton, peuvent contribuer à la formation de produits de corrosion sur l'acier. Ainsi, les ions sulfate agissent qualitativement comme les ions chlorures et certains sels solubles tels les perchlorates, les acétates, les halogénures autres que les chlorures peuvent aussi être corrosifs pour les armatures. [8]

V. Les moyens de prévention et remèdes des fissures dans le béton

V.1 Les moyens de prévention des fissures

La prévention des fissures, Pour mieux prémunir des désordres et améliorer, ainsi, la qualité de la construction, parmi les moyens de prévention des fissures nous citons quelques-uns.

✚ Réaliser une bonne reconnaissance de sol

Afin d'éviter tout risque de désordres sur la futur construction, notamment de fissuration, il est recommandé de faire réaliser une étude de sol. Cette étude a pour objectif d'adapter la construction envisagée aux caractéristiques du terrain et à sa nature, et pour éviter Le risque de tassement différentiel. Elle permet, en outre, de mettre en œuvre les fondations de la structure, en fonction des forces et faiblesses du sol.[14]

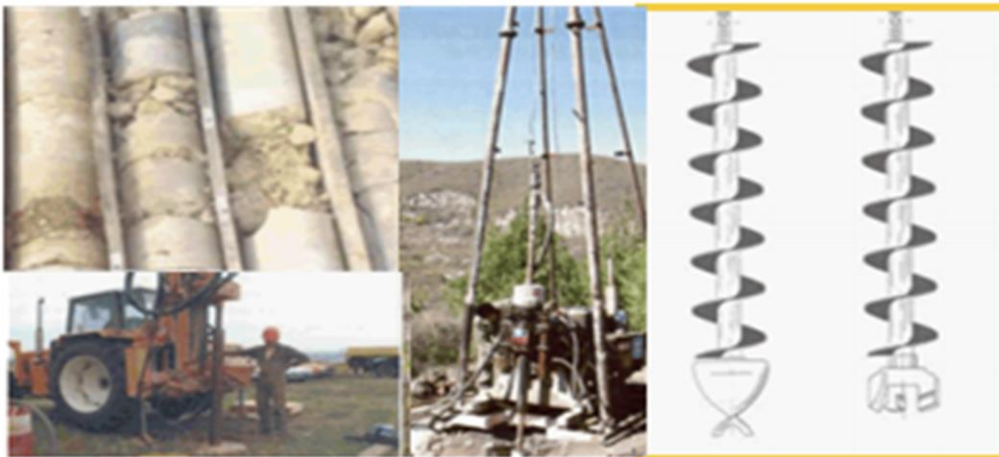


Figure I-14 : Sondages carottés

✚ Vérifier la conformité des fondations

Les fondations doit être ancré à une certaine profondeur, définie selon la nature du terrain et le climat. Si les fondations superficielles ne sont pas suffisamment enterrées, le risque de gel est d'autant plus élevé. L'insuffisance d'ancrage des fondations présente une véritable menace pour la stabilité de l'ouvrage dans son ensemble, car celles-ci ne peuvent assurer la répartition des descentes de charges, bien souvent pour cause de manque de rigidité. Des tensions risquent alors de se produire et d'engendrer la formation de fissures sur les fondations, mais aussi de désordres sur la structure. [14]

✚ *Eviter de construire en sous-sol partiel*

Des blocs de poids différents peuvent fissurer, Les désordres consécutifs à des tassements différentiels se situent aussi souvent à la jonction entre deux blocs de poids différents. Aussi et dans l'idéal, les fondations d'un bâtiment doivent être ancrées dans le sol à la même altitude. [14]

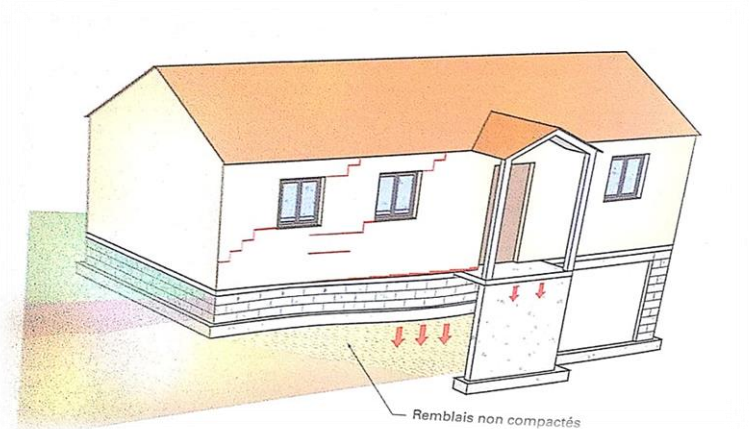


Figure I-15 : Construction en sous-sol partiel

✚ *Vérifier la présence de joints de dilatation et joints de rupture*

Le béton est un matériau quasi inerte. Les dimensions du béton armé sont cependant susceptibles de varier, de manière infime, en fonction des changements de température. Entre une maison et son extension, un joint de dilatation est nécessaire, afin d'éviter la fissuration de l'ouvrage. Ces joints de rupture sont à prévoir à la conception. Ils sont indispensables lorsque deux constructions contiguës présentent des charges différentes pour R+0 et R+1 et/ou que la couche de sol d'assise est différente. [14]

✚ *Eviter de construire en terrain argileux proche la végétation*

Les arbres auraient dû être coupés ou un écran anti-racine conçu et réalisé dès la construction lorsque la végétation ne respecte pas la distance de sécurité (D)

$D > H$: hauteur adulte pour un arbre et un arbuste seul

$D > 1.5H$: pour un groupe d'arbres ou d'arbustes.

Ainsi, une haie arbustive de 2,00m en limite de propriété doit être plantée à plus de 3,00m de toute construction, y compris les trottoirs et terrasses. [6]

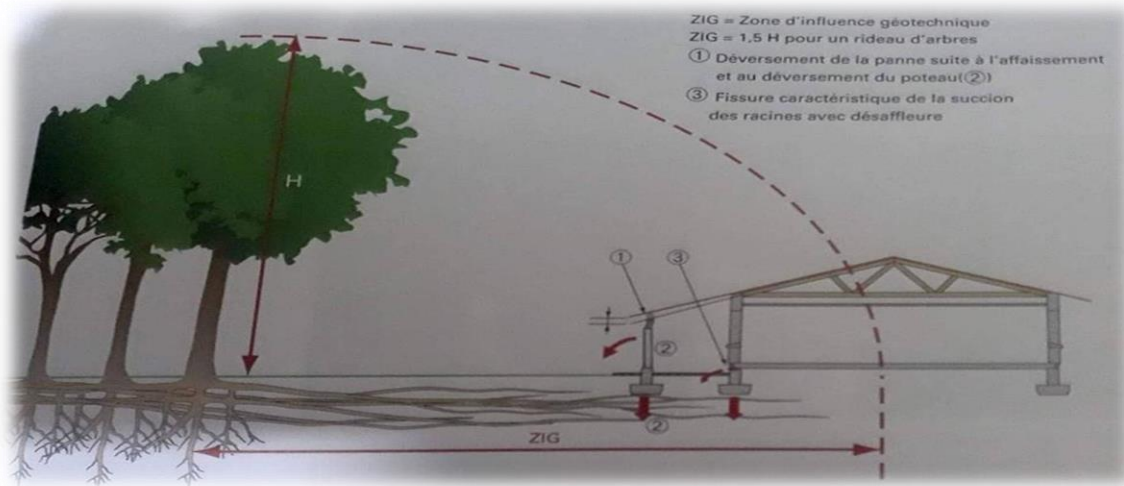


Figure I-16 : Construction en terrain argileux proche la végétation. [6]

V.2 Les moyens de réparation des fissures

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.

V.2.diagnostic :

V.2 .1 La démarche de diagnostic

a) Objectif

Ensemble des investigations nécessaires pour définir l'origine et l'étendue des désordres constatés.

Indispensable pour

- ✓ évaluer la gravité des désordres ;
- ✓ permettre la prise de décision ;
- ✓ mettre au point d'une solution de réparation durable.

b) Diagnostic

- ✓ Le pré-diagnostic : visite de l'ouvrage, analyse des archives et des résultats des rapports de surveillance ;
- ✓ Mise au point du programme d'évaluation approfondie :
 - Inspections ciblées,
 - Auscultation,
 - Prélèvements et analyse des matériaux en laboratoire
 - Instrumentation,
 - Calcul.

- ✓ Opération complexe, peu ou pas encadrée par des normes (existence de guides ou des méthodologies très spécialisées et nécessitant un matériel spécifique) ;
- ✓ existence de nombreux outils et techniques disponibles sur le marché.

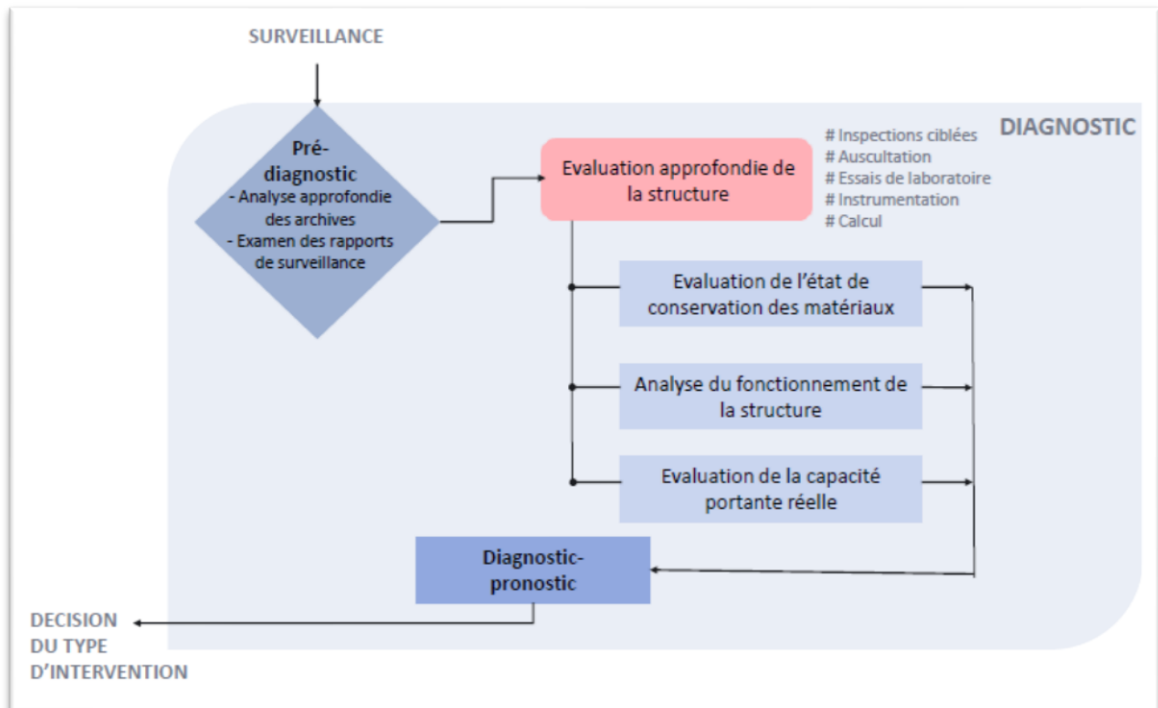


Figure I-17 : Schéma représentant la démarche de diagnostic

c) *Les opérations de diagnostic comprennent : les interventions sur site*

- ✓ **Relevé de désordres** : Typologie de fissuration (préjudiciable ou non, pathologique et/ou pathogène, structurelle ou non...);



Figure I-18 : Fissure oblique au niveau d'un mur

- ✓ **Sondages de reconnaissance.**
- ✓ **Prélèvements d'échantillons** : carottage, poudres, fragments de coulis, armatures,
- ✓ **Mesures semi-destructives**
 - essai à l'arbalète ;
 - mesures de potentiel de corrosion des armatures ;
 - mesures de vitesse de corrosion des armatures.
- ✓ **Mesures non-destructive**
 - estimation de la résistance du béton, cohésion, homogénéité
 - mesure de la cohésion de surface ou de l'adhérence d'un revêtement (SATEC)
 - enrobage des armatures (Phacomètre, géo-radar)
 - recherche de vides ou de câbles de précontrainte (géo-radar)
 - mesures de résistivité du béton
 - gammagraphie [15]

V.2 .2 Préparation du surfaces

✚ **Dégagement des armatures**

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion. S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage). Pour être sûr d'une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant selon AFNOR :

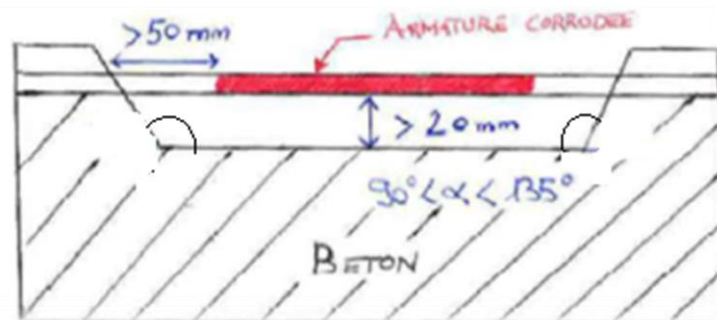


Figure I-19 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et saillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure. Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

V.3 Méthodes de réparations :

V.3.1 Le ragréage

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation. Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées, On choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier. [16]

- **Mode opératoire :**

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

- ✓ Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant ;
- ✓ Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer ;
- ✓ L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produits choisit entre 2 et 100 mm (indiqués par le fournisseur) ;
- ✓ Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge.



Figure I-20 : Application du mortier et Finissage par taloche.

Le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ Tenue verticale sans coffrage ;
- ✓ Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support;
- ✓ Adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support ;
- ✓ Imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs;
- ✓ Coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support ;
- ✓ Bonne protection des aciers. [16]

V.3.2 Projection

Lorsque les surfaces de béton à réparer sont importantes, la méthode du béton projeté est une option souvent utilisée. Puisque ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.

- **Technique de projection**

Projeté avec une force assez importante, le béton se place et se compacte au même instant, ce qui le diffère du béton conventionnellement coulé et ensuite vibré. Ce procédé permet de produire un béton plus dense, homogène et imperméable, ayant une surépaisseur moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques. La résistance en compression du béton projeté a, selon la norme NBN EN 14487-1, un minimum de 40 Mpa. Il existe principalement deux techniques de projection du béton suivant le moment d'introduction de l'eau de gâchage dans la chaîne. En projetant par voie humide, le béton gâché est pompé jusqu'à la lance, alors que par voie sèche le mélange de ciment et de granulats, sans l'eau, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau s'ajoute en bout de lance. Différentes méthodes vont présenter de différents résultats. Par voie sèche, le rapport E/C est évidemment plus faible, on obtiendra alors une résistance plus élevée que par voie humide. Mais on aura un dégagement de poussière plus important et un risque de détérioration d'un support fragile. [17]

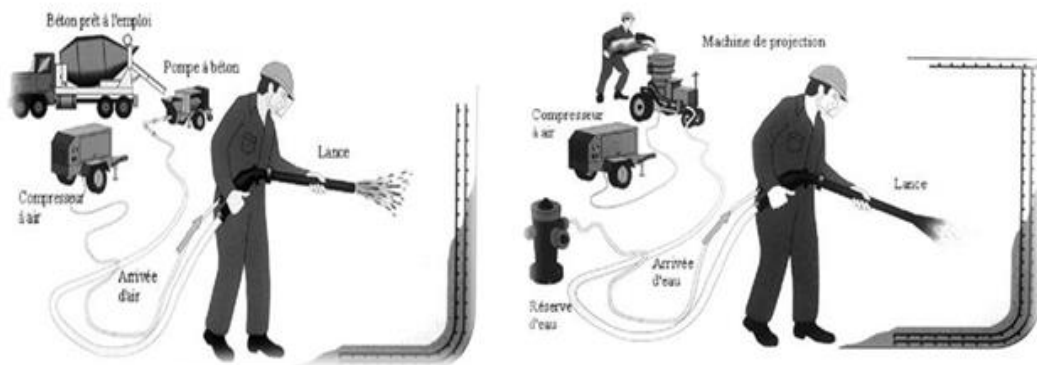


Figure I-21 : Projection par voie humide et sèche

V.3.3 Renforcement par matériau composite :

- ✚ **Tissus de fibres de carbone**

Les matériaux composites constitués de fibres dans une résine polymère, également connu sous le nom de polymères renforcés de fibres (PRF), ont apparue comme une alternative aux matériaux et techniques traditionnelles. [18]

- **Mode opératoire**

Cette technique est intéressante dans le cas de perte de section d'acier importante, et quand la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter. Cette méthode consiste à coller des bandes de toile de fibres de carbone aux surfaces déficientes. Les étapes d'applications suivantes sont nécessaires :

- ✓ Une préparation de la surface par jet de sable ou de l'eau doit être effectuée pour exposer les surfaces des agrégats fins;
- ✓ Effectuer des tests d'arrachements (un procédé, à proximité de la surface, dans lequel un disque circulaire en acier est collé à la surface du béton avec une résine époxy ou polyester. La force nécessaire pour tirer de ce disque à partir de la surface, avec une couche de béton fixé, est mesurée);
- ✓ Mesurer la régularité ou la planéité de la surface préparée;
- ✓ Un adhésif structural est appliqué à la fois au carbone et à la surface du béton;
- ✓ Le tissu est soigneusement positionné et pressé en place en utilisant un rouleau en caoutchouc dur pour obtenir une épaisseur de ligne de liaison entre 2mm à 3mm. L'adhésif en excès est ensuite essuyé sur les côtés avant qu'il puisse durcir;
- ✓ Pour faciliter l'inspection de contrôle de qualité, des plaques de test adjacentes à la zone en cours de renforcement doivent être préparés simultanément à chacune des opérations ci-dessus. Un test d'arrachement peut alors être effectué pour valider une installation correcte.[18]



Figure I-22 : Feuille de polymère renforcé de fibres de carbone

V.3.4 Traitement des fissures

a. Injection

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

permet 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. et en plus on a une injection du sol qui consiste à combler par injection sous pression les vides ou fissures du sol afin d'augmenter sa résistance à la compression. [19]

b. 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. [19]

c. Colmatage

Il a pour but l'obturation d'une fissure, vide, interstice ou joint par un remplissage partiel au moyen d'une injection ou de toute autre méthode sur une certaine profondeur et sans élargissement. [19]

d. Calfeutrement

Il a pour but de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple (mastic ou mortier) après élargissement par une saignée afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau mais sans bloquer les mouvements de la fissure. [19]



Figure I-23 : Calfeutrement des fissures



Figure I-24 : Calfeutrement d'une fissure à l'aide d'un mastic

e. Pontage et protection localisée

Consiste à recouvrir en surface des fissures actives ou non pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures) tout en les laissant libres leurs mouvements. Il doit permettre, si nécessaire, la mise en œuvre d'un revêtement de finition. Il s'applique donc aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure. Il est bien adapté, par exemple, à certaines fissures des balcons d'habitation quand elles ne compromettent pas la stabilité de ceux-ci.[19]

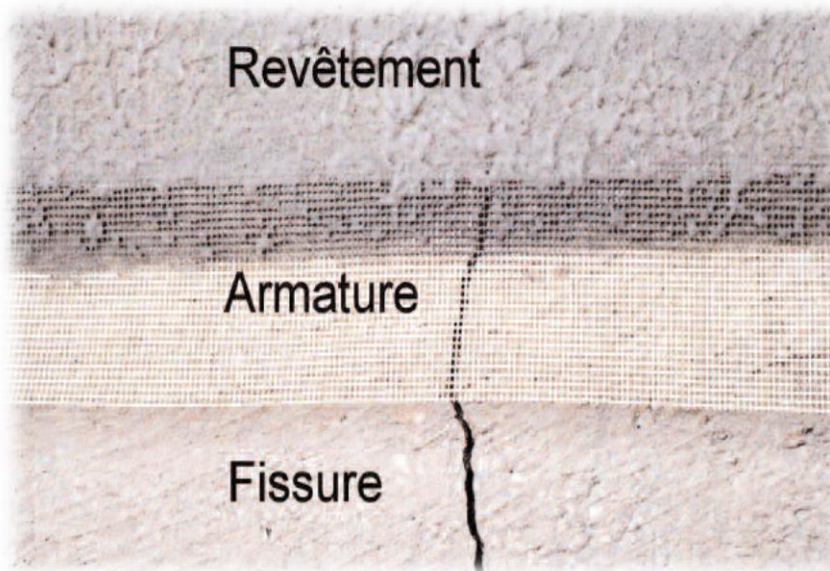


Figure I-25 : Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature

f. Protection généralisée

Cette technique, consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure non fissurée ou fissurée, sous réserve que les fissures n'engagent pas la résistance de la structure, un revêtement qui ferme les fissures et qui peut remplir d'autres rôles, tels que :

- ✓ la protection contre les pénétrations (eau, gaz, agents agressifs...);
- ✓ la protection contre des actions physiques (abrasion, érosion, gel/dégel...);
- ✓ l'aspect,
- ✓ etc.

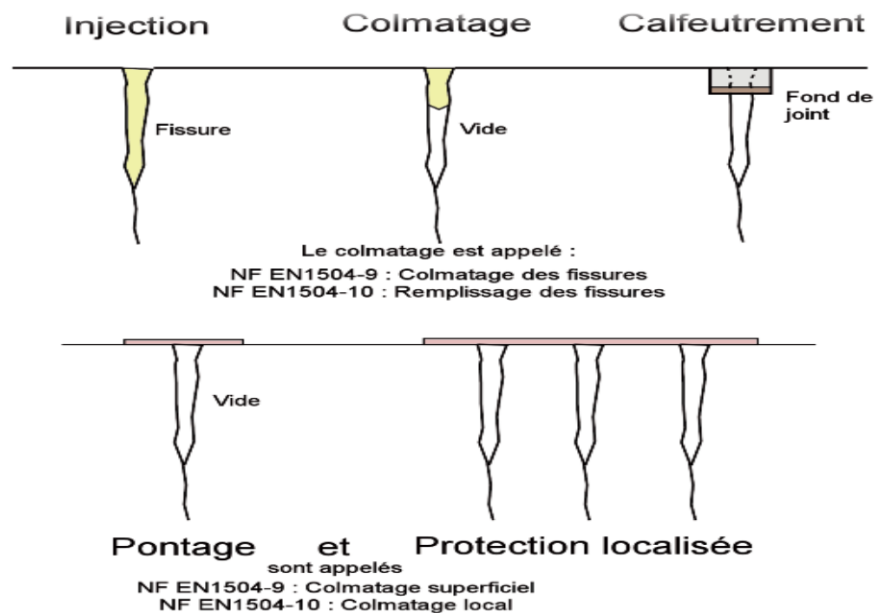


Figure I-26 : Les différents traitements des fissures

V.3.5 Réparation et renforcement des structures

✚ Renforcement des structures par des armatures passives additionnelles

Les techniques de réparation et de renforcement de structures par des armatures passives additionnelles concernent la mise en œuvre :

- ✓ d'armatures de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier au carbone ou en inox) ou en matériaux composites au sein de l'ouvrage après enlèvement local du béton par réalisation d'une saignée qui est ensuite rebouchée ;
- ✓ d'armatures de béton armé en métal ou en matériaux composites en surface du béton autour de la partie d'ouvrage existante et liées à celle-ci puis enrobées par un ajout de béton coulé, projeté ou contrecollé ;
- ✓ de plaques (bandes, lamelles) ou de tissus en matériaux composites collés à la surface du béton ;

✓ de tôles et plats collés de faibles épaisseurs (3 à 5 mm) découpées en bande de faible largeur (300 à 500 mm) et collées sur le béton par une résine époxydique (technique quasiment plus utilisée).

La réparation d'armatures passives intérieures au béton consiste à enlever le béton endommagé ou pollué et à dégager les armatures longitudinales ou transversales corrodées. Après préparation du support (nettoyage, aspiration soufflage, repiquage du béton, élimination des poussières et morceaux de béton et ragréage éventuel) et des armatures (décapage complet des armatures corrodées, par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous pression, le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le recouvrement des barres), les nouvelles armatures sont mises en place en respectant les dispositions constructives habituelles. Le raccordement des armatures est assuré par recouvrement, par soudure ou raboutage. [20]

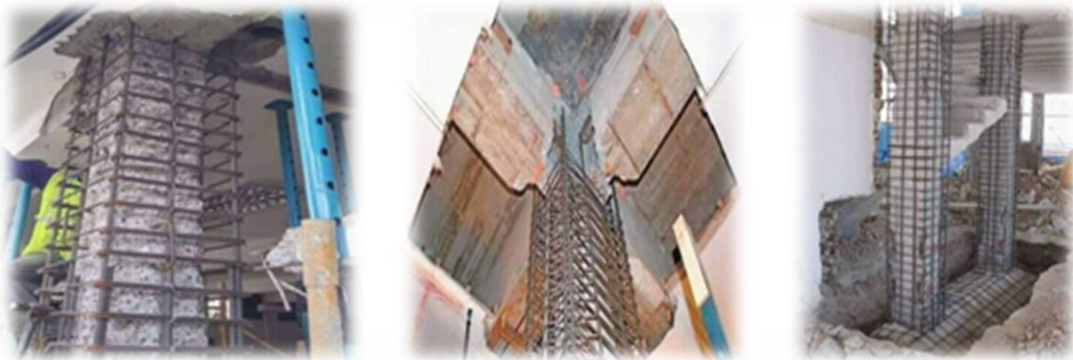


Figure I-27 : Renforcement des poteaux

✚ Renforcement des structures par précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Cette technique permet :

- ✓ soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- ✓ soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- ✓ Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités).

La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière.[21]

Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites

Les techniques de renforcement des structures au moyen de matériaux composites utilisent le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe in situ de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...). Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés. Elle permet :

- ✓ d'augmenter la résistance de structures dégradées, endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'exécution afin de prolonger leur durée d'utilisation ;
- ✓ d'adapter la structure à des modifications de ses conditions d'exploitation ou d'accroître sa capacité portante.

Ces techniques permettent :

- ✓ l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant ou vis-à-vis de la flexion de poutres ;
- ✓ le renforcement de structures en cas de modification des charges d'exploitation, de changement de système statique, d'insuffisance d'armatures ou de capacité portante ou de défaut d'exécution ;
- ✓ le renforcement parasismique de structures pour les adapter aux évolutions normatives ;
- ✓ l'augmentation de la résistance et de la rigidité de structures en béton ;
- ✓ le confinement de poteaux, de colonnes ou de piles ;
- ✓ le renforcement de structures lors de la création d'ouvertures ou de trémies.[22]

V.2 .5 Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures

Le béton est généralement associé à des armatures (en acier au carbone), ce qui permet d'augmenter sa résistance en traction et en flexion, d'où le terme de béton armé. Dans un béton sain offrant un environnement basique les armatures sont naturellement passivées. Les armatures proches de la surface protégées par le béton d'enrobage peuvent être soumises, au cours de la vie de l'ouvrage, à un phénomène de corrosion. De nombreuses solutions de réparation du béton armé dégradé par corrosion des armatures sont disponibles. Elles permettent de réparer durablement le parement en béton et évitent de nouveaux désordres. Pour chaque ouvrage, le choix de la solution adoptée sera fonction en particulier du processus de dégradation (carbonatation, chlorure...), du niveau de propagation de la corrosion, des caractéristiques du béton et des agressions du milieu environnant. La pérennité de la

réparation suppose une réalisation soignée et des contrôles réguliers tout au long de la vie de l'ouvrage.

Il existe 3 familles de techniques :

- ✓ la réparation traditionnelle : remplacement du béton carbonaté ou pollué par les chlorures et des armatures corrodées ;
- ✓ les traitements électrochimiques : protection cathodique, protection galvanique, ré alcalinisation, déchlorurassions ;
- ✓ la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion depuis la surface du béton. [23]

Conclusion

On conclut à partir de l'étude de ce chapitre les différents types des fissures et les causes de ces fissures plus les moyens des préventions des fissures qui permet d'éviter ou diminue le pourcentage des fissures ainsi nous avons vu les différentes méthodes de réparation et de renforcement 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 voire de pouvoir reprendre un supplément de charge si cela s'avère nécessaire pour que l'ouvrage réponde aux attentes et à l'évolution des besoins des utilisateurs ou des propriétaires.

Chapitre II

Méthodes et moyens d'investigation

Introduction

Dans ce chapitre on présente les méthodes et les moyens d'investigations des cas pathologiques qui peuvent se présenter dans le domaine de la construction .De plus ce chapitre concerne aussi certaine choix des méthodes de diagnostic ainsi qu'une présentation des appareils de mesure de dégradation.

II.1 Choix des investigations

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

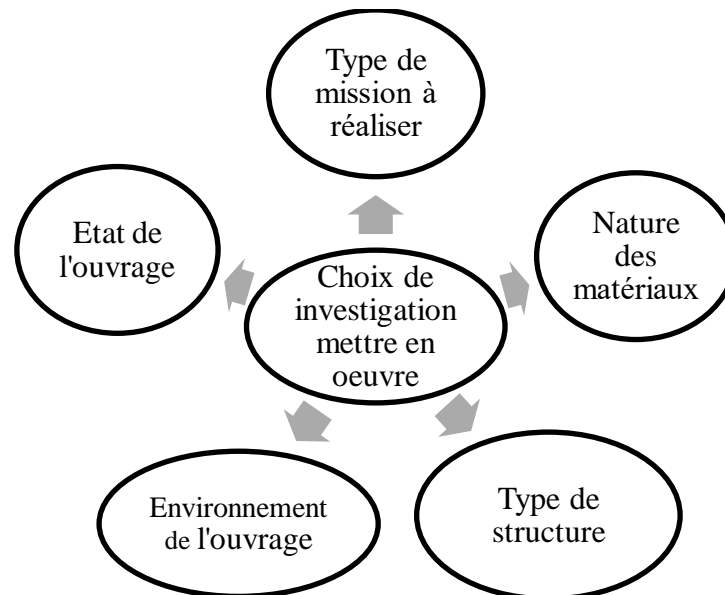


Figure II-1 : Schéma du choix d'investigation

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

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

- ✓ Une inspection de l'ouvrage ;
- ✓ Un diagnostic ;
- ✓ Un diagnostic approfondi ;
- ✓ Un suivi d'ouvrage.

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

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

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

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

- De l'état de l'ouvrage : Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures. Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage. [9]

II.2 Types investigations

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives.

II.2.1 Investigations non-destructives

Ces méthodes permettent d'analyser la structure sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différentes structures, tels que les monuments ou bâtiments historiques, où il est difficile de pouvoir prendre des échantillons de la structure pour la caractériser. Ces méthodes sont également en faveur dans le cas où la structure est atteinte et affaibli, l'échantillonnage de ce type de structure pourrait l'affaiblir d'avantage.[12]

II.2.1.1 Relevé visuel

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de 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 la différente pathologie présente 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 chlorures 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 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 fissure-mètre (réglette en plastique transparente munie de traits de largeurs calibrées que l'on place successivement sur la fissure à observer pour estimer sa largeur) ;
- Le nécessaire pour prendre des notes ;

Cette première étape permet de définir la gravité des pathologies, mais aussi de classer les différents éléments en fonction de la priorité auxquels ils doivent être réparés. L'investigation visuelle permet aussi de prévoir quels sont les autres moyens de diagnostic les plus adaptés à mettre en œuvre afin de répondre pleinement à la problématique. Ces investigations complémentaires ont pour but de préciser les désordres observés lors du relevé visuel, mais aussi de recueillir des informations complémentaires concernant leur constitution ainsi que leur état. [9]



Figure II-2 : Mesure d'une fissure à l'aide d'un fissure-mètre

II.2.1.2 Le relevé du ferrailage

Le relevé du ferrailage peut se faire à l'aide d'un phacomètre. Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif. Il permet de déterminer la position exacte des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

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

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

Le schéma ci-dessous montre la réponse obtenue selon la densité d'armatures, avec à droite une seule armature, au milieu trois armatures relativement espacées et à gauche trois armatures rapprochées. [24]

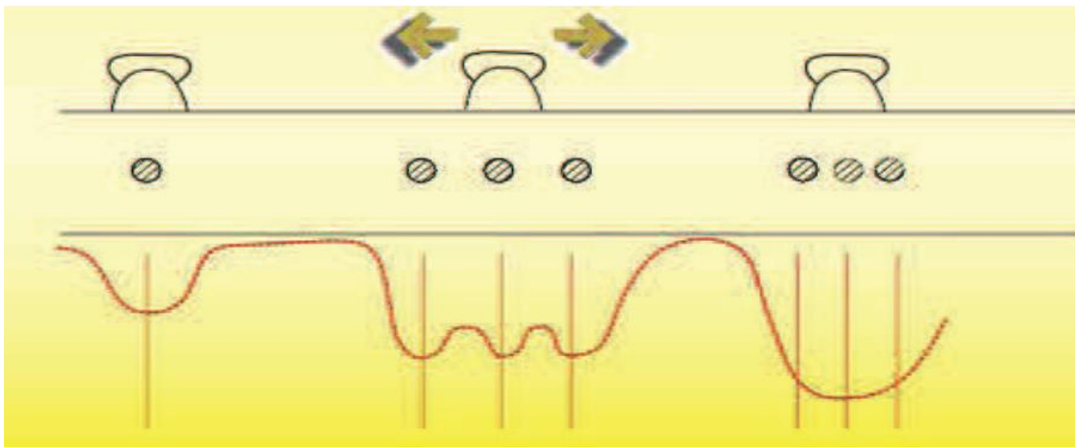


Figure II-3 : Représentation schématique de réponse en fonction de la densité d'armature [25]

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

- La détection par lignes
- La détection par fenêtres

La première méthode consiste à déplacer l'appareil perpendiculairement aux armatures que l'on souhaite détecter. La détection par lignes est très intéressante pour les éléments longs sur lesquels on souhaite avoir une vision globale du ferrailage. En effet, les détections

peuvent aller jusqu'à quarante mètres de longueur. Ce type de mesure permet d'obtenir les variations d'espacement des armatures ainsi que les enrobages correspondants.

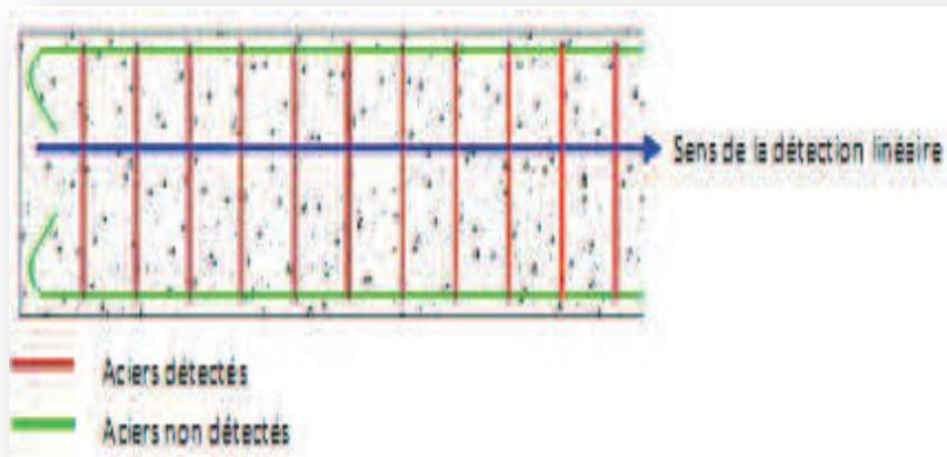


Figure II-4 : Schéma qui représenté le Principe de la détection linéaire [24]

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

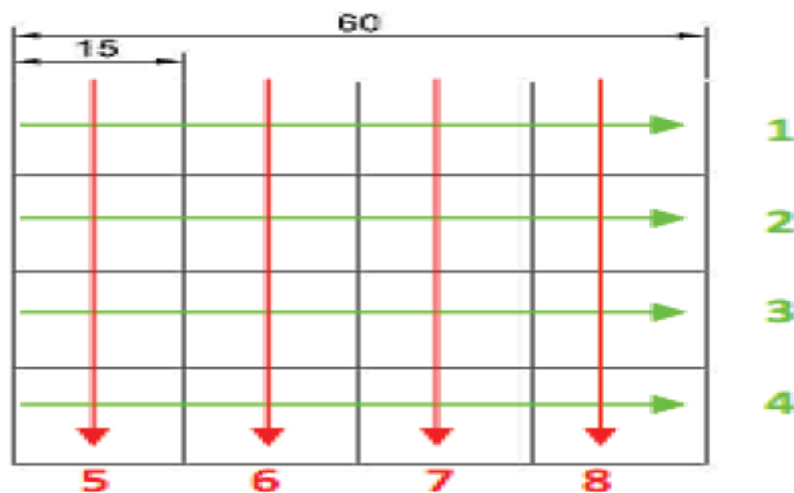


Figure II-5 : Principe de détection par fenêtre [24]

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

Cela trouve toute son utilité pour voir le clavetage d'une poutre à un poteau par exemple.



Figure II-6 : Détection des armatures d'un balcon

II.2.1.3 Le scléromètre

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur. Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérométrique de l'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément considéré. [12]

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



Figure II-7 : Scléromètre de notre laboratoire

II.2.1.4 L'auscultation sonique

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

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

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

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

✓ Les mesures de surface : cette méthode s'effectue principalement lorsqu'une seule des faces de l'élément est accessible lors des investigations. Elle peut aussi être utilisée pour déterminer la profondeur d'une fissure ou bien la présence de couches multiples dans un même élément. Pour réaliser cette mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à ausculter. L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure. Il est à noter qu'il existe une règle conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées. [26]

Tableau 3: Les résultats - sur l'auscultation sonique des bétons :

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



Figure II-8 : Appareils d'auscultation sonore de notre laboratoire

II.2.2 Investigations destructives

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaître ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaître leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies. Parmi les investigations destructives, on recense principalement les techniques suivantes :

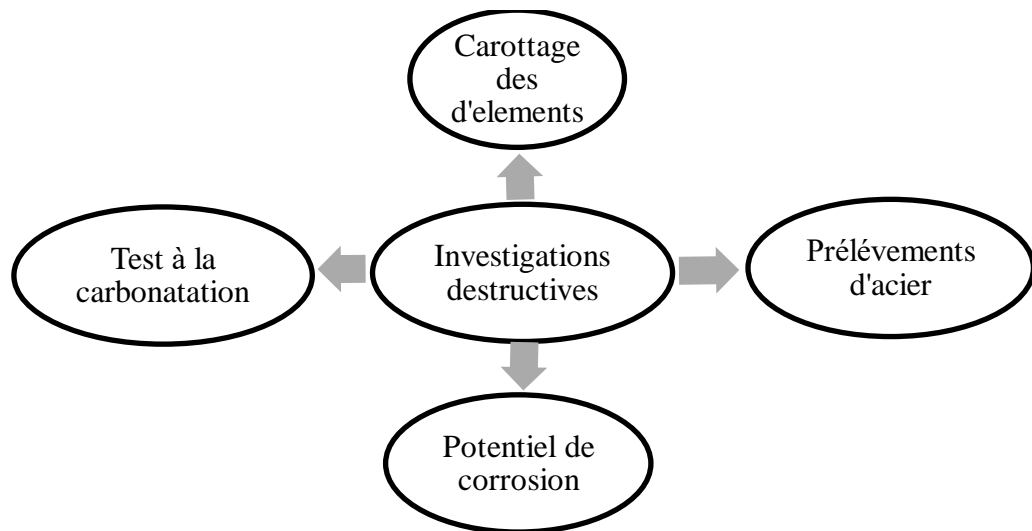


Figure II-9: Schéma présente les investigations destructives

II.2.2.1 Carottage d'éléments en béton armé

Le recours au carottage du béton armé peut avoir plusieurs objectifs. Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur le sol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage. Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi des analyses chimiques et

microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,...). La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour «l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton». La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton. Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferrailage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.[9]



Figure II-10 : Carotteuse manuelle du sol de notre laboratoire

II.2.2.2 Prélèvements d'aciers

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcul d'une structure est 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 exploité afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.[18]



Figure II-11 : Prélèvements d'aciers

II.2.2.3 Potentiel de corrosion

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

Le principe de la mesure du potentiel de corrosion est de mettre à nu une armature puis de la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance. Une électrode de référence est placée sur le parement, elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre. Elle est dite de référence, car elle a un potentiel constant dû à un équilibre électrochimique. Il est important de veiller à ce que la jonction entre le béton et l'électrode soit humide afin d'établir une conduction électrique. Cela permet de diminuer la résistance entre l'électrode de référence et le béton ainsi que le potentiel de jonction entre l'électrolyte contenu dans l'électrode de référence et la solution interstitielle du béton.

Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence.[13]

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

- Si $E > -200$ mV alors la corrosion est peu probable (probabilité inférieure à 10%)
- Si $-350 < E < -200$ mV alors la corrosion est possible (probabilité de 50%)

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

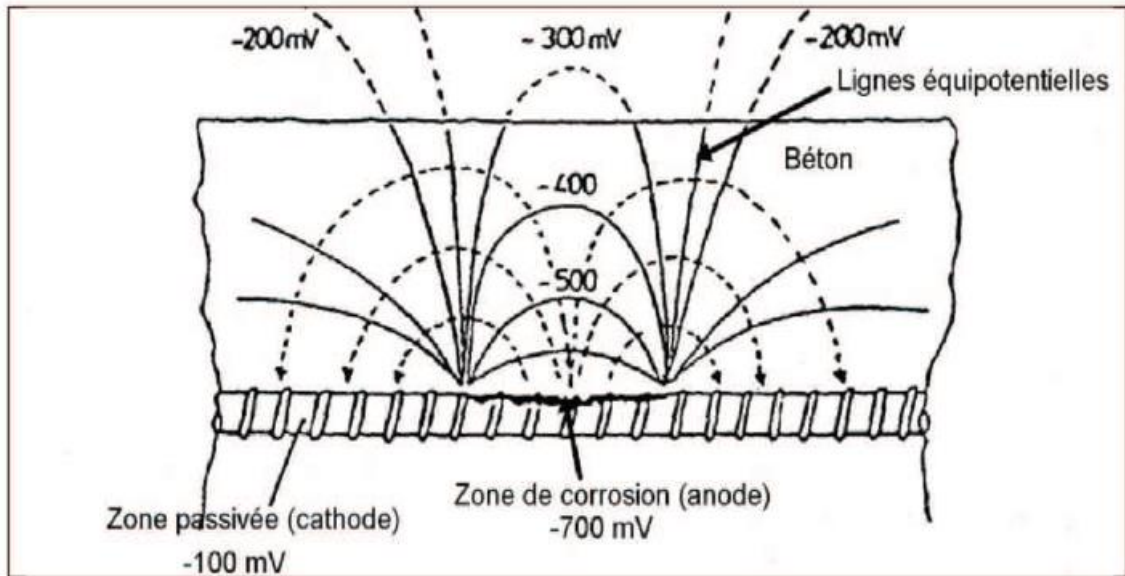


Figure II-12 : Principe du potentiel de corrosion [13]

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

- L'hygrométrie de surface, il peut y avoir une diminution de 100 mV entre une mesure sur surface humide et une mesure quand c'est sec
- Pour des milieux agressifs comme la présence de chlorures, la conductivité est augmentée et les potentiels sont plus négatifs
- Lorsque le béton est carbonaté, les potentiels sont plus positifs.

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

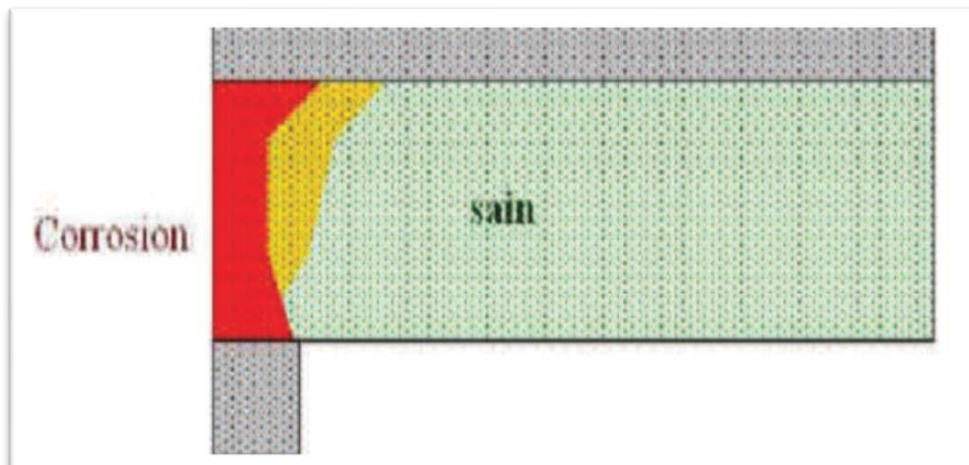


Figure II-13 : Cartographie du potentiel de corrosion



Figure II-14 : Mesure du potentiel de corrosion

II.2.2.4 Test à la carbonatation

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

La phénolphthaléine est un composé organique de formule $C_{20}H_{14}O_4$. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonnée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique).

La couleur que prend la phénolphthaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage. Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphthaléine, si la phénolphthaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphthaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées. [27]

Il peut s'avérer intéressant de coupler les mesures de profondeur de carbonatation avec les mesures d'enrobages données par exemple avec un phacomètre de type Ferroskan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type donné par la figure II-15 :

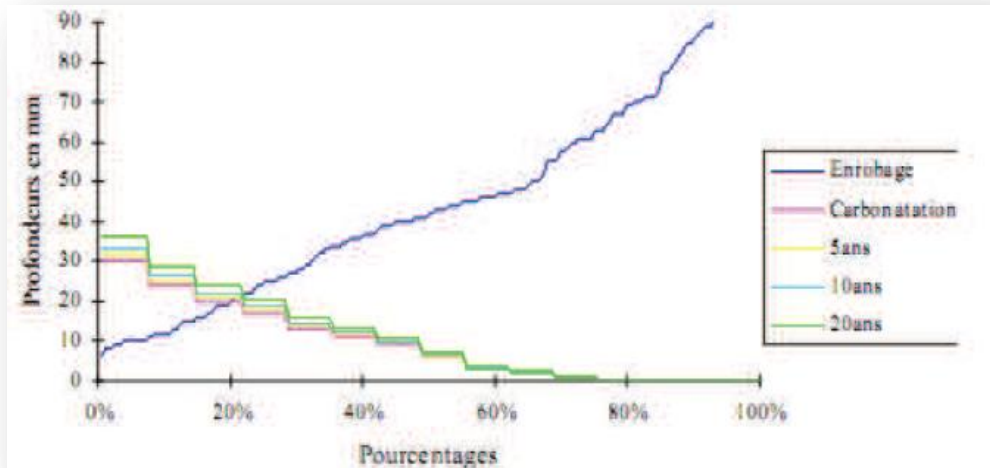


Figure II-15 : Graphique enrobage-carbonatation [27]

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



Figure II-16 : le phacomètre [31]

II.2.3 Méthodes numériques des investigations

Il existe de nombreuses méthodes d'investigation différentes selon les utilisations qui sont utilisées. Les recherches du domaine de l'investigation ont atteint des méthodes numériques programmées ou des autres méthodes chimiques électroniques etc. ..., parmi ces méthodes :

II.2.3.1 Caractérisation de la fissuration du béton lors d'essais en laboratoire en utilisant le traitement d'image

L'évolution du type de fissure au cours des essais en laboratoire est très importante pour bien caractériser la réponse de l'échantillon. Cela se fait généralement à la main. Ainsi il y'a une méthode innovante appelée «MCRACK» est introduite, visant à caractériser automatiquement la fissuration à l'aide du traitement d'image numérique. Tout d'abord, MCRACK est testé sur une règle de largeur de fissure. Il est conclu que "MCRACK" donne une augmentation considérable des données, avec une fiabilité accrue, automatiquement traitée et à un temps de travail considérablement réduit. Les principales étapes de cette nouvelle méthode, «MCRACK», sont résumées ci-dessous :

- La première étape comprend la préparation de la surface de l'éprouvette qui est peinte en blanc afin d'améliorer l'apparence des fissures et la mise en place de règles de largeur de fissure (CWR) afin d'obtenir la précision ;
- les images sont acquises à l'étape 2 avec une caméra numérique à faible coût placée orthogonalement à la surface de l'échantillon, afin de minimiser la distorsion de l'image, en utilisant une approche image unique ;
- L'étape 3 utilise une zone d'intérêt globale (GROI), qui est une fenêtre définie par l'utilisateur pour surveiller la surface du spécimen. Pour chaque étape, une image binaire est générée qui améliore les discontinuités à la surface de l'échantillon. [28]

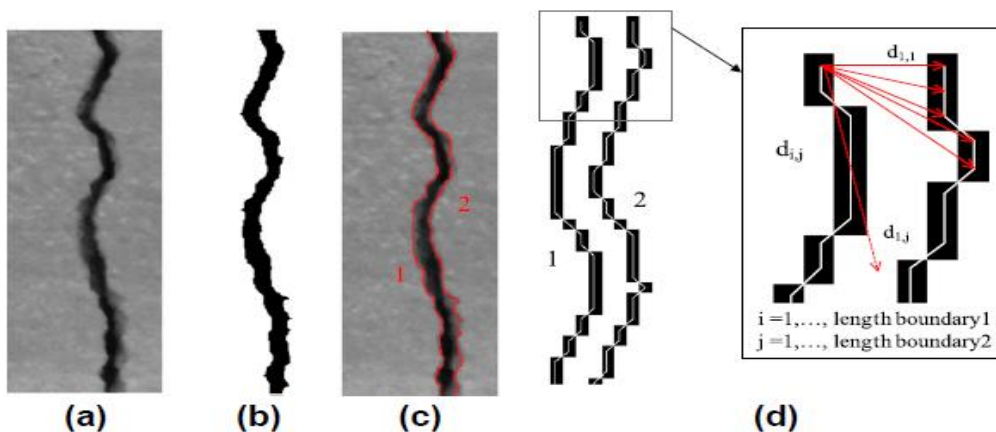


Figure II-17 : Evaluation de la largeur de la fissure en chaque point le long de la discontinuité. [28]

II.2.3.2 Simulation de la fissuration par éléments finis via le code Cast3M

La corrosion des armatures des éléments de structures en béton armé, affecte leur capacité structurelle et donc leur durée de vie. Les phénomènes induits sont complexes et combinés. L'objet de cette étude porte sur le développement de la fissure sur une éprouvette en 2D, validée et calée à partir des résultats d'études expérimentales sur la corrosion. Cette

étude présente la simulation numérique de la fissuration due à la corrosion des armatures à l'aide du code Cast3M. Ce qui devrait permettre aux ingénieurs chargés de diagnostiquer les structures en béton armé corrodées, d'optimiser leur évaluation, et par conséquent la maintenance. Cast3M est un logiciel de calcul de structures par la méthode des éléments finis et plus généralement de résolution des équations aux dérivées partielles. Il a été développé au Département de Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). La particularité de Cast3M est d'être extrêmement adaptable aux multiples applications propres à chaque utilisateur. [30]

II.2. 3.3 Instrument d'analyse de la corrosion canin +

L'instrument doit uniquement être utilisé pour déterminer le potentiel de corrosion des armatures dans le béton ou la résistance électrique du béton.



Figure II-18 : Appareil de mesure de corrosion canin + de notre laboratoire

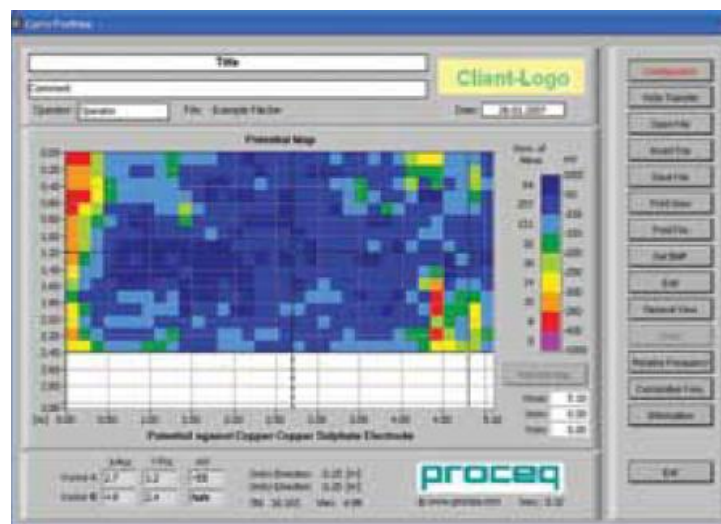


Figure II-19 : Carte potentiel de corrosion

La carte potentiel du canin c'est un mappe qui donne la densité de la corrosion à l'aide d'un logiciel (proceq).

II.2.3.4 Méthode Globale/Locale Fissuration des Structures en Béton

Une nouvelle approche globale/locale est mise en place pour l'étude de la fissuration des structures en béton et béton armé. La méthode globale/locale est composée des étapes suivantes :

- ✓ Analyse globale de l'ensemble de la structure à l'aide d'un modèle d'éléments finis basé sur la mécanique de l'endommagement ;
 - ✓ Découpe de la RoI, région de concentration d'endommagement ;
 - ✓ Extraction et interpolation des déplacements du maillage global vers le maillage local ;
 - ✓ Ré-analyse locale de la ROL à l'aide d'un modèle à éléments discrets type lattice.
- [29]

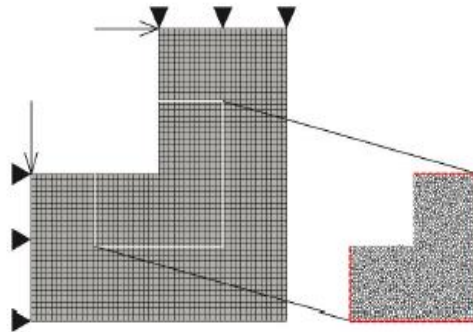


Figure II-20 : Illustration de la méthode Globale/Locale sur une éprouvette en L [29]

Conclusion

On conclut à partir de l'étude de ce chapitre des connaissances sur différentes méthodes et les moyens d'investigations des cas pathologiques et de connaître comment choisir des investigations dans un diagnostic d'ouvrage qui est divisé en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives, chaque catégorie contient des moyens des mesures différents mais il y a aussi dans le domaine de l'investigation ont atteint des méthodes numériques programmées ou des autres méthodes chimiques électroniques. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. L'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation.

Chapitre III

Etude des cas

Introduction

Afin de valoriser les connaissances acquises durant les chapitres I et II, le dernier chapitre est consacré à l'étude de deux cas pathologiques réels du diagnostic aux recommandations de réparation .ces cas pathologiques sont situés à la ville de Laghouat, il s'agit d'un lycée 1000 places et du siège de la radio de la ville de Laghouat.

III.1 Premier cas : Lycée 1000 places pédagogique

III.1.1 Description et données de l'ouvrage

III.1.1.1 Description de l'ouvrage : il s'agit d'un lycée 1000 places pédagogique située à El MERDJA wilaya de Laghouat, il a été construit en 2014 par quatre entreprises de réalisation. L'étude a été établie par un bureau d'étude privé. Le maître de l'ouvrage était le DEP (Direction des Equipement Public) de Laghouat, le contrôle est assuré par le (CTC) de Laghouat. Le projet a été réceptionné en 2016.



Figure III-1 : Plan de situation de lycée 1000 places

En 2019, le bloc de laboratoire a commencé à présenter des anomalies et des fissures (voir photo).



Figure III-2 : Partie dégradée du projet

La structure concernée par les dégradations est le bloc pédagogique (salle de laboratoire), Elle est constituée par un système de portique en béton armé (poteaux- poutres), le plancher est en corps creux 20+5 cm, l'infrastructure réalisé par des semelles isolées ainsi des semelles filantes sur quelques endroits. L'assise des fondations est un sol argileux marneux, la profondeur des fondations est environ 1.80m.



Figure III-3 : Plan de RDC et Plan de masse

La démarche de diagnostic a été effectuée selon l'organigramme mentionné dans le chapitre I Figure (I-17).

III.1.2 Constats visuels

Une fois, nous avons pris notre projet, nous sommes déplacés sur site pour constater les dégradations et les fissures qui sont apparus sur le bloc de laboratoire. Nous avons relevé les constats suivants

- ✓ Fissures obliques au niveau des murs extérieurs et intérieurs de laboratoire ;
- ✓ Dégradation de la peinture ;
- ✓ Endommagement des crépis des murs ;
- ✓ Fissures au niveau de voile en gros béton ;
- ✓ Fissures au niveau cloisons au droit des ouvertures.
- ✓ Fissures au niveau des longrines

Les photos suivantes représentent les désordres rencontrés lors de nos visites au site :



Figure III-4 : Fissures inclinées des murs extérieurs et intérieurs



Figure III-5 : Dégradation de la peinture et fissure d'interaction (mur –structure)



Figure III-6 : Endommagement des crépis des murs



Figure III-7 : Fissures inclinées au niveau du voile de soubassement en gros béton



Figure III-8 : Fissures au niveau cloisons au droit des ouvertures



Figure III-9 : Fissures inclinées au niveau des longrines (au milieu)

✚ Mesures prises après les constats visuels

On a constaté la présence de sanitaire à côté de la zone endommagée, ce constat nous laisse penser que ces dégâts sont causés par une probable infiltration d'eau sous la fondation d'angle.

Suite à cela, une investigation a été demandée à l'entreprise engagée sur place par le maître de l'ouvrage de procéder à des sondages au niveau de la fondation d'angle à côté du sanitaire ainsi qu'au niveau des regards des sanitaires.

Après avoir effectué les sondages précités, les constats suivants peuvent être décrits :

- ✓ Tassement du fond du regard ;



Figure III-10 : regard endommagé

- ✓ Fuite d'eau au-dessous des regards.



Figure III-11 : Présence de l'humidité à proximité des regards endommagés

Afin de suivre l'évolution des fissures, des témoins en verre ont été placés sur les murs et les cloisons endommagés.



Figure III-12 : Témoins en verre placés sur les longrines

III.1.3 Les causes probables de la fissuration

De ce qui précède nous pouvons affirmer que les causes des désordres que nous avons constaté sont dues principalement à :

- ✓ infiltration des eaux usées jusqu'à l'infrastructure ;
- ✓ présence de remblais mal compacté sous la fondation à côté du regard
- ✓ la réalisation d'un voile en gros béton au lieu d'un voile en béton armé sous les longrines fissurées ;
- ✓ les fonds des regards ne sont pas encastrés sur les parois du regard
- ✓ lors du sondage au niveau de la semelle endommagée, on a remarqué que le sol des fondations est de caractère argileux de différentes couleurs : d'après nos connaissances théoriques en mécanique des sols, les sols argileux sont très sensibles à l'eau, donc pour éviter ce genre de dégradations, le concepteur du projet doit prévoir un autre système de fondation telle que semelles filantes dans les deux sens au lieu des semelles isolées.

III.1.4 Les solutions envisagées

Suite aux constats précités, les solutions suivantes peuvent être prescrites on se basant sur les références citées sur le premier chapitre

- ✓ afin de rigidifier la semelle qui a tassée, on recommande d'injecter du béton sous la semelle, celui-ci doit être armé. Lors de l'opération d'injection, il faut prévoir un étayage du planche RDC afin d'éviter tout risque d'instabilité de la structure
- ✓ Joindre les deux semelles isolées par des poutres afin d'assurer un tassement uniforme
- ✓ Refaire tous les regards en béton armé étanche s'il faut utilisée des produits d'étanchéité commercialisés telle que les produits SIKA.
- ✓ Démolition du voile en gros béton et le remplacé par un voile en béton armé.
- ✓ Ciment spécial avec adjuvant de protection.

Les photos suivantes représentent les solutions envisagées :



Figure III-13 : Chemisage de la semelle



Figure III-14 : Coulage de la semelle filante



Figure III-15 : Ferrailage de regard renforcé

Recommandation et conclusion

A partir des constats précités et des propositions de réparations, nous avons constaté que les dommages qui sont apparus dans la construction sont dus principalement aux infiltrations des eaux usées d'assainissement sous les fondations, ce qui a causé la modification de la capacité portante du sol. Cette modification de la capacité portante provoque un tassement des fondations.

De plus, la mauvaise réalisation des regards a participé à l'amplification des dégradations (fond mal ancré).

A cet effet et afin d'éviter ces dégradations dans les constructions, nous recommandons de bien réaliser le système d'évacuation des eaux usées (regards et conduites étanches).

III.2 Deuxième cas : Siège de la Radio de Laghouat

III.2.1 Description de l'ouvrage

Le siège de la radio de Laghouat est situé à la partie nord –ouest de la ville de la Laghouat. Elle a été construite en 2014, la conception et l'étude est réalisée par le bureau d'étude appelé la société civile d'architectes, Le maître de l'ouvrage est le DEP de Laghouat (Direction des Equipements Publics).

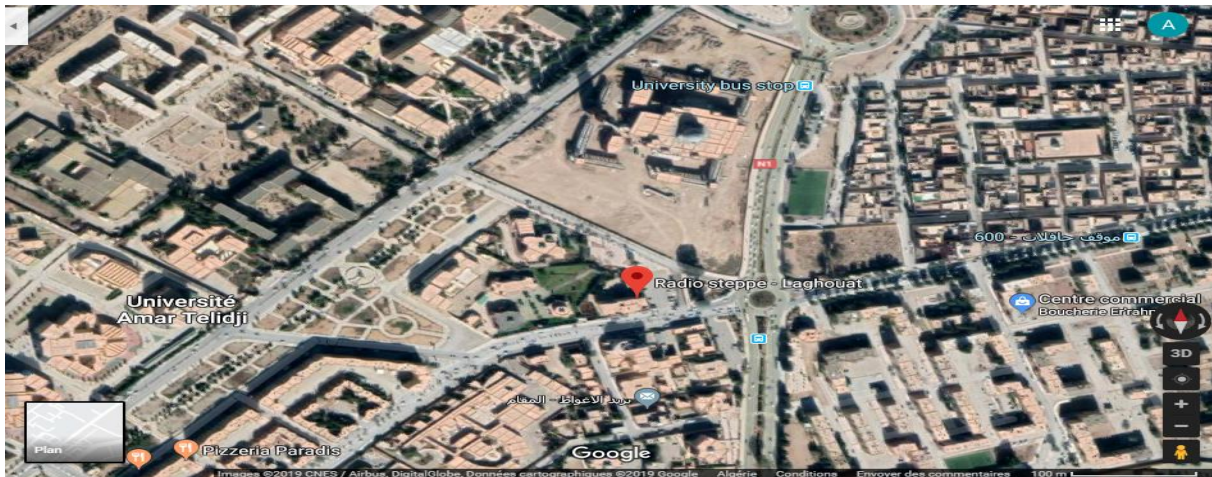


Figure III-16 : Situation du Siège de la Radio Laghouat

La structure du projet est de type portiques auto –stable R+2 en béton armé, l'infrastructure est réalisée par des semelles isolées. Le terrain du projet présente une topographie plane.



Figure III-17 : Façade principale de la radio

III.2.2 Caractéristiques géotechniques du sol d'assise

Le laboratoire des travaux public du sud (LTPS) a procédé a l'étude géotechnique du terrain devant servir d'assiette au projet : siège de la radio Laghouat.

✓ Géologie locale

La zone intéressée par le projet est caractérisée par une géomorphologie relativement calme. Les terrains de cette région appartiennent au crétacé inférieur caractérisé par des dépôts marins en surface on trouve le quaternaire récent composé essentiellement d'alluvions, la zone est caractérisée par une faible sismicité.

✓ Géologie du terrain

La reconnaissance géologique du site a été mise en évidence grâce à la réalisation de (02) sondages carottés figés avec une profondeur de 10.00 m. Ces sondages sont décrits comme suit :

A) sondage n°1 :

- ✓ 0.00-0.50m : remblai ;
- ✓ 0.50-5.00m : sable carbonaté graveleux (tuf) ;
- ✓ 5.00m-10.00m : sable grossier à graveleux.

B) sondage n°2

- ✓ 0.00-0.50m : remblai ;
- ✓ 0.50-1.50m : terrain végétal ;
- ✓ 1.50-5.00m : sable carbonaté graveleux (tuf) ;
- ✓ 5.00m-10.00m : sable grossier à graveleux.

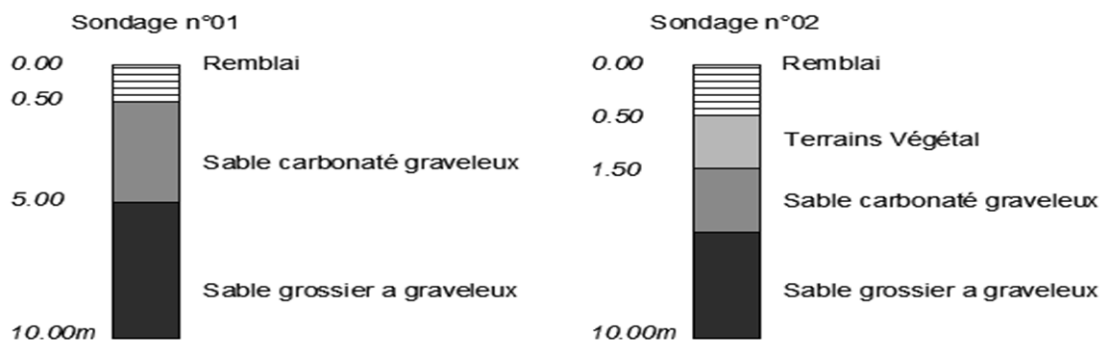


Figure III-18 : Corrélation des coupes lithologiques des sondages carotte

✚ Résultat d'étude du sol

Le terrain qui sert d'assise pour le projet : Radio de Laghouat est constitué essentiellement d'un sable carbonaté graveleux, a une épaisseur variable entre 0.50 m et 5.00m, d'une sable grossier à graveleux à 5.00 m d'épaisseur, une couche de remblai en surface a une moyenne de (0.00 à 1.50m) : cette dernière doit être dégagée et terrassée.

La nappe phréatique n'a pas été détectée du moins jusqu'à une profondeur de 10.00 m ; les essais d'identification et mécaniques effectués, ont montré qu'il s'agit d'un sol pulvérulent de plasticité nulle, travaillant en frottement, insoluble n'est pas agressif. Le type de fondation préconisé pour le projet sera superficiel types semelles isolées rectangulaires ou carrées, rigidifiées par les longrines.

La profondeur d'ancrage sera située entre 2.00m à 2.50m de profondeur après décapage du remblai et la contrainte admissible de sol est estimée à 1.50 bars.

Les analyses chimiques des échantillons prélevés ont montré que le sol n'est pas agressif, par conséquent l'utilisation d'un ciment ordinaire est autorisée pour le coulage du béton des infrastructures.

III.2.3 Constats visuels

Une fois informés du cas pathologique de la RADIO, accompagnés des services du contrôle technique de la construction (CTC) de Laghouat, nous sommes déplacés sur site et nous avons observés plusieurs dégradations qui sont citées ci-dessous :

- ✓ Une densité des arbres et des végétaux à côté de l'ouvrage.
- ✓ Des fissures au niveau des cloisons (les fenêtres, les portes).
- ✓ Ouverture excessive des joints de dilatation.
- ✓ Des fissures verticales dans les murs.
- ✓ Fissure de maçonnerie au niveau de façade arrière.
- ✓ Les fissures inclinées importantes à l'intérieur de l'ouvrage (bureau, couloir, salle d'attente).

Les photos suivantes représentent les désordres rencontrés lors de nos visites au site :



Figure III-19 : Des végétaux à côté de l'ouvrage.



Figure III-20 : Fissures au niveau des cloisons



Figure III-21 : Ouverture excessive des joints de dilatation



Figure III-22 : Fissures de maçonnerie



Figure III-23 : Fissures inclinées à intérieur de l'ouvrage

III.2.4 Les causes probables de fissuration

En analysant les constats précités et en faisant exploiter les acquis des chapitres précédents, on peut citer les causes probables des dégradations observées sur le projet, ces dégradations peuvent être causées par :

- ✓ Présence d'espace vert à côté du projet, qui a causé de développement des racines des arbres au voisinage de la structure.
- ✓ L'irrigation anarchique des arbres à proximité de l'ouvrage ;
- ✓ D'après l'étude de sol, le sol d'assise est composé essentiellement de sable carbonatés, d'après la référence, celui-ci constitue une mauvaise assise s'il contient des éléments fins on analysant l'analyse granulométrique qui existe dans le rapport du sol, on remarque l'existence d'éléments fins.
- ✓ De plus, le rapport de sol établis par le Laboratoire de Travaux Publics du SUD ne contient pas les caractéristiques nécessaires pour bien identifier le sable carbonaté tel que :
 1. L'origine du matériau : sable détritique, coquillier, corallien, algaire, ..., significative de son comportement mécanique (compressibilité, résistance, ...)
 2. La teneur en carbonates $\text{CO}_3 \text{Ca}$;
 3. La granulométrie ;
 4. Le poids volumique déjugé γ ;
 5. La porosité intragranulaire éventuellement (seule la porosité intra granulaire ouvert et facilement mesurable) ;
 6. La densité relative D_r ;
 7. L'indice de compressibilité C_p . [32]
- ✓ Présence de conduite d'eaux pluviales qui déversent directement au pied de mur (absence de regards d'évacuation)
- ✓ absence d'aménagement autour du bloc

Recommandations et conclusion

Au cours de notre étude de diagnostic du site, nous avons relevé de nombreux problèmes et dommages affectant le bâtiment et les raisons de ces problèmes. Nous avons donc soumis une proposition et quelques solutions possibles pour traiter et réparer les dommages ayant affecté le bâtiment, sur la base des recherches que nous avons effectuées précédemment dans le chapitre I qui sont les suivantes :

-Trouver un moyen d'empêcher la collecte d'eau, qu'il s'agisse d'eau de pluie ou d'eau provenant de l'arrosage des arbres à proximité du bâtiment à l'aide d'un système de drainage.

-Limiter la pénétration des racines des arbres sous le bâtiment devrait être limitée, ce qui causerait des fuites d'eau sous l'infrastructure, ce qui entraînerait plusieurs dangers pour la stabilité du bâtiment comme le tassement différentiel. Sur la base de nos recherches sur la prévention des fissures, nous avons parlé de ce phénomène et pour réduire ce phénomène nous avons suggéré la solution suivante :

Écrans anti- racines (EAR)

Les écrans anti-racines(EAR) sont préconisés si la construction n'est pas possible à une distance suffisante des arbres comme notre cas, si le propriétaire du projet souhaite conserver sa végétation ou si la végétation du voisin existe et présenter un risque, il convient de mettre en place un écran pour prévenir la succion des racines des arbres. Cette coupure capillaire doit trouver sa place au plus près des arbres dont il faut se protéger, en conservant 3m au minimum de racines pour la stabilité de l'arbre, la profondeur minimal de l'écran est de 2m. Le réseau racinaire peut dessécher un sol argileux jusqu'à 5m de profondeur pour une forêt de chênes adultes.la profondeur de succion sera adaptée à l'agressivité de la végétation et à la profondeur de succion possible du réseau racinaires, et on a des différents techniques pour réaliser la coupure capillaire qui sont :

- ✓ Une fouille de 30 cm de largeur remplie de gros béton (solution traditionnelle).les terres d'excavation sont évacuées ;
- ✓ Un film polyester ou une géomembrane peut prendre place dans la fouille de 30 cm de largeur qui est ensuite remblayée avec les déblais extraits. Il convient de prendre soin de protéger la coupure capillaire par un plastique alvéolé et de compacter les remblais ;
- ✓ Un écran en palplanches métalliques battues descendu jusqu'au toit du substratum. C'est la solution ultime quand la succion des racines est puissante. Les vibrations de contraintes dans la structure, déjà fragilisée par la fissuration. [6]

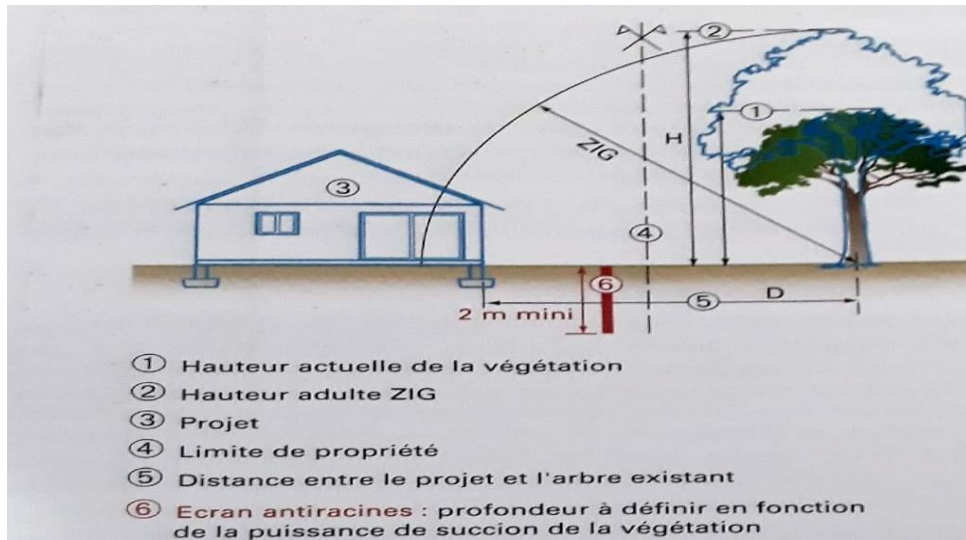


Figure III-24 : Exemple d'implantation d'écrans anti racine pour un arbre seul appartenant au propriétaire du projet ou au voisin. [6]



Figure III-25 : Voile polyester avec protection plastique et écran béton classique

On peut faire aussi une réparation des fissures que nous avons parlées précédemment dans le chapitre I par injection ou calfeutrement ou colmatage ou pontage pour traiter les fissures.

Et en fin Nous recommandons de suivre les étapes de prévention et d'action mentionnées précédemment et de suivre le rapport d'étude de sol et de prendre en compte ses conseils.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les techniciens ont pris conscience de l'importance de l'entretien des constructions en même temps qu'ils étaient amenés à entreprendre des opérations souvent très lourdes de renforcement des ouvrages.

L'expertise des ouvrages est une discipline qui se base sur une profonde connaissance sur le comportement des matériaux, c'est donc un art qui mérite la même valeur que de celui de construire.

La pathologie des constructions est devenue une science importante en génie civil, il doit être intégré dans la formation des ingénieurs pour que ce dernier puisse connaître et éviter les défauts touchants les constructions en génie civil. De plus, les problèmes survenus sur les ouvrages de génie civil révèlent de plusieurs paramètres, ces paramètres peuvent être résumés dans ce qui suit :

✓ Les paramètres liés aux méthodes d'entretien causent des désordres plus que ceux causés par les autres facteurs, mais ils sont les plus populaires et les plus rencontrés. Et c'est le facteur qui accélère la dégradation.

✓ Les paramètres liés à l'environnement par la présence des tassements de sols est le facteur qui influence sur la majorité des dégradations des structures sur tous pour les ouvrages à usage d'habitations.

✓ Le défaut de conception est un facteur remarquable dans la dégradation des ouvrages, concernant les erreurs d'étanchéité.

✓ Les défauts ou erreurs de mise en œuvre entraînent la mauvaise qualité du béton et jouent un rôle primordial dans le vieillissement ou la dégradation des ouvrages.

✓ Les effets thermiques ont été pendant longtemps insuffisamment pris en compte, même pour les structures plus récentes. L'utilisation des adjuvants, en éliminant les chocs thermiques et assurer une bonne cure, est la bonne solution pour augmenter la durabilité des constructions, surtout dans le cas de coulage des bétons pendant l'été.

Par ailleurs, La détermination des investigations à mener sur la structure est basée sur l'étude préalable des documents et une visite préliminaire de l'ouvrage. On effectue ensuite une inspection détaillée de l'ouvrage au cours de laquelle est réalisé un relevé des désordres. Ceux-ci sont qualifiés et quantifiés dans la mesure du possible à l'aide d'appareils et des techniques bien précises.

Enfin, l'étude des deux cas pathologiques présentés dans notre travail, nous laisse donner les conclusions et les recommandations suivantes :

1. Pratiquement tous ces désordres sont dus à des problèmes liés au sol des fondations,
2. L'infiltration des eaux usées sous les fondations causées par la mauvaise exécution des regards (étanchéité des parois et des fonds),
3. Présence des espaces verts à côté des murs et l'irrigation anarchiques,
4. Absence d'aménagement autour des blocs concernés.

A partir des conclusions précédentes, les recommandations suivantes peuvent être écrites

1. Approfondir les études du sol en cas de soupçon de mauvais sol

Conclusion générale

2. Réaliser des aménagements et un système de drainage autour des bâtiments afin d'éviter toute infiltration d'eaux sous les fondations.

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G, C. (1999). *le matérieux béton, les cours de L'ENTPE*. ALEAS.
- [2] *cent ans de béton* . (1949). science et Industrie.
- [3] 2, T. (2013, janvier). les betons formulation ,fabrication et mise en ouvre.
- [4] www.infociment.fr
- [5] Abdel hakim, M. B. (2006). Béton Armé I TEC185
- [6] Bêchard, A.-F. (2014). *la pathologie des fondations superficielles* . paris: CSTB.
- [7] pathologie et réparation des ouvrages,stockage et transport des liquides. (1996, septembre).
- [8] L. FISSURATION et N.-S. DU BÉTON, « TECHNOBÉTON » chap1.emplacement des différents fissurent.
- [9] Réparation et renforcement des structures – FABEM – Guide du STRES. 2010
- [10] Protection des bétons – FABEM – Guide du STRES.2010
- [11] *Encyclopédie du batiment* . paris,france: WEKA.
- [12] MAMILLAN.M. (1994). Restauration des batiments en béton armé C23550. *Traité Construction*
- [13] TACHE.G, C. e. (1993). Matérieux et Construction .
- [14] ROUX.A, G. e. (1995). micanisme,phatologie et prévention. *traité construction* .
- [15] (CEBTP, M. B. (2013, septembre 25). JOURNEE TECHNIQUE IMG. *La démarche de diagnostic*.
- [16] NF P 95 103 . (n.d.). *Traitement des fissures et protection du béton* .
- [17] POINEAU, D. (2013). *Traitements des fissures par injection -FABEM-Guide du STRESS*.
- [18] PERCHAT.J. (1998). *Regles BAEL.Pathologie et réparation des couvrages C2317*.
- [19] POINEAU.DANIEL. (2013). *Traitement des fissures par calfeutrement ou pontage-FABEM2 GUIDE DU STRESS*.
- [20] POINEAU, D. (2010). *Réparation et ronforcement de structure -FABEM7-*.
- [21] POINEAU, D. *GUIDE DES STRESS<FABEM8>*.
- [22] AFGC. (février 2011). *réparation et ronforcement en béton armé moyen de mtériau composé*.

Bibliographie

- [23]AFRG. (Novembre 2003). *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*.
- [24] VIE.D, T. e. (1998, février). Diagnostic des ouvrages en béton armé, facteur de vieillissement des ouvrages.
- [25] LAVAUR.RC, G. e. (s.d.). *Traité de béton armé*. Tom I.
- [26]TACHE.G. (2008, Avril). Détermination de la vitesse de propagation du son dans le béton.
- [27]DELYOE.F.X,BOUSSION.R,MASSIP.M,OLIVIER.G,RANGEARD.D.(1986, novembre). Mesure de la profondeur de carbonatation du béton .
- [28]J. Valença, D. Dias-da-Costa, et E. Júlio, « Characterisation of concrete cracking during laboratorial tests using image processing », *Construction and Building Materials*, vol. 28, n° 1, 2012.
- [29]C. Oliver-Leblond, B. Richard, A. Delaplace, et F. Ragueneau, « Méthode Globale/Locale: Fissuration des Structures en Béton », in *31ème rencontres universitaires de l'AUGC*, 2013.
- [30] W. Juimo, R. Ngono, D. Fokwa, et T. Cherradi, « Fissuration dans les ouvrages en béton armé soumis à la corrosion: simulation de la fissuration par éléments finis via le code Cast3M », in *Congrès français de mécanique*, 2015.
- [31] Ridha, M. L. (s.d.). Les causes de dégradation des bétons.
- [32] Pérol, C. (1991). *Stabilité et opération des auto-élévatrices*. paris : TECHNIP.
- [33]Solo, Y. (2014, novembre 21). Natures de terrain.

Résumé :

La conception des structures en béton consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Il est nécessaire que les structures en béton armé soient capables de reprendre les efforts qui leur sont appliqués tout au long de leur vie.

En effet, les dégradations des ouvrages en béton sont dues à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Afin de réhabiliter un ouvrage en béton armé, il est important d'effectuer un diagnostic, grâce à cela, il est possible de proposer une méthode de réparation adéquate ainsi qu'une protection contre les attaques futures. Un suivi de l'ouvrage peut être réalisé afin de déterminer l'évolution des différentes pathologies.

Dans le but d'appliquer les connaissances théoriques acquises sur la pathologie des constructions, deux cas pathologiques réels ont été étudiés de la phase de diagnostic jusqu'à la phase de proposition de solutions. Ces deux cas pathologiques sont dus principalement au changement de la capacité portante du sol de fondation causé par les infiltrations des eaux usées et des eaux pluviales par manque de drainage. Les solutions proposées pour ces cas pathologiques avant d'entamer la phase de réparation sont de vérifier les réseaux d'assainissement et d'eaux pluviales.

Mot clés : Fissuration, Diagnostic, Pathologie, Réparation.

ملخص:

يهدف تصميم الهياكل الخرسانية أساساً إلى توفير مستوى مقبول من الأمان لتقليل المخاطر المرتبطة بالفشل والكوارث وفقدان الأرواح. من الضروري أن تكون الهياكل الخرسانية المسلحة قادرة على استئناف الجهود التي يتم تطبيقها عليها طوال حياتهم. في الواقع، تدهور الهياكل الخرسانية يرجع إلى ضغوط التشغيل أو البيئة، من أجل إعادة تأهيل الهيكل الخرساني المسلح، من المهم إجراء تشخيص، بفضل هذا، من الممكن اقتراح طريقة مناسبة للإصلاح بالإضافة إلى الحماية من الهجمات المستقبلية، يمكن إجراء متابعة الكتاب لتحديد تطور الأمراض المختلفة. من أجل تطبيق المعرفة النظرية المكتسبة في علم أمراض البنى، تم دراسة حالتين مرضيتين حقيقيتين من مرحلة التشخيص إلى مرحلة الاقتراح. هاتان الحالتان المرضيتان ترجعان أساساً إلى التغيير في قدرة تحمل التربة الأساسية الناتجة عن تسرب المياه العادمة ومياه الأمطار بسبب نقص الصرف، تتمثل الحلول المقترحة لهذه الحالات المرضية قبل بدء مرحلة الإصلاح في فحص شبكات الصرف الصحي ومياه الأمطار. الكلمات المفتاحية: التشققات، تشخيص، الأضرار، تصليح.

Abstract:

The design of concrete structures is essentially about providing an acceptable level of safety to reduce the risks of failure, disaster and loss of life. It is necessary for reinforced concrete structures to be able to resume the efforts applied to them throughout their lives.

Indeed, the deterioration of concrete structures is due to operational or environmental stresses. In order to rehabilitate a reinforced concrete structure, it is important to carry out a diagnosis, thanks to which it is possible to propose an adequate repair method as well as protection against future attacks. A follow-up of the work can be carried out in order to determine the evolution of the different pathologies.

In order to apply the theoretical knowledge acquired on the pathology of constructions, two real pathological cases were studied from the diagnostic phase to the solution proposal phase. These two pathological cases are mainly due to the change in the load-bearing capacity of the foundation soil caused by infiltration of wastewater and rainwater due to lack of drainage. The solutions proposed for these pathological cases before starting the repair phase are to check the sewerage and storm water networks

Key Words: cracking, Diagnostic, Pathology, reparation

