



MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences et Technologies

Département de Génie Civil



RAPPORT DE FIN D'ETUDE

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER EN TRAVAUX PUBLIC

OPTION : VOA

Techniques de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé

Présenté par :

- **DAHMOUNE Hadjer**
- **OSMAN Hafsa**

Soutenu le 25 juin 2023

Devant le jury composé de :

- **Mr. BOUHALOUFA Ahmed: President.**
- **Mr. ZELMAT Yassine : Examineur.**
- **Mr. BOUHADJEB Kadda : Encadreur.**

Année universitaire : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au terme de ce précieux travail nous tenons en premier lieu à rendre une profonde gratitude à « Allah » qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce modeste travail dans des bonnes conditions. Nous remercions aussi les membres de nos familles qui nous ont soutenus tout au long de notre vie. Nous tenons remercier vivement Mr **BOUHADJEB Kadda** d'avoir pris en charge la direction scientifique pendant le déroulement et la réalisation de notre travail.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont consulté notre travail et aussi aux enseignants pour leurs aides et orientations durant nos études.

Nous remercions nos chers parents qui ont toujours été là pour nous.

Nous remercions nos sœurs et frères pour l'encouragement.

Nous remercions tous nos amis qui ont toujours été là pour nous et à l'ensemble des étudiants de la promotion master 2 VOA.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à ceux qui sont la source de notre inspiration et notre courage.

A nos très chères mamans qui nous ont toujours donné l'espoir de vivre et qui n'ont jamais cessé de prier pour nous.

A nos très chers pères, pour leurs encouragements, leur soutien, et surtout leur sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de nos études.

A nos frères et sœurs et à toutes nos familles **DAHMOUNE** et **OSMAN**.

Aux enseignants qui ont travaillé dur pour notre succès

A tous les étudiants de promotion Master 2 VOA.

HADJER et HAFSA

Résumé :

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité (exemple l'accroissement de surcharges d'exploitation), le manque d'entretien...

Etablir un bon diagnostic impose des connaissances particulières du comportement des bétons sous l'influence des agents agressifs auxquels il est exposé, de son comportement mécanique.

Après un diagnostic, et afin d'y remédier à cette problématique, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes soit de : réhabilitation, de réparation ; ou bien le renforcement.

L'objectif de ce travail est précis, c'est d'arriver à réaliser une expertise et rassembler les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé et l'élaboration d'un plan de réhabilitation.

Mots clés : durabilité, dégradation, diagnostic, réhabilitation, structures, béton armé,

ملخص:

إن الاضطرابات في الهياكل و البنائيات غالباً ما تكون بسبب تدهور المواد المستخدمة أو العوامل الخارجية. كل عملية البناء أو إعادة التأهيل تتطلب عناية خاصة من حيث التشخيص السليم الذي يتطلب معرفة خاصة لسلوك الخرسانة تحت تأثير العوامل الخارجية التي تتعرض لها. تتطلب معالجة الاضطرابات و مشاكل تدهور البنائيات و الهياكل تقنيات و أساليب تتكيف مع طبيعة المشكل و تبني طريقة إعادة التأهيل أو الإصلاح أو التعزيز. الهدف من هذا البحث هو المعرفة الدقيقة لأسباب و العوامل المؤثرة في الخرسانة المسلحة ووضع خطة لإعادة تأهيلها و كيفية علاجها بمختلف التقنيات المتاحة.

الكلمات الرئيسية: الإستدامة، تدهور، التشخيص، إعادة التأهيل، الخرسانة المسلحة.

Abstract:

Structural disorders are often due to the use of materials or the change in functionality For example increased operating overhead, the lack of maintenance.

Establish a good diagnosis impose particular knowledge of the behavior of concretes under the influence of aggressive agents to which it is exposed; of its mechanical behavior.

After a diagnosis, and in order to remedy this problem, it is imperative to carry out methods either of: rehabilitation, repair; or reinforcement.

The objective of this work is precisely to arrive at carrying out an expertise and to assemble the influencing factors on the degradation of concrete, structures and the elaboration of a rehabilitation plan.

Keywords :durability, degradation, diagnosis, rehabilitation, structures,concretes.

Sommaire

Chapitre I: Introduction Générale

I.1. Problématique	3
I.2. Objectif du projet de fin d'étude :	4

Chapitre II: Les principales pathologies et dégradations affectant les constructions en béton armé

II.1. Généralité :	6
II.2. Définition des dégradations :	6
II.3. Dégradations affectant le béton armé :	6
II.3.1. La corrosion des aciers dans le béton armé :	6
II.3.2. La fissuration du béton armé:	7
II.3.2.1. Les différents types de fissures:	7
II.3.3. Déamination:	7
II.3.4. Boursouflure :	8
II.3.5. Cratères d'éclatement (popote):	8
II.4. Dégradations affectant les fondations:	9
II.4.1. Les mouvements de fondations d'une maison individuelle :	9
II.4.1.1. tassements courants :	9
II.4.1.2. Affaissement de dallage de maisons individuelles :	10
II.4.1.3. Effondrement de murs de soutènement en maçonnerie :	10
II.4.1.4. Désordres des fondations profondes par pieux :	11
II.5. Dégradations affectant les éléments de structure :	12
II.5.1. Fissures "structurelles" des maçonneries de maisons individuelles :	12
II.5.2. Corrosion des armatures du béton armé en façades des bâtiments :	12

Chapitre III :Les causes et conséquence des principales dégradations

III.1.Introduction :	15
III.2. Facteurs et origines des dégradations :	16
III.2.1 Actions physiques :	16
III.2.1.1. Action de gel-dégel :	16
III.2.1.2. Retrait :	18
III.2.1.3. Ressuage :	19
III.2.1.4. Érosion du béton :	19
III.2.2.Action thermique:	20
III.2.2.1. Écaillage et éclatement du béton :	20
III.2.3. Dégradations chimiques :	21
III.2.3.1. Réactions et attaques selfatiques :	21
III.2.4. Action mécanique :	23
III.2.4.1. Chocs :	23
III.2.4.2. Érosion :	24
III.2.4.3. Cavitation :	24
III.2.4.4. Abrasion :	24
III.2.5. Actions environnementale :	24
III.2.5.1. Le climat :	24
III.2.5.2. La température:	25
III.2.5.3. L'eau :	25
III.2.5.4. Le vent :	25
III.3. Conclusion :	25

Chapitre IV: Principales méthodes de diagnostic et d'évaluation des ouvrages en béton armé

IV.1.Introduction :.....	27
IV.2. Les objectifs du diagnostic :.....	27
IV.3. Les principales étapes d'un diagnostic :	27
IV.3.1. Visite préliminaire :	27
IV.3.2. Collecte des documents :.....	28
IV.3.3. Préparation de l'intervention :.....	29
IV.3.4. Inspection :.....	29
IV.3.5. Essais en laboratoire :	29
IV.3.6. Choix des investigations :	29
IV.3.7. Types d'investigations :.....	30
IV.3.7.1 Investigations non destructives :.....	30
IV.3.7.2 Investigations destructives (Analyse en laboratoire) :	30

Chapitre V: Technique de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé

V.1. Introduction :.....	32
V.2. Les principales techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton :	32
V.2.1. Ragréages :	32
V.2.2. Béton projeté :	33
V.2.2.1. Projection par voie sèche :.....	34
V.2.2.2. Projection par voie mouillée :	34
V.2.3. Coulage ou injection de béton ou de mortier :	36
V.2.4. Renforcement par ajout d'armatures :	37
V.2.7. Protection du béton :.....	37
CONCLUSION GÉNÉRALE :	39
Références Bibliographiques.....	43

Liste des Figures

Figure 1: Déamination de la dalle	7
Figure 2: Boursouflures de la dalle	8
Figure 3: Cratère d'éclatement à la surface de la dalle	9
Figure 4: Schéma d'effondrement de murs de soutènement en maçonnerie	11
Figure 5: La corrosion des armatures du béton armé	13
Figure 6: Schéma de dégradation du béton	16
Figure 7: Le mécanisme de dégradation par le gel dégel	17
Figure 8: Pont dégradé par l'action du gel	17
Figure 9: Différents types de retrait	19
Figure 10: Erosion d'un béton	20
Figure 11: Schéma des sources de sulfates	21
Figure 12: Mécanisme d'attaque selfatique externe	22
Figure 13: Processus de carbonations	23
Figure 14: Chocs de véhicule sur ponts	24
Figure 15: Le ragréage d'une structure de béton	33
Figure 16: Projection par voie sèche	34
Figure 17: Projection par voie mouillée	35
Figure 18: Ajout de mortier de réparation	37

Chapitre I

Introduction générale

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits.

Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine.

Bien conçu et mis en œuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone etc.

La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et formation de rouille, dont le volume, aux moins deux supérieur à celui du fer initial, entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de protection ou de réparation. Celles-ci agissent directement au niveau de l'acier (revêtements organiques ou métalliques des armatures, inhibiteurs de corrosion, protection cathodique) ou au niveau du béton, soit en empêchant la pénétration d'éléments agressifs (revêtement du béton par des peintures spéciales), soit en réhabilitant la qualité du béton (changement des parements, déchlorurations, ré-alcalinisation). Des études faites à travers le monde montrent que la corrosion des armatures est responsable de la dégradation de 75% des ouvrages en béton armé et absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des ouvrages de génie civil; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris très au sérieux.

Que de nombreux ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures exigent de nouvelles interventions peu de temps seulement après qu'ils aient été réparés pour la même raison a attiré notre attention et nous a amené à penser que la corrosion qui fait tant de mal à nos ouvrages en béton armé n'est pas traitée avec tout le sérieux qui doit lui être dû.

Cela peut résulter du fait que beaucoup d'ingénieurs et de techniciens ne procèdent pas au préalable à des investigations sérieuses pour évaluer l'ampleur des dégâts dans la structure avant d'engager des travaux de réparation, soit par leur méconnaissance du phénomène de la corrosion et de la démarche à suivre pour résoudre les problèmes de corrosion, soit alors qu'ils ne se fient uniquement qu'à l'apparition des dégradations visuelles sur l'ouvrage telles que : les tâches de rouille, les infiltrations d'eau, l'éclatement du béton, les fissures...Les conséquences qui en découlent sont : la non détection des dégradations cachées qui vont se propager avec le temps, le risque de baser les travaux sur un concept erroné, la mauvaise évaluation du coût des réparations.

I.1. Problématique :

La réhabilitation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, Choc, Séisme, ...) Les critères qui rentrent en jeu dans la conservation des structures sont nombreux et subjectifs: pour l'habitant, la localisation est prioritaire ; pour l'historien, la mémoire prime ; pour l'architecte, la qualité d'élaboration l'emporte ; pour les associations, l'image du quartier domine. La décision de réhabiliter peut être emportée sur des critères économiques, patrimoniaux ou sociaux. Cependant, les enjeux techniques et économiques en présence ramènent le plus souvent l'équation à quelques paramètres : La valeur patrimoniale des structures (au sens culturel, qui comprend l'ancienneté, la rareté et la beauté), ou son appartenance à un ensemble dont la cohérence doit être conservée.

- Quels sont les obstacles et les cause qui peuvent affectée les ouvrages en béton armé et commentles identifier ?
- Quelles sont les méthodes nécessaires pour le diagnostic et la maintenance ?

I.2.Objectif du projet de fin d'étude :

Le présent travail consiste à présenter les différentes techniques de diagnostic et de réparation des ouvrages en béton armé développées durant plusieurs études précédentes.

Le but de notre étude ici est de présenter les principales causes de dégradation des structures en béton armé et leurs conséquences.

Ainsi un bon diagnostic des ouvrages en béton armé doit être réalisé, ce qui permet d'évaluer le de gravité de la détérioration et prendre la bonne décision quant à la réparation la plus appropriée des structures concernées.

Pour cela, il est nécessaire d'étudier les phénomènes de dégradations des ouvrages en béton à travers une analyse des pathologies existantes et leurs origines. D'une façon précise.

Notre travail consiste à établir une synthèse succincte des principales pathologies des constructions en béton armé, de leur diagnostic et de leur réparation.

Le premier chapitre est une introduction générale sur la durabilité des structures.

Le deuxième chapitre présente une revue sur les principales pathologies et dégradation affectant les constructions en béton armé.

Le troisième chapitre relate les causes et conséquences des principales dégradations.

Le quatrième chapitre méthodes de diagnostic et d'évaluation des dégradations des ouvrages en béton armé.

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

Chapitre II

Les principales pathologies et dégradations affectant les constructions en béton armé

II.1.Généralité :

L'étude des pathologies en construction consiste en l'analyse des processus susceptibles d'entraîner des sinistres ou des désordres dans le domaine du bâtiment.

Une telle étude est indispensable pour prévenir les dégâts et maintenir l'état du bâtiment voire réhabiliter les structures en cas de défaillances. Elle se doit de reposer sur un diagnostic précis des ouvrages. Elle peut concerner aussi bien les matériaux comme le bois, le béton ou la pierre, que les éléments de l'ouvrage (planchers, murs, charpentes...). Cet article rassemble de manière synthétique et exhaustive les pathologies relatives aux matériaux et structures de bâtiments. Il évoque également le diagnostic, les causes, la prévention et la réparation, sous forme de généralités, de rappels succincts ou de compléments aux articles existants.

Depuis de nombreuses années, la pathologie dans le bâtiment a suscité de l'intérêt, permettant ainsi de mieux construire avec la mise en place de recommandations, puis de normes définitives.

Le traitement de sinistres, seuls, ou par familles, aura permis de tirer des conclusions, et ainsi d'éviter que ceux-ci ne se reproduisent. Ne dit-on pas : « on réussit d'échec en échec ! ». Il existe déjà dans la collection des TI beaucoup d'articles spécifiques traitant le sujet, quelquefois dans le détail. Des auteurs très expérimentés et experts auront déjà, mieux que nous ne pourrions le faire, évoqué et traité le sujet. Un lien avec leur article sera indiqué ; de même, nous renverrons le lecteur sur d'autres parties de la collection plus spécialisé

II.2. Définition des dégradations :

Ce sont les désordres, qui apparaissent au niveau des matériaux et de la structure, ont des conséquences sur la stabilité et la longévité de l'ouvrage. Connaître l'origine de ces désordres permettra dès lors de mieux concevoir et construire les ouvrages, mais aussi de trouver des solutions adéquates pour les réparer.

II.3.Dégradations affectant le béton armé :

II.3.1. La corrosion des aciers dans le béton armé :

On peut définir la corrosion comme la transformation des métaux en composé divers sous l'action de phénomènes naturels. La dégradation causée par ce phénomène est facile à déceler. Les symptômes en sont une surface oxydée, piquée, laissant apparaître en général des plaques et écailles d'oxydes facilement détachables, d'aspect rouge brun, typique. Dans le cas de l'acier ce composé adhère mal au métal d'où il est issu et se détache facilement en écailles, la

surface de la section se trouve réduite. La réduction de la section et l'augmentation de contrainte qui en résulte diminuent la résistance de l'élément.

II.3.2. La fissuration du béton armé:

La fissuration du béton est un désagrément connu dont la cause est imputable à certaines propriétés particulières du matériau et à la multiplicité des formes qu'on peut lui donner. Théoriquement, il est inévitable que le béton armé traditionnel ait des fissures. En général elles sont si minces qu'on ne les voit même pas. La fissuration est due à certaines circonstances qu'ordinairement on ne peut pas contrôler. C'est la raison pour laquelle il est souvent difficile ou même impossible d'éviter que ce phénomène ne soit visible

II.3.2.1. Les différents types de fissures:

- ❖ Fissures isolées, parallèles, en réseau.
- ❖ Fissures à espacements grands ou petits, respectivement à ouvertures grandes ou petites.
- ❖ Fissures réparties sur toute une surface, sur une partie de la surface, au milieu des panneaux, aux bords, aux arêtes, aux angles, à l'intérieur.
- ❖ Fissures régulières d'un bord à l'autre, partielles partant d'un bord, chevauchantes.

II.3.3. Déamination:

La déamination des surfaces de béton est produite par une action similaire à l'apparition des boursouffures. L'air et l'eau étrapés sous le mortier de surface provoquent une déamination de la surface de la dalle de béton variant de quelques centimètres à quelques mètres carrés (**Figure1**). L'épaisseur de déamination de la dalle peut varier de 3 à 5mm. La déamination est apparente lorsque le béton est durci et que la surface se détériore sous l'action de la circulation. Un relevé de déamination peut être effectué à la surface du béton durci par la méthode Impact-Écho ou encore en passant une chaîne à maille et en observant les changements de sons.



Figure 1: Déamination de la dalle

II.3.4. Boursouflure :

Les boursoufflures sont des élévations convexes de la surface de la dalle dont le diamètre varie de 10 à 50mm. Les boursoufflures sont provoquées par le scellement trop rapide de la dalle (treuillage), avant que l'eau de ressuage et l'air entrappela ne se soient complètement échappés.

Afin de minimiser les risques de boursoufflures, éviter les bétons avec affaissement, contenu en air et matériaux fins élevés. Il est aussi recommandé de réchauffer la fondation avant et pendant la coulée du béton. De plus, il faut éviter de placer le pare-vapeur directement sous le béton frais.

Enfin, il faut éviter de sceller la surface du béton frais trop hâtivement avant que le ressuage ne soit complété. Une consolidation initiale appropriée peut minimiser considérablement le temps de ressuage. Lorsque des boursoufflures sont détectées pendant que le béton est encore frais, l'utilisation d'un aplatissoir en bois peut permettre de libérer l'air et l'eau obstrués sous la surface du mortier. Lorsque le béton est durci, les boursoufflures se brisent sous l'action de la circulation en formant des dépressions de surface d'environ 3 mm de profondeur.

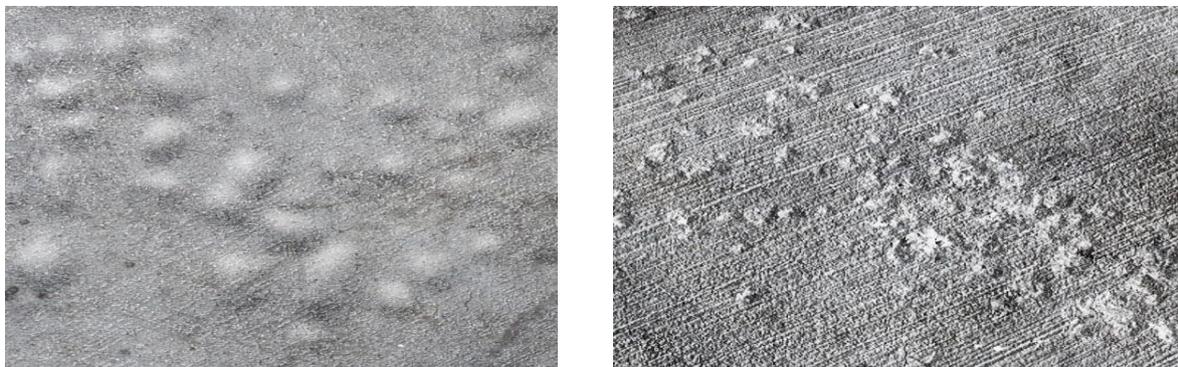


Figure 2: Boursoufflures de la dalle

II.3.5. Cratères d'éclatement (popote):

Un cratère d'éclatement est un fragment conique qui s'enlève de la surface de la dalle tout en créant un trou ou cratère. La dimension de ce cratère varie de 5 à 50 mm et il est possible d'observer un granulats fracturé à sa base.

Ce phénomène est provoqué par l'expansion d'un granulat de faible performance avec un taux d'absorption élevé. Lorsque le granulat absorbe l'humidité et gèle, son expansion provoquée une pression interne suffisante pour éclater la surface de la dalle.



Figure3: Cratère d'éclatement à la surface de la dalle

II.4.Dégradations affectant les fondations:

II.4.1. Les mouvements de fondations d'une maison individuelle :

II.4.1.1.tassements courants :

Les maisons individuelles sont habituellement fondées superficiellement par des semelles en béton armé. Les charges apportées sur ces fondations provoquent des déformations du sol, dépendant de sa compressibilité.

Comme il repose sur le sol, le bâtiment ne peut alors que suivre ces déformations. La déformation du sol est rarement homogène d'une semelle à l'autre pour tout le bâtiment. On parle alors de tassement différentiel.

Ce phénomène impose ainsi des déplacements inégaux à différentes parties du bâtiment, qui est obligé de s'y adapter. En l'absence de dispositions constructives adéquates, cela peut alors se traduire par l'apparition de fissures ou lézardes sur les murs.

Les aménagements intérieurs surtout s'ils sont rigides (cloisons en carreaux de plâtre, carrelage), peuvent aussi subir les contrecoups de ces mouvement. On estime qu'un tassement différentiel des fondations de l'ordre du centimètre peut suffire à induire ces phénomènes Par ailleurs, les argiles dites « gonflantes » sont dangereuses pour les fondations : tassements en période de sécheresse, soulèvements quand les argiles se réhydratent.

Cette alternance de tassements et de soulèvements provoque des dégâts dans les murs, car ils se font de façon hétérogène sous les fondations. Dans les cas graves, les fissures peuvent atteindre une largeur de 30 à 40 mm (on parle alors de lézardes) et peuvent nécessiter la déconstruction totale de l'ouvrage. Elles peuvent aussi impacter les aménagements extérieurs (trottoirs, escaliers...), les Voiries d'accès, les réseaux d'eau enterrés, ...

II.4.1.2. Affaissement de dallage de maisons individuelles :

Les dallages sur terre-plein des maisons individuelles subissent parfois des affaissements en pied de murs périphériques. Ils se traduisent généralement par l'apparition d'un vide entre le revêtement de sol et la base des plaintes. Des fissures plus ou moins importantes apparaissent dans les cloisons et les revêtements de sol.

Des arrachements de canalisations passant dans ou sous le dallage peuvent également se produire.

II.4.1.3. Effondrement de murs de soutènement en maçonnerie :

Destinés au maintien de massifs de terre de faible hauteur (moins de 2 m en général), ces petits ouvrages annexes de pavillons sont généralement construits en maçonnerie, très souvent sans l'aide d'un bureau d'études. La stabilité des murs de **soutènement** en maçonnerie (blocs de béton, briques pleines, pierres, béton banché non armé) est assurée par leur propre poids (on parle de

« mur-poids »). Pour maintenir son équilibre, le poids du mur doit permettre de contrebalancer (schéma 1)

- ❖ la poussée des terres.
- ❖ les poussées hydrostatiques si les terres sont mal drainées.
- ❖ les surcharges d'exploitation éventuelles (passage et stationnement de véhicules, ...)
- ❖ les chocs éventuels.

ne épaisseur insuffisante de la paroi ou une mauvaise évacuation des eaux de ruissellement peuvent entraîner des fissurations ou le bombement du mur, son basculement partiel. Enfin, suivant la pente générale du terrain surplombant l'ouvrage, le risque de grand glissement doit également être évalué.

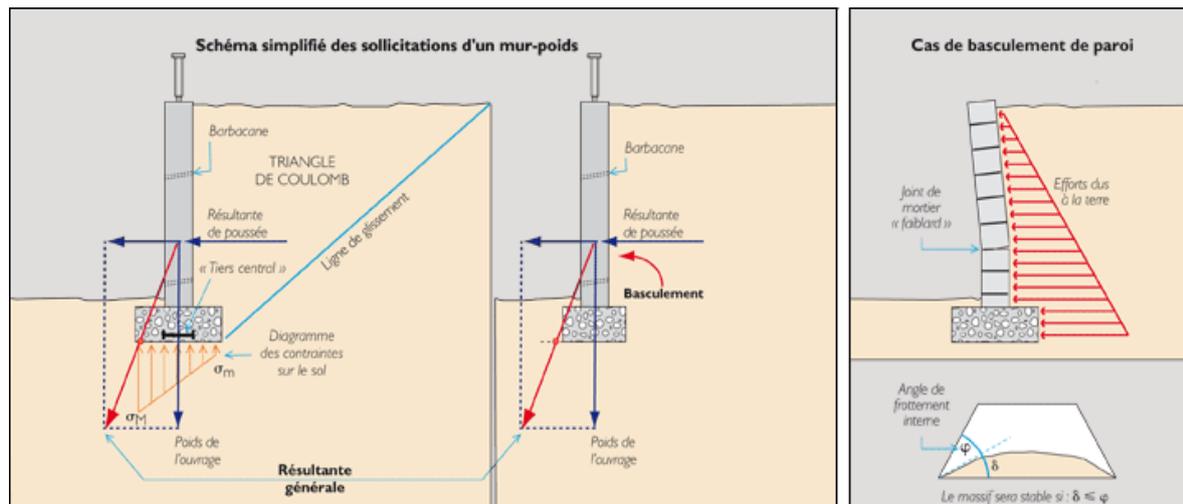


Figure 4: Schéma d'effondrement de murs de soutènement en maçonnerie

II.4.1.4. Désordres des fondations profondes par pieux :

On recourt à des fondations profondes par pieux lorsqu'une solution superficielle (semelles, radier, puits) n'est pas réalisable au vu de l'adaptation au sol de l'ouvrage projeté.

Les désordres qui peuvent affecter ces pieux sont de deux ordres, tassement ou rupture du pieu.

Les réparations en cas de sinistre représentent un coût élevé et peuvent aller jusqu'à nécessiter la destruction de l'ouvrage.

Les désordres peuvent provenir de plusieurs causes :

- ❖ les tassements de pieux peuvent résulter de la non-prise en compte d'un frottement négatif dû à des couches de surface compressibles, et qui s'ajoute, par conséquent, à la charge transmise au pieu par l'ouvrage
- ❖ sur un même terrain, l'interaction des charges entre pieu isolé et groupe de pieux ne sera pas la même, ce qui peut être à l'origine de tassements importants
- ❖ en présence de couches compressibles de surface, chargées par des remblais

Dissymétriques, le fluage des couches molles peut engendrer des efforts latéraux sur le fût des pieux allant jusqu'à leur rupture en l'absence d'armatures.

Les pieux battus peuvent rencontrer de faux refus ou pas de refus dans certains sols. Ce type de pieux se rencontre moins fréquemment compte tenu notamment du risque vis-à-vis des avoisinants (vibrations liées au battage)

II.5. Dégradations affectant les éléments de structure :

II.5.1. Fissures "structurelles" des maçonneries de maisons individuelles :

Les murs extérieurs de structure des maisons individuelles sont souvent constitués de blocs de béton assemblés par des joints de mortier. Leur face extérieure est parfois recouverte d'un enduit hydraulique à base de ciment, confectionné sur place, ou d'un enduit monocouche, prêt à l'emploi (fabriqué industriellement).

L'apparition de fissures structurelles de la maçonnerie liées au fonctionnement de la paroi, sous l'effet de certaines sollicitations, est une des formes des désordres qui peuvent affecter ce type de murs.

Ces fissures peuvent être traversâtes et à l'origine d'infiltrations d'eau.

➤ Causes et conséquences :

- L'hétérogénéité des matériaux ;
- La flexion et le retrait des planchers ;
- Humidité en sous-sol des bâtiments.

II.5.2. Corrosion des armatures du béton armé en façades des bâtiments :

La corrosion est la dégradation d'un matériau par réaction chimique ou électrochimique en présence d'un environnement agressif. La corrosion peut parfois se combiner à des effets mécaniques ce qui donne naissance à des formes de dégradation comme la corrosion sous contrainte et la corrosion fatigue. Les exemples les plus connus sont la dégradation des métaux à l'air, à l'eau ou à l'humidité ce qui entraîne la formation de produits de corrosion comme la rouille sur le fer et l'acier ou la formation de patine sur le cuivre et ses alliages (bronze, laiton). La corrosion touche aussi plus largement toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques etc.) dans des environnements variables (industriels, urbain, rural) ainsi qu'aux hautes températures.

La corrosion est un problème industriel important : le coût de la corrosion recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la défaillance des composantes.



Figure 5: La corrosion des armatures du béton armé

Chapitre III

**Les causes et conséquence des principales
dégradations**

III.1.Généralité :

Les dégradations qui affectent les constructions, peuvent survenir à n'importe quel moment, c'est-à-dire durant la réalisation ou même quelques minutes après, comme elles peuvent se manifester à long terme. Ces dégradations des bétons proviennent des attaques physiques mécaniques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. Devant cet état de cause, les travaux doivent être menés pour déterminer en première urgence les différents types de dégradations, puis les causes probables provoquant leurs apparitions, et enfin choisir les cas de remèdes qui mettront fin à ses dégradations. C'est dans ce but que nous allons mettre en évidence dans ce qui suit les résultats de certains travaux accomplis par des spécialistes du domaine et qui concernent plus particulièrement les problèmes de la pathologie de la construction. Nous choisissons de commencer ce premier chapitre de cette thèse en présentant les indicateurs de durabilités de béton et leurs facteurs et les pathologies correspondante.

Schéma descriptif des pathologies du béton armé :

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton armé durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans ce qui suit : dégradations mécaniques, chimiques, est physiques [16]

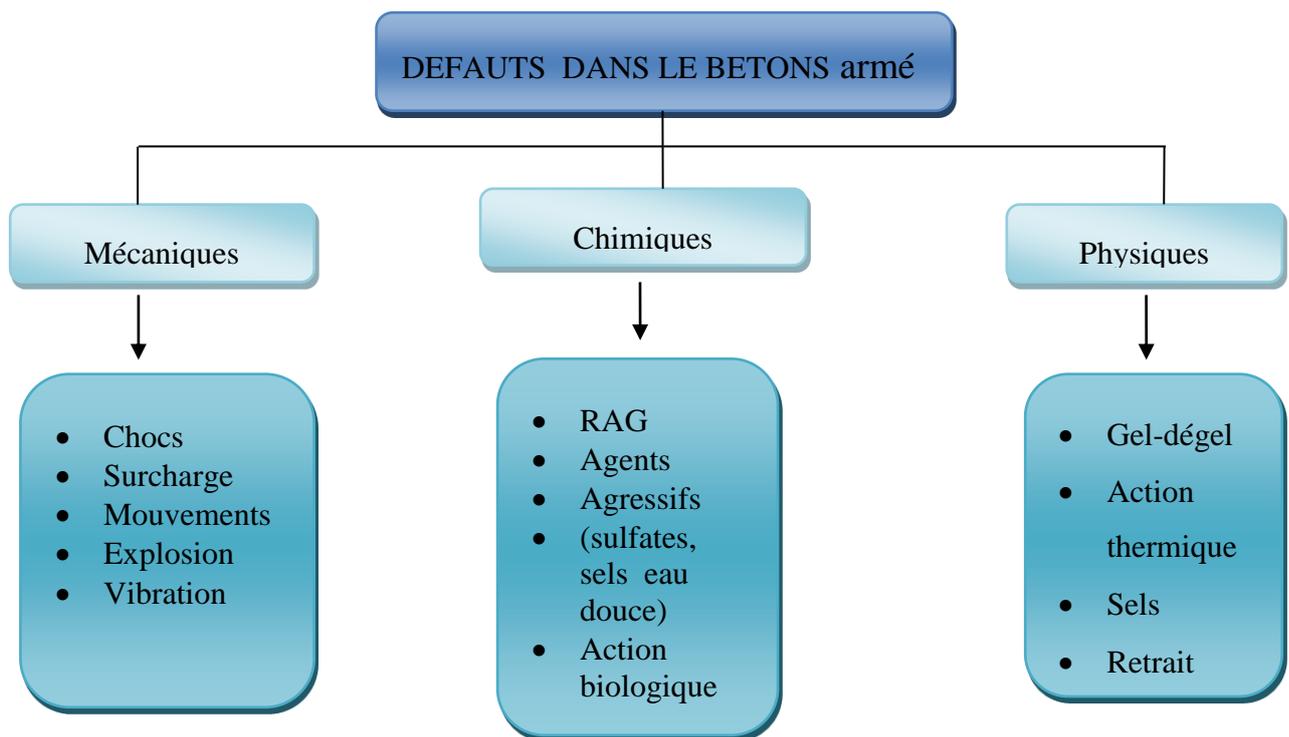


Figure 6: Schéma de dégradation du béton armé

III.2. Facteurs et origines des dégradations :

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques mécaniques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons [16]

III.2.1 Actions physiques :

III.2.1.1. Action de gel-dégel :

Les cycles de gel-dégel provoquent une expansion de la masse du béton jusqu'à fissurer le matériau s'il est de mauvaise qualité. Car la transformation de l'eau en glace se traduit par une augmentation de volume de 9 % qui provoque une expulsion de l'eau hors du capillaire L'eau qui pénètre à l'intérieur des pores de béton ou pate de ciment en plus des sels de déverglaçage versés en surface.

Se gèle est donc augmente de volume générant ainsi des tensions à l'intérieur du béton qui provoquent des fissurations et écailllements du béton (**Figure 7**). Le volume d'air occlus est d'environ 1 à 2%, teneur non suffisante pour faire face au volume d'eau qui gèle.

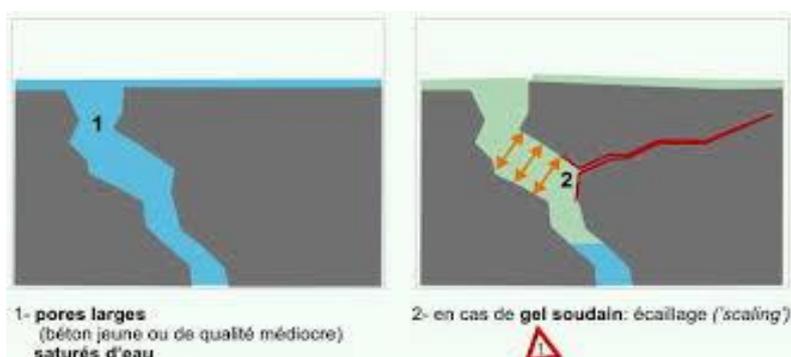


Figure 7: Le mécanisme de dégradation par le gel dégel

Pour résister à ce phénomène et pour empêcher l'effet de gel, l'utilisation d'un agent d'entraineur d'air qui peut créer un réseau de bulle de petite dimension et bien répartie, (**la figure 8**) explique le mécanisme du travail. Ce type d'adjuvant a un double rôle qui s'agit de fractionner les gros bulles en d'autres de faibles dimensions d'une part et d'autre part de maintenir le pourcentage d'air de l'ordre 3 à 8 % du volume de béton [5]



Figure 8: Pont dégradé par l'action du gel

a. Facteurs influençant l'attaque par les cycles gel/dégel:

La détérioration cumulative du béton dépend du nombre de cycles gel-dégel. La sévérité de chaque cycle dépend aussi de plusieurs paramètres, notamment :

- La vitesse de refroidissement ou la formation de glace : plus elle est rapide, plus les pressions développées sont intenses.

- La température minimale atteinte : plus elle est basse, plus l'eau gelable est importante.

Le degré de saturation du béton : plus il est fort, plus la dégradation est importante

- L'air entraîné : plus le volume d'air entraîné est important, plus le béton résiste au gel.

- Le rapport E/C : plus il est élevé, plus la quantité d'eau gelable est importante, plus le béton ne résiste pas au gel.

- La porosité et la perméabilité des granulats utilisés : plus elle est importante, plus les pressions développées sont intenses.

III.2.1.2. Retrait :

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent l'apparition de fissures. Les fissures dues au retrait ne doivent pas être confondues avec les fissures liées à la fonctionnalité des ouvrages (dues à l'application d'efforts trop importants par exemple). Celles-ci étant maîtrisées par les règles de calcul du béton armé. Le phénomène du retrait est due d'une grande part à l'effet de l'eau par évaporation (**Figure 9**), sa valeur varie grossièrement de 2 à 3/10 mm/m, en moyenne. Au contraire, dans l'eau le béton gonfle par absorption d'eau. Avec le temps, le retrait augmente. Mais, en général à un mois d'âge, les 3/4 environ du retrait du béton sont pris.

Le phénomène du retrait augmente principalement avec :

- la quantité d'eau élevée
- le dosage en ciment élevé

L'exposition au soleil et au vent (atmosphère sèche). Il varie également en fonction de :

- la nature des agrégats (de 1, pour des agrégats de type quartzite, à 3, pour des agrégats de type argile expansée) ;
- le dosage en sable (en particulier en raison de la proportion de fines) ;
- la nature du ciment ;
- la forme de l'élément [5]

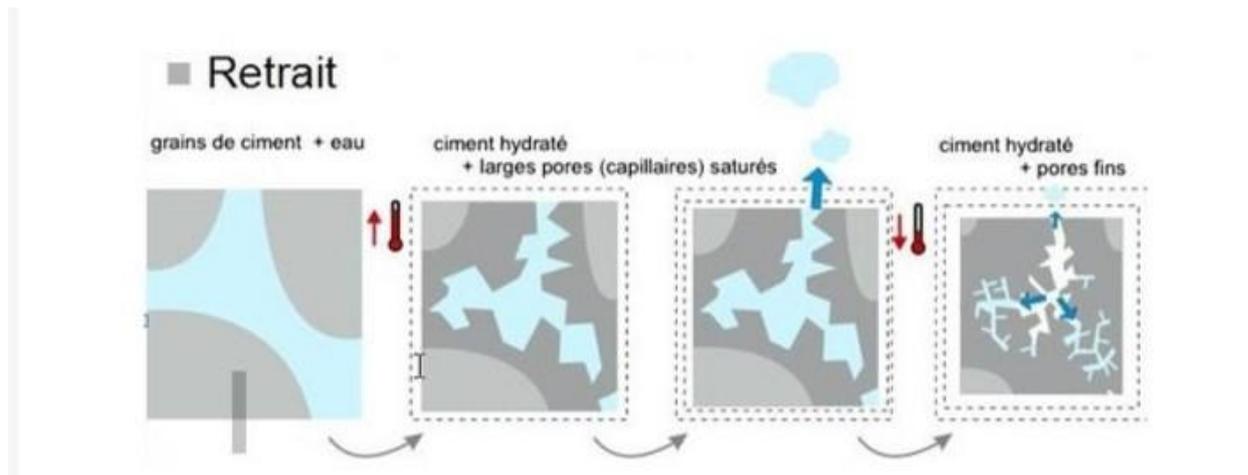


Figure 9: Différentes types de retrait

On distingue 4 types de retrait :

- ❖ **Le retrait plastique** : créé par la dessiccation de la pâte de ciment au début du phénomène d'hydratation.
- ❖ **Le retrait par auto-dessiccation** : de la pâte de ciment au cours de l'hydratation.
- ❖ **Le retrait thermique** : dû aux effets des gradients de température qui se manifestent dans le béton lors de la dissipation de la chaleur d'hydratation.
- ❖ **Le retrait à long terme du béton durci ou retrait proprement dit**, dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton à la poursuite de l'hydratation du liant [5]

III.2.1.3. Ressuage :

Le ressuage correspond à l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la face supérieure du béton frais. Il peut aussi se manifester en dessous des barres d'armature horizontales situées au voisinage de la face supérieure. Ces barres constituent des points fixes qui gênent le tassement, ce qui engendre la création des fissures qui pénètrent jusqu'au lit d'armatures. Dans l'exemple suivant, on constate qu'une partie de l'eau de gâchage s'est accumulée à la surface d'une dalle en béton fraîchement coulée.

III.2.1.4. Érosion du béton :

Malgré sa résistance mécanique, le béton reste un matériau qui peut être fragilisé par son environnement. Le vent, par son action battante, l'eau de pluie par son écoulement, l'action

des cours d'eau et de l'eau de mer conduisent t à l'érosion du béton. Ceci réduit l'enrobage des armatures et facilite la pénétration des agents agressifs.

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



Figure 10: Erosion d'un béton

III.2.2.Action thermique:

L'action de la haute température sur les constructions en béton armé est une action désastreuse qui peut même arriver à une ruine totale de l'ouvrage. En somme, elle est liée à deux types essentiels de dégradation, l'écaillage et éclatement du béton et la perte de résistance mécanique [6]

III.2.2.1. Écaillage et éclatement du béton :

Le comportement du béton vis-à-vis à l'éclatement dépend de la sollicitation thermique. En fait, l'écaillage se produit généralement dans des températures comprises entre 190 °C et 350 °C, généralement

Une élévation de la température entraîne une évaporation d'eau contenant dans le béton, d'abord l'eau dans les pores, ensuite l'eau dans les micropores, et l'eau liée dans les hydrates. Ce vapeur peut causer des contraintes de traction importantes, qui peut conduire à un détachement des morceaux de tailles différentes de béton dans des points singuliers comme les bords et les angles, et même à un éclatement explosif local au niveau de la surface exposée du béton. De plus, la pression induite par les dilatations différentielles des composants du béton peutaussi provoquer des fissurations internes qui peuvent propager jusqu'à la surface, et traduit par un écaillage. Les différents facteurs qui favorisent ces deux phénomènes sont :

- La faible perméabilité.
- Les sollicitations thermiques

- Le taux d'humidité et d'eau libre dans le béton
- Les dilatations thermiques empêchées.
- La montée rapide en température [6]

III.2.3. Dégradations chimiques :

III.2.3.1. Réactions et attaques selfatiques :

La figure 11 donne les différentes sources de sulfates :

- Internes au béton
- Externes au béton

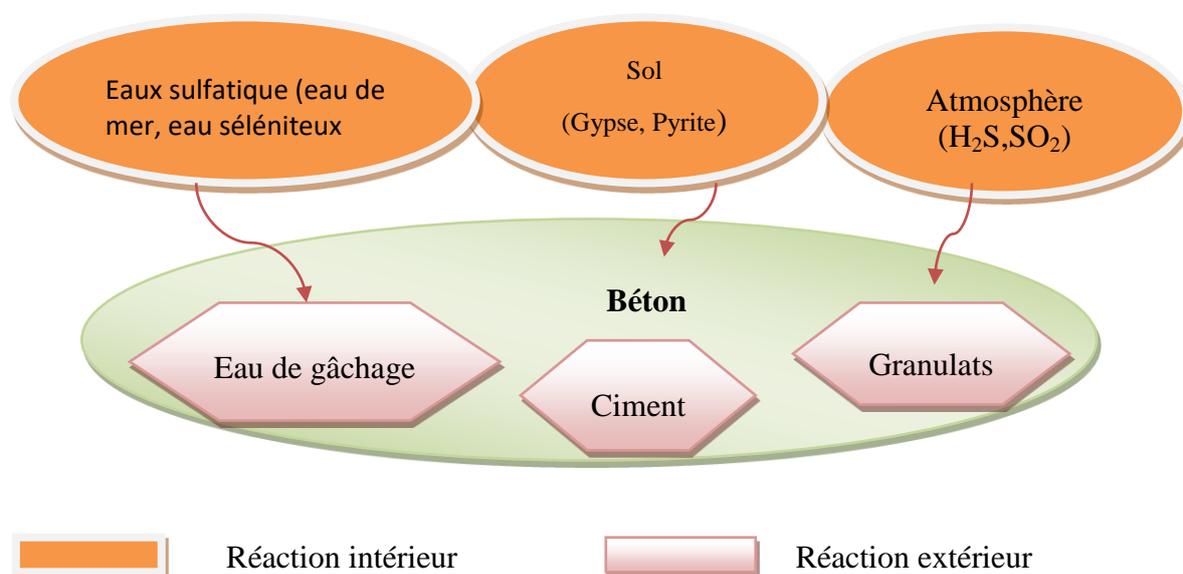


Figure 11: Schéma des sources de sulfates

➤ Réaction selfatiques interne :

La réaction selfatiques interne (**RSI**) est une réaction pathogène qui est due à la présence d'un hydrate expansif, l'étrangéité, dont la formation dans un béton durci peut provoquer des contraintes importantes se traduisant par une expansion du béton [5]

➤ Attaque Selfatiques Externes :

L'attaque selfatiques est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimio-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du

matériau cimentaire (**Figure 12**), à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact [5]

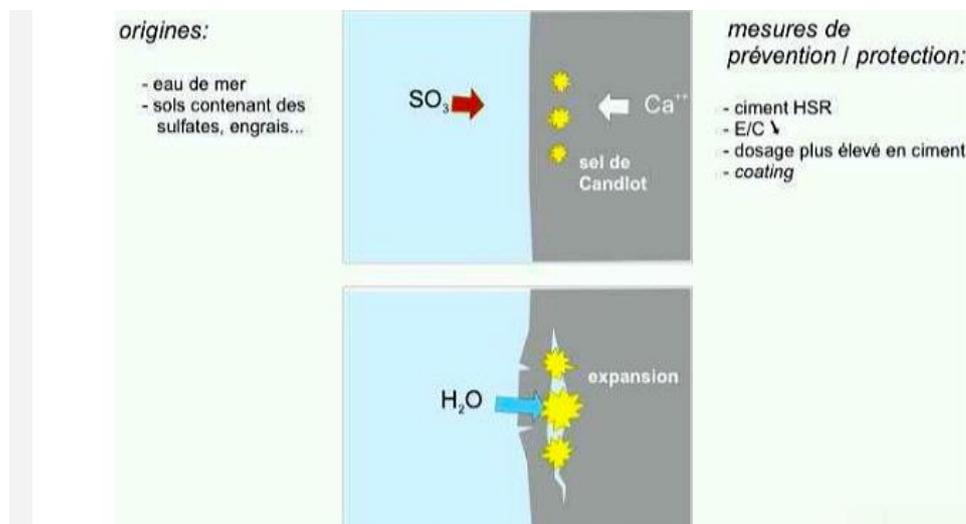


Figure 12: Mécanisme d'attaque selfatique externe

III.2.3.2. Carbonatation :

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie, mais avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes.

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (**CO₂**) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement. Les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de Ces produits restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton. Le CO₂ pénètre sous forme Gazeuse dans le béton d'enrobage et réagit avec les hydrates du ciment, en particulier le portlandien, pour former en présence d'eau, de la calcite.

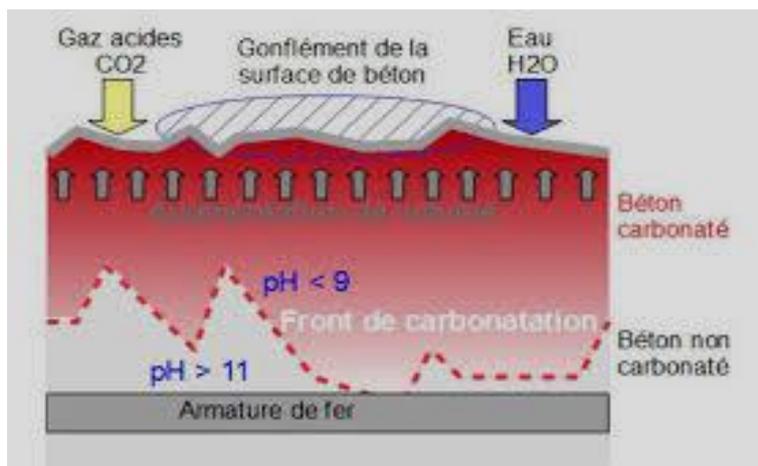


Figure 13: Processus de carbonations

Le CO₂ présent dans l'atmosphère se diffuse dans les pores du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle.

Cette acidification conduit à la dissolution des hydrates et notamment du portlandien, abaissant ainsi le pH de la solution à une valeur inférieure à 9, en réduisant la passivation des aciers et permettant l'amorçage de la corrosion des armatures.

III.2.4. Action mécanique :

Les dégradations peuvent être d'ordre mécanique, à la suite de chocs, de vibration, de tassement géotechniques ... Ces désordres se traduisent souvent par l'apparition de fissures ou d'éclats éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure.

Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Les agressions de type mécaniques peuvent survenir à la suite de :

III.2.4.1. Chocs :

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs. Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier.



Figure 14: Chocs de véhicule sur ponts

III.2.4.2. Érosion :

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

III.2.4.3. Cavitation :

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

III.2.4.4. Abrasion :

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

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

III.2.5. Actions environnementale :

III.2.5.1. Le climat :

Une fois construits, les ponts font partie intégrante du paysage et sont de ce fait soumis aux aléas de l'environnement qui les entoure. Trois facteurs essentiels sont à considérer : la température, l'eau et le vent [7]

III.2.5.2. La température :

De façon générale, la température est un paramètre important dans l'activation des Réactions chimiques dans le cas des ciments. Une température élevée joue un double rôle :

- elle intervient sur la cure du béton qui doit être particulièrement soignée afin d'éviter des fissures de retrait préjudiciables à sa bonne résistance ultérieure.
- elle accélère la cinétique des réactions chimiques : celle de formation des hydrates, mais aussi celle des réactions chimiques de dégradation [7]

III.2.5.3. L'eau :

Est également une source de désordres pour les ouvrages. Pour les structures en béton, c'est l'infiltration de l'eau dans le matériau qui est néfaste (phénomène de gel/dégel, corrosion des armatures) [7]

III.2.5.4. Le vent :

Son action sur les structures se manifeste de nombreuses manières : cela va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à la pression dynamique appliquée aux structures responsables de la fatigue et à leur mise en mouvement éventuelle [8]

III.3. Conclusion :

Les données traitées dans ce chapitre nous mènent à conclusion que les constructions en béton armé souffrent de plusieurs phénomènes des dégradations plus ou moins évidents.

Ces dernières portent sur techniques et les conditions de mise en œuvre les non-conformités propriétés du béton sur chantier .et d'autres raison de détérioration telles que action mécanique et chimique et physiques aussi la dégradation environnement.

En l'occurrence, ces contraintes exigent de bien entretenir le béton avant et lors de la conception des ouvrages.

Le bon entretien du béton inclus aussi le suivi et le diagnostic détaillé de l'état de santé des ouvrages, ou autrement dit, le bon diagnostic.

Donc L'étude de ces pathologies et la mise en place des solutions/traitement adéquats. Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'étude des méthodes de diagnostic et d'évaluation des dégradations ouvrages en béton armé.

Chapitre IV

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

IV.1. Introduction :

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

Généralement un diagnostic est effectué quand un client a découvert un défaut dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de désordres. Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités.

Dans un premier temps, il permet de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps (à court, moyen ou long terme) afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet des différents troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, de prévoir des réparations si nécessaire.

L'autre finalité d'un diagnostic consiste à répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat [10]

IV.2. Les objectifs du diagnostic :

- Identification de l'origine des désordres ;
- Évaluer l'étendue de sa propagation dans l'espace ;
- Prédire son développement potentiel dans l'espace et dans le temps d'absence d'intervention ;
- Estimation des conséquences des désordres sur la capacité portante et l'intégrité de l'ouvrage et les personnes ;
- Détection de produits nocifs pouvant être présents dans la structure : amiante, plomb.... Etc.
- Définition des suites à donner et des solutions possibles de réparation ou de renforcement [10]

IV.3. Les principales étapes d'un diagnostic :

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

IV.3.1. Visite préliminaire :

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

Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigation. Elle comprend :

- La collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferrailage, Environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- Un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies.

Il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées et d'utiliser les moyens d'accès les plus adaptés. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, Alkali-réaction), pourront être envisagés à cette étape afin de déterminer le niveau de dégradation et d'orienter le programme d'analyse futur

Lors d'une visite préliminaire, l'ingénieur doit se poser les questions suivantes :

- ✓ Pourquoi les armatures se sont-elles corrodées ?
- ✓ Quelle est l'incidence de la corrosion sur la sécurité de la structure ?
- ✓ Les armatures se corrodent-elles également aux zones ne présentant pas de dégâts visibles ?
- ✓ Quelle stratégie de réparation adopter et selon quelle urgence ?

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- ✓ D'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres ;
- ✓ D'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les suggestions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc. ;
- ✓ D'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garantie est nécessaire ;
- ✓ De faire évaluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée.)
- ✓ Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage [10]

IV.3.2. Collecte des documents :

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

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

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

IV.3.3. Préparation de l'intervention :

A partir de la visite sur site et de l'étude des documents collectés on peut déterminer précisément le nombre et le type de mesures à réaliser pour répondre au mieux à la demande du client. Avant l'intervention il faut déjà avoir déterminé quelles informations sont importantes pour réaliser la mission, quelles sont à priori les dégradations que l'on veut mettre en évidence [10]

IV.3.4. Inspection :

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

- ✓ La présence d'anciens revêtements ou de produit d'imprégnation
- ✓ L'apparence de la surface du béton, stalactites, efflorescences, traces de rouille;
- ✓ La présence de fissures (ouverture, réseau) ;
- ✓ La détérioration de la peau du béton ;
- ✓ Les armatures apparentes et les épaufrures ;
- ✓ La déformation de la structure ;
- ✓ La détection de zones sonnantes creuses ;
- ✓ Les traces d'humidité.

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide de défauts [10]

IV.3.5. Essais en laboratoire :

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

Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure, elles sont écrasées afin de connaître la résistance à la compression du béton [11]

IV.3.6. Choix des investigations :

Le choix des investigations pour le diagnostic de structure dépend Le choix des investigations dépend de cinq critères :

- **Type de mission à réaliser :** Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes [12]
- **Nature des matériaux :** Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre [13]
- **Type de structure** Géométrie et taille de l'ouvrage [13]
- **Etat de l'ouvrage** Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton
- **Environnement de l'ouvrage** L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage, car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques. De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être une contrainte quant à la réalisation d'une investigation. En l'occurrence, on en nécessite l'utilisation des moyens spécifiques telle que des nacelles, échafaudages...etc. [12]

IV.3.7. Types d'investigations :

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories : soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite : [14]

- **Investigations non destructives :**

Le principe des investigations non destructives réside dans le fait qu'on ne touche pas directement à la structure. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic sans risques de porter atteinte à son intégrité [14].

- **Investigations destructives (Analyse en laboratoire) :**

Il peut être utile d'utiliser des tests destructifs si possible. Ces méthodes permettent souvent d'échantillonner et de comprendre les propriétés des matériaux. Décrire leurs propriétés mécaniques et chimiques.

Chapitre V
Principales techniques de réparation et de réhabilitation
des constructions en béton armé

V.1. Introduction :

La réparation et le renforcement est une opération fixée à la suite d'une étude qui a porté sur la recherche des causes des désordres et la mise au point d'un projet de réparation ou renforcement. Il reste à choisir les matériaux et produits, le matériel de mise en œuvre, à réaliser les travaux et à contrôler l'ensemble de l'opération.

La réparation consiste à remettre, partiellement ou totalement, un ouvrage altéré dans un état de service attendu. Elle doit être précédée : d'une réflexion sur le choix du type de réparation, d'une étude approfondie des différentes phases de la réparation, tenant notamment des conditions d'exploitation et servant à définir les conditions de réception et de contrôle de l'efficacité de la réparation dans le temps, réalisés par un bureau d'étude spécialisé dans la réparation des ouvrages en béton.

Un maître d'œuvre spécialisé est requis pour cadrer le marché des travaux et surveiller leur réalisation.

Les opérations sont réalisées par des entreprises spécialisées dans la réparation des ouvrages d'art.

Toutes les réparations effectuées sur un ouvrage font l'objet d'un archivage dans le dossier de l'ouvrage.

V.2. Les principales techniques de réparation et de renforcement des constructions en béton :

V.2.1. Ragrèages :

Le ragréage est une opération qui permet de combler les trous et de masquer les imperfections du béton par l'application d'un enduit de finition sur la surface travaillée. Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydro démolition, le décapage au marteau pneumatique ou, dans les cas extrêmes, au brise-béton. Elles sont toutes traumatisantes pour le support à des degrés divers et doivent donc être sélectionnées avec soin en fonction des objectifs recherchés.

Pour un décapage en surface, le sablage (à sec ou humide) ou la projection d'eau sous très haute pression sont des techniques qui permettent d'obtenir d'excellents supports. Le décapage thermique, le décapage chimique et le rabotage mécanique sont des techniques déconseillées en raison de leur brutalité.

En présence d'aciers apparents corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes.

Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dégradée du béton.

Il existe sur le marché une grande quantité de produits de ragréage qui peuvent être classés en trois catégories principales :

- ✓ les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines et éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés ;
- ✓ les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortiers), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxydiques ou polyuréthanes ;
- ✓ les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymère organique réactif [16]



Figure 15: Le ragréage d'une structure de béton

V.2.2. Béton projeté :

La réparation à l'aide de béton projeté consiste à piquer les zones dégradées et à projeter sur l'ensemble de l'ouvrage du béton par voie humide. Cette surépaisseur de béton est moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques par les chlorures.

Le béton projeté n'étant pas encore carbonaté, il stoppe l'évolution de la carbonatation, le temps d'être lui-même complètement carbonaté. Il empêche également la pénétration d'humidité grâce à sa faible porosité, ce qui protège les armatures de la corrosion.

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires : la projection par voie sèche et la projection par voie mouillée.

V.2.2.1. Projection par voie sèche:

Avec cette technique, le mélange des constituants sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans pré mouillage, l'eau est introduite droit de la lance de projection, tandis qu'avec prémouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussière [1]



Figure 16: Projection par voie sèche

V.2.2.2. Projection par voie mouillée:

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense.

Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection.

Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

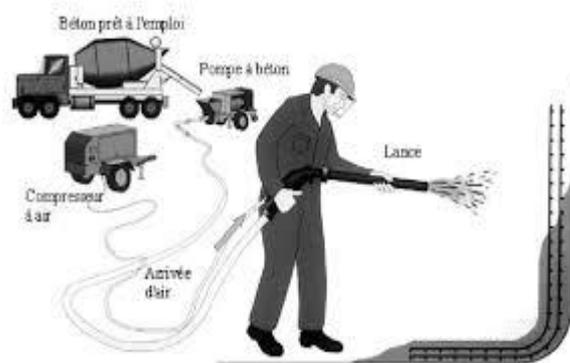


Figure 17: Projection par voie mouillée

Chacun des procédés ayant ses avantages et ses inconvénients, il convient donc de choisir le mode de projection à utiliser suivant la nature des travaux à réaliser.

Actuellement, l'emploi de la voie sèche est fortement recommandé pour la réparation des ouvrages en béton [16]

- **Etude comparative (Ragréage avec passivant v/s Béton projeté) :**
 - **Intérêt de la technique :**

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...). Le choix de la technique de projection est fonction :

- De l'importance du chantier La technique par voie sèche qui offre une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents ;
- De la nature des travaux à effectuer ;
- Des cadences de réalisation souhaitées : la technique par voie humide permet des capacités de production élevées ;
- Performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.
- L'adjonction de fibres (dosage 35 à 50 kg/m³) offre au béton projeté des propriétés complémentaires, fonction du type de fibres : limitation des effets du retrait, amélioration des résistances mécaniques, meilleure cohésion du béton à l'état frais.

- **Réalisation** : Les opérations de bétonnage comprennent la succession des étapes suivantes :
 - préparation du support ;
 - mise en place des armatures : treillis soudés, barres ;
 - projection du béton par passes successives ;
 - mise en œuvre d'une couche de finition éventuelle et protection parcourue.

V.2.3. Coulage ou injection de béton ou de mortier :

Lorsque le volume de béton à reconstituer est assez important ou de forte épaisseur (au moins 5 à 10 cm), les techniques de ragréage et de béton projeté peuvent être inadaptées pour des raisons techniques ou économiques.

Une technique alternative permet alors de reconstituer une partie de structure en béton dégradé : le coulage ou l'injection de béton, de mortier ou de coulis. Ce type de réparation est généralement durable, pourvu que la compatibilité chimique entre le nouveau ciment et le ciment en place ait été vérifiée.

En raison des épaisseurs mises en œuvre, on ne rencontre pas les phénomènes de gradient thermique de surface qui endommagent parfois la surface de reprise et provoquent le décollement des ragréages. En plus, les épaisseurs mises en œuvre permettent d'armer le béton rapporté et de le connecter à son support. La technique traditionnelle de remplissage par coulage consiste à remplir les coffrages à l'aide de béton ou de mortier en évitant l'emprisonnement d'air et la ségrégation du matériau coulé. Mais on peut également mettre en place, dans un premier temps, les granulats à l'intérieur du coffrage, puis injecter un coulis de ciment ou un mortier fluide pour remplir les interstices entre les granulats.

La principale difficulté de cette méthode réside dans la maîtrise des vides laissés entre les granulats, car des bouchons peuvent se former lors de la mise en place des granulats sans que l'on puisse toujours s'en apercevoir.

Enfin, une injection de coulis peut être pratiquée lorsque l'on désire consolider des nids de cailloux qui présentent une certaine résistance et que l'on ne souhaite pas détruire. Le coulis doit être suffisamment fluide pour remplir les interstices restés vides. L'opération d'injection nécessite le perçage de deux trous dans le nid de cailloux afin de disposer le tube d'injection, équipé d'une vanne permettant de maintenir une légère pression après l'injection, et le tube servant d'évent.

V.2.4. Renforcement par ajout d'armatures :

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant, à disposer des aciers passifs et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton (voire du mortier) coulé en place.

Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la « règle des coutures », en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage. Si un pourcentage important de la section des aciers existants a disparu en raison de la corrosion, il peut être nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers passifs. Dans le cas des ragréages, lorsque les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est alors possible de souder les nouvelles armatures sur les aciers existants, à condition que la soudabilité de ces derniers ait été vérifiée au préalable.

Si les aciers existants ne sont pas soudables, on peut utiliser des coupleurs mécaniques dont l'encombrement peut nécessiter localement un dégagement plus important de béton.

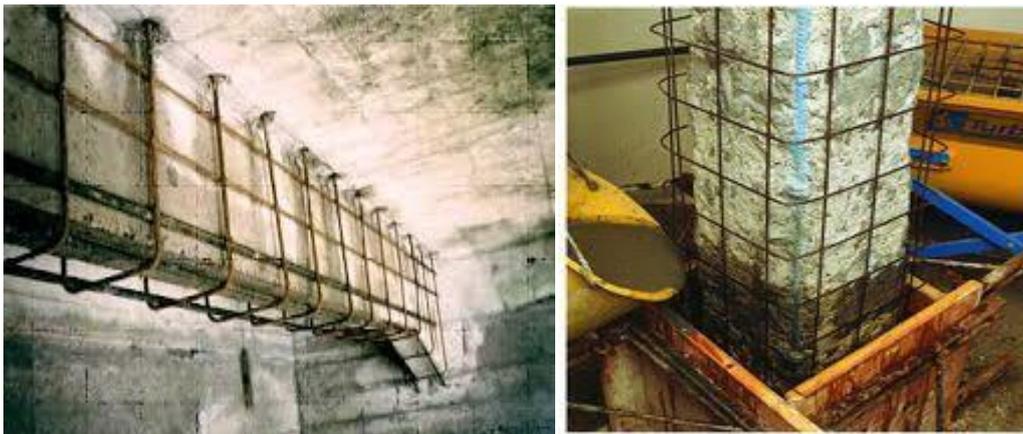


Figure 32: Ajout de mortier de réparation

V.2.7. Protection du béton :

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis-à-vis des agressions atmosphériques, de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis-à-vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une plus grande durabilité de la réparation. On distingue :

- Les hydrofuges de surface ;
- Les minéralisateurs ;

- Les peintures ;
- Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère ;
- Les revêtements plastiques épais ;
- Les produits d'imprégnation inhibiteurs de corrosion, dont le mono-fluor phosphate, (MFP) dont le but, en pénétrant à travers le béton, est de ralentir et de stopper la corrosion des aciers. Apparus récemment sur le marché, leur mode d'action est encore mal connu.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans la majorité des pays, le patrimoine d'ouvrages d'art et de bâtiments existant est confronté, d'une part au développement croissant du trafic et d'autre à un problème de vieillissement doublé d'une obsolescence accrue sur certains axes routiers. En Algérie, cet état de chose étant issu de la politique qui a été suivie durant plusieurs décennies et qui a gouverné l'aménagement des infrastructures d'une façon générale et des ouvrages d'art en particulier est plus ressenti.

Cette politique a été caractérisée par :

- un effort accru alloué à la création d'ouvrages neufs au détriment du maintien du parc existant. Il s'en est suivi un faible intérêt pour la gestion et la sauvegarde de ce dernier. Cette question n'est pas le propre de l'Algérie. En effet, plusieurs pays même les plus développés (USA, Europe) ont connu des situations pareilles et la gestion des ouvrages d'art en tant que fonction à part entière n'a été prise au sérieux que vers les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix.

- une mise à niveau des ouvrages assez en retard par rapport aux exigences de plus en plus renouvelées et qui sont dictées par le développement en volume et en qualité du trafic à l'échelle nationale,

- un faible encouragement des métiers et de la technologie permettant de meilleures conditions et outils pour la maintenance des ouvrages en service, (évaluation de leur état et la sauvegarde du capital qu'ils constituent)

Aujourd'hui, la conscience est prise, aussi bien par les maîtres d'ouvrages que par les professionnels opérant dans le domaine, de l'intérêt et des enjeux économiques et sécuritaires que constituent la sauvegarde et la mise à niveau du patrimoine existant d'ouvrages d'art. En effet, il est irrévocablement démontré qu'il est généralement avantageux, sauf pour des raisons très particulières :

- de sauvegarder un ouvrage en service pour prolonger au maximum sa durée de vie,
- d'opter pour des ouvrages avec des structures évoluées, des matériaux et des équipements de grandes performances ; coûteux à l'étape de projet mais permettant des économies substantielles en terme de durabilité et de minimum d'entretien,

- d'intervenir rapidement et même de façon préventive, pour la maintenance, l'amélioration du niveau de service et le confort des ouvrages de manière à épargner les usagers et la communauté des dépenses supplémentaires liées à l'utilisation des ouvrages défaillants (perte de temps devant les franchissements étroits, déviations en cas de problème ou d'accident, limitation de charge, etc.)

De même que le capital matérialisé par les ouvrages d'art et qui a été accumulé avec le temps est énorme ; ce qui rend impossible son renouvellement. La taille de ce parc ne cesse d'accroître année après année rendant ainsi les efforts de plus en plus conséquents

Il s'en suit que seule une politique adéquate assortie de moyens et outils appropriés est en mesure d'assurer les principaux objectifs ; à savoir :

- assurer la conservation des ouvrages en prolongeant leur durée de vie au maximum possible, moyennant une maintenance soutenue,

- épargner la communauté des incidences néfastes (économiques, sociales, ...) liés à des défaillances d'ouvrage et à des accidents à la hauteur des franchissements,

- adapter le niveau et la qualité de service des ouvrages au développement du trafic et des besoins des usagers.

Ainsi, il est temps de lancer une large réflexion pour la mise en place d'une politique rationnelle de gestion des ouvrages d'art en service.

Cette réflexion doit aboutir à la conception et à la mise en place d'un système de gestion, de surveillance et d'entretien des ouvrages d'art et des bâtiments publics dans sa composante opérationnelle.

De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre des pathologies alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit à une maîtrise insuffisante des méthodes de diagnostic et d'évaluation, soit à une mauvaise démarche adoptée lors des réparations ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate et inefficace.

L'objectif visé ici était :

- d'expliquer les démarches de suivi, d'inspection et d'entretien des structures.

- de donner les étapes à suivre pour pouvoir établir un diagnostic fiable sur un ouvrage en béton armé ;

- de présenter les contraintes et les exigences dont il faut tenir compte lors d'une réparation ;
- de donner quelques mesures préventives contre la corrosion, prévenir valant mieux que guérir.

Il est donc clair qu'une marge d'appréciation assez grande est laissée au surveillant l'ouvrages d'art qui devra toujours s'efforcer d'analyser le plus finement possible le comportement mécanique des structures qu'il a à inspecter et signaler le cas échéant au gestionnaire les difficultés rencontrées.

Quelques remarques doivent être faites pour assurer une meilleure durabilité des constructions.

- L'appréciation de la gravité d'un défaut doit tenir compte chaque fois que cela est possible, de l'évolution de ce défaut dans le temps. Il est donc très important à chaque visite d'ouvrage d'effectuer un relevé précis de ces dommages et de leurs causes pour pouvoir établir un programme adéquat de réparation ou de réhabilitation.

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

Concernant les différentes techniques de réparation, nous nous sommes appuyés sur des recherches menées sur les projets de réhabilitation divers.

La nécessité de réaliser des programmes particuliers à chaque type d'ouvrage, que ce soit de diagnostic, de réparation. En effet, certaines de ces techniques ne sont pas utilisées couramment dans les agences et les détails du mode opératoire sont rapidement omis. Pour les techniques qui sont plus couramment utilisées, il est possible qu'elles soient mal appliquées. Dans les deux cas, ce sont des sources d'erreurs et de mauvaise interprétation, ce qui peut engendrer des problèmes lors de la réhabilitation d'un ouvrage.

Conclusion Générale

Ce Projet de Fin d'Études nous a permis de découvrir de nouveaux aspects de l'ingénierie du génie civil. Lors de notre formation, nous étudions principalement les différents modes de construction et les matériaux utilisés dans le neuf, mais très peu de connaissances ont été acquises concernant la réhabilitation d'ouvrages existants. Pourtant, ce domaine tend à se développer surtout dans le cadre du développement durable.

Références Bibliographiques

- [1] NAZIHA, OUITAS. « *Surveillance entretien et réparation des ouvrages en béton* ». *Ecol Nationale polytechnique.Génie Civil*. 2016. p. 21,31,32,33.
- [2] Ghobrini, Mohammed Tadjeddine et Cheikh, Amina.«*l'impact de la corrosion des armatures sur les dégradations du béton armé*». Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.génie civil. 2018 / 2019. p. 26,35.
- [3] Expertravalement, site en ligne«*Les différents types de fissures en maison* ». [«https://www.expert-ravalement.fr/les-differents-types-de-fissure-de-maison/»](https://www.expert-ravalement.fr/les-differents-types-de-fissure-de-maison/). [En ligne] [Citation : 10 03 2022.]
- [4] SLIMANIAmmar et GHEDIERBrahim Nouredine.Projet de fin d'étude«*Effets de la corrosion sur les installations gazières et leurs méthodes de protections Cas de SH /HASSI R'MEL.Génie appliqué*». Université Institut de technologie de Ouargla. s.l. : Kasdi Merbah.
- [5] Hamed, Aboul kacem Moutie. « *Diagnostic des ouvrages en béton armé Cas du centre intensif des langues* ». l'université de Biskra. 2019 - 2020. p. 7,8,9,10-13.
- [6] SIAD, Ali.«*Pathologie des constructions en béton diagnostic et méthodes de réparations Etude de cas de l'effet combiné de pré-fissuration/corrosion sur le comportement t des poutres en béton armé*». Université Mohamed Boudiaf-. M'sila : s.n., 2017/2018. p. 47,48.
- [7] LARBI, DJAMEL.« *Facteurs influant sur la durabilité des structures en béton armé dans le nord Algérien* ». universite akli mohand oulhadj .génie civil . bouira 2015/2016. p. 15.
- [8] TANKEU, NDANGA et TATIANA, SYLVIANE.«*Pathologie, évaluation et réparation des ponts en béton armé étude de cas s : Ouvrages sur le tronçon Atakpamé – de la route nationale n°1 au Togo*». p. 13-16.
- [9] ANTOINE, DECROUY. Projet Ecole «<http://www.projetecolo.com/degradation-de-l-environnement-definition-cause-et-consequences-108.html>». [En ligne] [Citation : 18 05 2023.]
- [10] SAHARI, OUBAIDA et DJENANE, KHEIREDDINE.«*solutions techniques pour la réparation et le renforcement des constructions en beton*». medea : s.n., 2020. p. 17,23,24.

- [11] VALENTINE, RINCKER. «*Diagnostic des structures existantes du relevé visuel au confortement des ouvrages en n passant par les moyens d'investigations des structures en béton*». 2009. p. 67.
- [12] HAMOUCH, Meryem. «*Pathologie et réparation des ouvrages en béton armé .Génie civil et hydraulique* ». Université 8mai 1945. Guelma : s.n., 2013. p. 22.
- [13] REZALI, Zohra et BENCHAA, Aouicha Ikram. «*pathologies et rehabilitations des ouvrages en genie civil: cas de l'institut de technologie agricole (i.t.a)*»,mostaganem. 2021/2022. p. 43.
- [14] KHOBIZI, Sena. « *rehabilitation des structures en beton arme.genie civil*». l'université 08 mai 1945 de guelma. 2017.
- [15] JOSEPH, Abou Zeid. « *d.Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé*».Génie Civil.Université libanaise : Institut des Sciences Appliquées et Économiques. 2016. p. 11.
- [16] BOUSMAT, ABDELKADER et BELHACEN, Mohamed Alaà Eddine,projet de fin d'étude«*Synthèse bibliographique sur les principales dégradations affectant les constructions en béton armé* ». Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.Gènie Civil. 2019-2020. p. 19,36,54

