



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



N° d'ordre : M2. /GC/2024

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
DE MASTER ACADEMIQUE**

Filière : Génie-civil

Option : Structure

Thème

**Techniques Des Réhabilitations et de
renforcement des structures des bâtiments**

Présenté par :

LAIDI Nadia

SAYAD Khadidja

Soutenu le 27/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. BOUHALOUFA Ahmed	Président	Université de Mostaganem
Mr. BOUHADJEB Kadda	Encadrant	Université de Mostaganem
Mr. BENSOUA Mohamed	Examineur	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025



Remerciement

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 travaille 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 étudiant de la promotion master 2.



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

غالبًا ما تكون الاضطرابات التي تحدث على مستوى الهياكل بسبب تلف المواد المستخدمة، أو بسبب التغيرات في الوظائف (على سبيل المثال، زيادة أحمال التشغيل الزائدة)، ونقص الصيانة، وما إلى ذلك. ويتطلب إجراء تشخيص جيد معرفة محددة بسلوك الخرسانة تحت الأرض. تأثير العوامل العدوانية التي يتعرض لها وسلوكه الميكانيكي. بعد التشخيص، ومن أجل علاج هذه المشكلة، من الضروري للغاية تنفيذ طرق: إعادة التأهيل والإصلاح؛ أو التعزيز. الهدف من هذا العمل دقيق، وهو أن نكون قادرين على تنفيذ الخبرة والجمع بين عوامل التأثير على تدهور الهياكل الخرسانية المسلحة ووضع خطة إعادة التأهيل.

الكلمات المفتاحية: المتانة، التدهور، التشخيص، إعادة التأهيل، الهياكل، الخرسانة المسلحة

Abstract

Structural disorders are often due to the use of materials of the change in functionality For example increased operating overhead, the lack of maintenance. Establish a good diagnosis impose particular knowledge of the behaviour of concretes under the influence of aggressive agents to which it is exposed; of its mechanical behaviour. 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

<i>Remerciement</i>	_____
<i>Résumé</i>	_____
<i>ملخص</i>	_____
<i>Abstract</i>	_____
<i>Chapitre I</i>	_____
<i>Introduction sur la durabilité des constructions en béton armé</i>	_____
I.1 Introduction.....	1
I.2 Objectif du projet de fin d'étude.....	2
<i>Chapitre II</i>	4
<i>Description des dégradations potentielles affectant les constructions en béton armé</i>	4
II.1 Généralité	5
II.2 Dégradations affectant le béton armé.....	5
II.2.1 La corrosion des aciers dans le béton armé	5
II.2.2 La fissuration du béton armé.....	5
II.2.3 Délamination	6
II.2.4 Boursouflures	6
II.2.5 Cratères d'éclatement.	7
II.2.6 Mauvais positionnements des armatures	8
II.2.7 Mauvaise qualité des bétons employés	8
II.2.8 Vibration trop importante	8
II.2.9 Surcharges	8
II.3 Dégradations affectant les fondations.....	8
II.3.1 Les mouvements de fondations d'une maison individuelle	8
II.3.2 Désordres dans les voiries et réseaux divers.....	10
II.4 Dégradations affectant les éléments de structure	12
II.4.1 Fissures "structurelles" des maçonneries de maisons individuelles	12
II.4.2 Corrosion des armatures du béton armé en façades des bâtiments	13
II.4.3 Désordres de dallages à usage industriel - tassements, fissurations	15
II.4.4 Désordres affectant les balcons	15
II.4.5 Désordres sur ossatures en éléments préfabriqués en béton armé ou précontraint.....	16

<i>Chapitre III</i>	17
<i>Causes et conséquences des principales dégradations</i>	17
III.1 Introduction	18
III.2 Action Chimiques	18
III.2.1 Les dégradations dues à la corrosion des armatures	18
III.2.2 Les Origines Et Mécanismes Des Désordres Dus à La Corrosion.....	18
III.2.3 Les stades de corrosion	19
III.2.4 Dégradation du béton due aux chlorures (XD/XS)	21
III.2.5 Dégradations dues aux sulfates	22
III.2.6 Dégradation due aux acides	23
III.2.7 Dégradations due au réaction-alcali	24
III.2.8 Action Physiques Et Mécaniques	27
III.2.9 Paramètres atmosphériques et environnementaux	32
<i>Chapitre IV</i>	35
<i>Techniques de diagnostic et d'évaluation des dégradations des constructions en béton armé</i>	35
IV.1 Introduction	36
IV.2 Méthodologies d'investigation des ouvrages en béton armé	36
IV.2.1 L'investigation des ouvrages	36
IV.2.2 Choix des investigations	36
IV.2.3 Types D'investigations.....	38
IV.2.4 Conclusion Sur Le Diagnostic.....	48
<i>Chapitre V</i>	49
<i>Méthodes de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé</i>	49
V.1 Introduction	50
V.2 Durabilité de la réparation.....	50
V.2.1 Définition d'une réparation durable.....	50
V.3 Stratégie de la réparation	50
V.3.1 Les principales étapes de la réparation	51
V.4 Pour Quoi La Réparation ?	52
V.5 Choix Des Méthodes Et Matériaux De Réparations ?	52
V.6 Remplacement physique de la partie endommagée	52
V.6.1 Ragréage de béton.....	53
V.6.2 Béton projeté.....	53
V.6.3 Inhibiteur de corrosion	54
V.6.4 La ré-alcalinisation des bétons	55

V.6.5	Revêtement imperméabilisant	55
V.6.6	Adjonction d'armatures complémentaires	55
V.6.7	Reprise de fissures	56
V.7	Les techniques de réhabilitation :	57
V.7.1	Injections	57
V.7.2	Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé	58
V.7.3	Contreforts	59
V.8	Interventions sur les planchers et les couvertures	59
V.8.1	Remplacement fonctionnel des appuis sur les poutres et poutrelles	60
V.8.2	Suppléments de résistance pour les poutres et les poutrelles	60
V.8.3	Pose additionnelle de dalles en béton armé	60
V.8.4	Interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes des couvertures	61
V.9	Interventions dans les fondations	61
<i>Conclusion générale</i>		63

Liste des figures

Figure 1: Délamination de la dalle	6
Figure 2: Boursouflures de la dalle	7
Figure 3: Cratère d'éclatement à la surface de la dalle.....	8
Figure 4: Effondrement de murs de soutènement en maçonnerie	10
Figure 5: les différentes phases de la dégradation du béton armé	15
Figure 6: Dégradation due à la corrosion	20
Figure 7: Processus de corrosion.....	20
Figure 8: Conséquences de la corrosion sur un ouvrage	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9: La corrosion des aciers dans le béton	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10: Processus de dégradation due aux chlorures.....	22
Figure 11: Processus de dégradation due aux sulfates	23
Figure 12: Processus de dégradation due Acides	24
Figure 13: Mécanisme de dégradation par le gel.....	28
Figure 14: dégradation due à l'action gel-dégel	29
Figure 15: Fissuration à 45° d'une dalle, dispositions préventives du ferrailage	30
Figure 16: Schéma du choix d'investigation	37
Figure 17: Schéma des investigations non destructives	39
Figure 18: Le Fis uromètre	41
Figure 19: Mesure d'une fissure.....	41
Figure 20: Mesure par transparence	43
Figure 21: Scléromètre	44
Figure 22: Schéma des investigations destructives	44
Figure 23: Carotte prélevée	45
Figure 24: Prélèvement d'aciers.....	46
Figure 25: Principe du potentiel de corrosion	47
Figure 26: Cartographie de potentiel de corrosion	48
Figure 27: Mesure du potentiel de corrosion.....	48
Figure 28: Courbes de dégradation d'une structure	51
Figure 29: Ragréage de béton.....	53
Figure 30: Béton projeté.....	54
Figure 31: Inhibiteur de corrosion.....	54
Figure 32: Revêtement imperméabilisant.....	55
Figure 33: Armatures supplémentaires en engravure	56
Figure 34 : Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre	56
Figure 35: Reprise de fissures	57
Figure 36: La réhabilitation des éléments structuraux.....	57
Figure 37: Injections.....	58
Figure 38: Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé	59
Figure 39: Pose additionnelle de dalles en béton armé	61
Figure 40: Interventions dans les fondations.....	62

Chapitre I

Introduction sur la durabilité des constructions en béton armé

I.1 Introduction

D'une façon générale, tout bâtiment ou tout ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

La durabilité d'une structure caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles elle a été conçue (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entre- tien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelé la durée de service de l'ouvrage (ou durée d'utilisation de projet). La prise en compte de cette durabilité permet de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

La durabilité des structures et 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 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 constructions 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, au moins deux supérieurs 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, déchlorurassions, ré-alkalinisation).

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.2 Objectif du projet de fin d'étude

L'objectif de ce PFE est double.

Il s'agit tout d'abord de présenter une synthèse concernant les principales pathologies des constructions en béton armé, mais aussi les méthodes de diagnostic et de traitement ou de réhabilitations adaptées.

Ce travail est d'établir une étude bibliographique sur les pathologies des constructions en béton armé à travers la description des principales dégradations pouvant les affecter et la présentation des méthodes courantes de diagnostic et de réparation.

I.3 Le plan de notre PEF est divisé sur 05 chapitres seront présentés dans ce mémoire

- Le premier chapitre porte une introduction générale parle sur La durabilité des ouvrages en béton armé et leur résistance aux agents agressifs environnementaux.

- Le deuxième chapitre présente une description des principales pathologies et dégradations affectant les constructions en béton armé.
- Le troisième chapitre présente les causes et les conséquences des principales dégradations.
- Dans le quatrième chapitre on passe en revue les principales méthodes de diagnostic et d'évaluation des dégradations des constructions en béton armé
- Le cinquième chapitre présente les méthodes de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé.
- Enfin Nous terminons ce mémoire avec la conclusion et les perspectives envisageables à ce travail.

Chapitre II

Description des dégradations potentielles 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 spécialisées. [1]

II.2 Dégradations affectant le béton armé

II.2.1 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. [2]

II.2.2 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.2.2.1 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 superficielles, se prolongeant en profondeur, traversant de part en part.
- ❖ Fissures régulières d'un bord à l'autre, partielles partant d'un bord, chevauchantes.

II.2.3 Délamination

La délamination des surfaces de béton est produite par une action similaire à l'apparition des boursouflures. L'air et l'eau en trappés sous le mortier de surface provoquent une délamination de la surface de la dalle de béton variant de quelques centimètres à quelques mètres carrés (figure 5). L'épaisseur de délamination de la dalle peut varier de 3 à 5 mm La délamination est apparente lorsque le béton est durci et que la surface se détériore sous l'action de la circulation. Un relevé de délamination 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: Délamination de la dalle

II.2.4 Boursouflures

Les boursouflures sont des élévations convexes de la surface de la dalle dont le diamètre varie de 10 à 50 mm Les boursouflures sont provoquées par le scellement trop rapide de la dalle (treuillage), avant que l'eau de ressuage et l'air en trappé ne se soient complètement échappés. Afin de minimiser les risques de boursouflures, 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 boursouflures 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 boursouflures se brisent sous l'action de la circulation en formant des dépressions de surface d'environ 3 mm de profondeur.



Figure 2: Boursouflures de la dalle

II.2.5 Cratères d'éclatement

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 granulat 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 provoque une pression interne suffisante pour éclater la surface de la dalle. [3]



Figure 3: Cratère d'éclatement à la surface de la dalle

II.2.6 Mauvais positionnements des armatures

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

II.2.7 Mauvaise qualité des bétons employés

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

II.2.8 Vibration trop importante

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

II.2.9 Surcharges

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

II.3 Dégradations affectant les fondations

II.3.1 Les mouvements de fondations d'une maison individuelle

II.3.1.1 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 mouvements.

Elles peuvent aussi impacter les aménagements extérieurs (trottoirs, escaliers...), les voiries d'accès, les réseaux d'eau enterrés, ...

II.3.1.2 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.3.1.3 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 (voir 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.

Une 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.

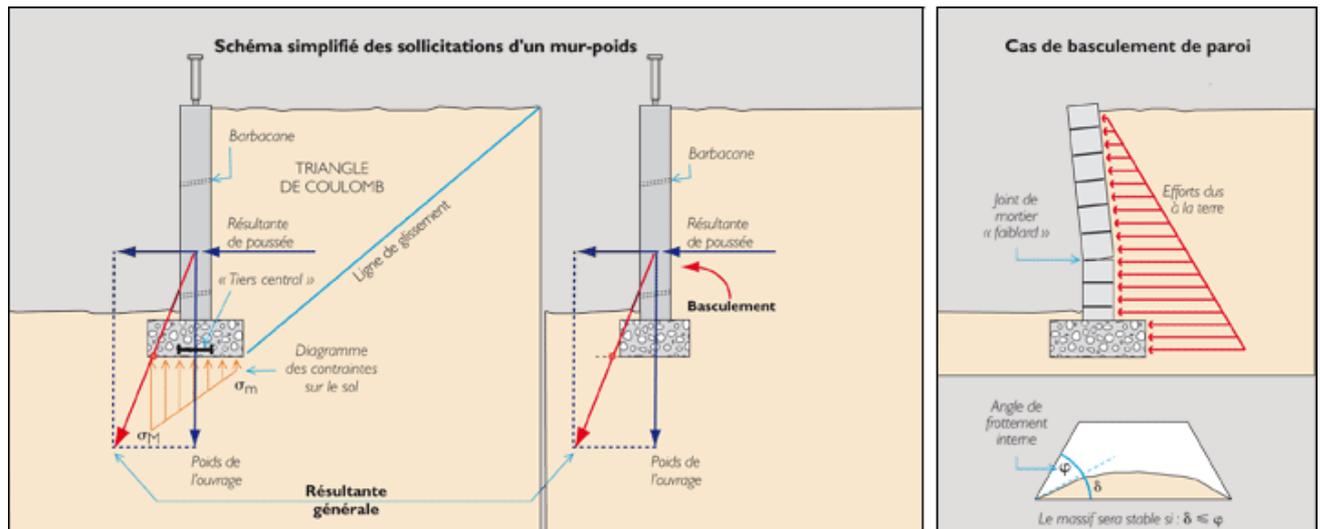


Figure 4: Effondrement de murs de soutènement en maçonnerie

II.3.1.4 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. [4]

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.3.2 Désordres dans les voiries et réseaux divers

II.3.2.1 Principales cause

- ❖ **Mauvaise préparation du fond de fouille** : le fond de fouille non purgé n'a pas été débarrassé de ses éléments les plus gros.

- ❖ **Choix inadapté des matériaux de remblaiement** : dimension maximale des matériaux inadaptée vis-à-vis de la largeur de la tranchée, de l'épaisseur de la couche compactée ou du diamètre du réseau à enrober.
- ❖ **Insuffisance de compactage** : les exigences de compactage des couches de remblaiement des tranchées ne sont pas respectées.

Absence de contrôle du compactage : imprécisions sur la conformité des objectifs attendus de densification du remblai.

II.3.2.2 Pathologies des canalisations eaux vannent- eaux usées et interfaces avec le VRD

Les causes principales qui peuvent générer des désordres sont les suivantes :

- ❖ **Les défauts de pente et les ovalisations de conduite sont les problèmes les plus fréquents**

Ces défauts de pente prennent d'autant plus d'importance que la pente moyenne est faible. Les défauts de pente provoquent une réduction de la vitesse d'écoulement avec parfois des stagnations et une sédimentation des effluents. Les ovalisations provoquent une réduction de la section de passage dans les tuyaux et leur fissuration, voir même leur rupture. L'incorporation des réseaux dans la forme d'un dallage mal réalisé peut être à l'origine de contre-pentes dommageables.

- ❖ **Les connections entre conduites tout comme le fond des regards, peuvent présenter des défauts de profilage hydraulique**

- ❖ Les pertes de charge singulières d'un réseau ne sont pas toujours optimisées. Les fonds de regard ne sont pas toujours équipés de cunettes profilées et les connexions de conduites ne sont pas toujours réalisées avec des pièces de raccordement.

- ❖ **La classe résistance des tuyaux est souvent mal adaptée à la situation des ouvrages**

La classe de résistance des tuyaux et la qualité du remblaiement des tranchées conditionnent la tenue mécanique des ouvrages dans le sol comme la tenue des ouvrages de surface.

- ❖ **Le dimensionnement des conduites n'est pas toujours adapté aux besoins**
La capacité d'évacuation d'une conduite dépend d'une combinaison de son diamètre et

de sa pente. L'estimation des débits d'eau pluviale est extrêmement variable d'une zone géographique à l'autre. L'installateur n'a pas toujours la possibilité d'évaluer ces différents paramètres qui peuvent être difficiles à apprécier. En cas de doute, l'absence d'un bureau d'étude spécialisé pour dimensionner le réseau peut être préjudiciable.

❖ **Des réseaux parfois difficiles voire impossibles à entretenir**

Ils ne sont pas toujours équipés d'un nombre suffisant de dispositifs visitables afin que l'entretien soit possible. En outre, la traçabilité devrait inciter l'installateur à remettre impérativement un plan du réseau à son client et en garder une copie dans son dossier avec l'archivage des pièces contractuelles de l'opération. Cette procédure n'est pas toujours suivie, ce qui rend les actions ultérieures sur le réseau plus délicates.

❖ **Des retours d'effluents provenant du réseau public**

Tout retour d'effluent du réseau public vers la partie privative doit être rendu impossible par un dispositif anti-retour. Ces dispositifs anti-retours peuvent être préconisés par la réglementation telle que le règlement sanitaire départemental ou le règlement des gestionnaires de réseaux publics. Il revient à l'entrepreneur d'en conseiller l'installation en fonction des risques et de la situation de chaque ouvrage. L'entrepreneur omet souvent d'avertir le maître d'ouvrage, par écrit, sur la nécessité de l'entretien régulier de ces dispositifs.

❖ **Des remontées d'odeurs**

Ce problème peut provenir du réseau extérieur si les couvercles des regards sont inadaptés ou si l'étanchéité des conduites est défectueuse... Des remontées d'odeur sont possibles à l'intérieur en cas de défauts sur les siphons des appareils sanitaires ou de défaut de ventilation des colonnes de chute. Un système d'évacuation est composé d'un ensemble d'ouvrages qui sont dépendants les uns des autres, entre l'amont et l'aval. L'installateur oublie souvent son devoir de conseil au maître d'ouvrage et les préconisations d'usage sur les éventuelles mises en conformité requises. Après une longue période de non utilisation les siphons peuvent se désamorcer par évaporation de l'eau qu'ils contiennent.

II.4 Dégradations affectant les éléments de structure

II.4.1 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.

II.4.1.1 Causes et conséquences

❖ L'hétérogénéité des matériaux

Les variations de température ou d'humidité ont des effets différents selon les matériaux : lorsque la paroi est constituée de plusieurs matériaux (blocs de béton et planelles ou linteaux en béton coulé, par exemple), leur comportement différent face à la chaleur et/ou l'humidité peut créer des fissures à leurs jonctions.

❖ La flexion et le retrait des planchers

Le plancher sur vide sanitaire, de l'étage, ou haut de rez-de-chaussée de la maison est généralement du type poutrelles-hourdis, réalisé à l'aide de poutrelles préfabriquées en béton armé, portant dans un seul sens, sur des longueurs pouvant dépasser 5 m. Un tel plancher peut subir une légère déformation de flexion dans sa partie centrale.

Si la déformation ne nuit pas à la solidité du plancher, elle peut toutefois s'accompagner d'une rotation sur l'appui au niveau du mur de façade et d'un soulèvement de la rive du plancher. Ces mouvements peuvent engendrer une fissure horizontale sous l'arête de la base d'appui du plancher. Le retrait du plancher en béton peut aussi causer un cisaillement en façade au niveau de l'appui. [5]

❖ Humidité en sous-sol des bâtiments

Les infiltrations se manifestent sous diverses formes, depuis de simples traces d'humidité ponctuelles sur la face intérieure des murs périphériques ou à la jonction entre murs périphériques et dallage, jusqu'à l'inondation totale du sous-sol.

Ce type de désordre concerne essentiellement les sous-sols réalisés en maçonnerie de petits éléments, et principalement les maisons individuelles. Mais des sous-sols réalisés en béton banché sont aussi susceptibles d'être concernés.

II.4.2 Corrosion des armatures du béton armé en façades des bâtiments

Les désordres affectant les structures en béton armé commencent à la surface du béton par de fines fissures et de légères traces de teinte ocre. Puis l'élargissement des fissures permet

à la rouille (hydroxyde de fer) de suinter. Des aciers presque totalement corrodés apparaissent après soulèvement et détachement des éclats de béton.

II.4.2.1 Facteurs d'influence

❖ Porosité excessive du béton

Elle peut être due à la composition du béton (mauvais rapport entre le sable et les gravillons par exemple, excès d'eau, ...) ou à des insuffisances de vibration du béton au sein du coffrage. Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre du béton ont également une incidence certaine sur la porosité. Ainsi, par un temps sec et chaud, une dessiccation rapide du béton jeune, dont la surface n'a pas été protégée par un produit de cure approprié, peut être à l'origine d'une porosité excessive du matériau.

❖ Mauvaise disposition des armatures

L'enrobage (distance entre l'acier et le mur extérieur du béton) des armatures n'est pas respecté, par suite d'une erreur de lecture de plan de ferrailage ou par suite d'une insuffisance de cales assurant le maintien des barres à l'intérieur des coffrages.

La souplesse des cages d'armatures est alors défavorable sous la pression du béton et celles-ci peuvent se coller contre le coffrage.

❖ Défauts d'étanchéité des façades en briques apparentes

Bien que de technique typiquement traditionnelle, les façades en briques apparentes notamment les plus anciennes, sont à l'origine de nombreux sinistres liés aux infiltrations d'eau.

Dans les constructions anciennes, l'étanchéité était réputée acquise par la seule épaisseur du mur de brique. En réalité, en raison de la relative porosité de la brique, les murs réalisés à partir de ce matériau sont sensibles à la durée d'exposition aux eaux de pluie.

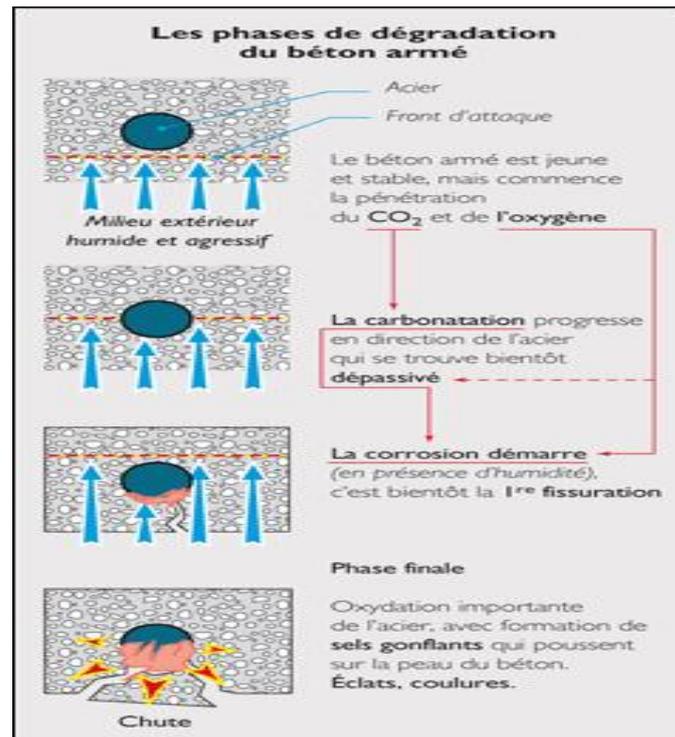


Figure 5: les différentes phases de la dégradation du béton armé

II.4.3 Désordres de dallages à usage industriel - tassements, fissurations

Les dallages industriels en béton peuvent subir des affaissements localisés ou généralisés par rapport à leur niveau d'origine. Par ailleurs, les dallages peuvent se fissurer et les joints se dégrader.

Le simple constat visuel d'un désordre apparent (allure des fissures) ne permet pas d'en déduire automatiquement l'origine. Des investigations complémentaires, d'ordre géotechnique par exemple, sont le plus souvent nécessaires. Car un même phénomène peut résulter de la conjonction de plusieurs causes, et des causes différentes provoquer des fissurations identiques.

- ❖ Une fissure d'un panneau de forme rectangulaire, parallèle au petit côté et allant d'un grand côté à l'autre, traduit une mauvaise efficacité des joints (trop grandes distances entre joints de retrait, à un retrait trop important...).
- ❖ Une fissure, proche d'un angle, à 45° ou en étoile, témoigne d'efforts mécaniques excessifs non maîtrisés (contraintes de poussée au bord ou en angle, un retrait bloqué...).
- ❖ Des fissures et des dégradations en bordure d'un panneau, le long d'un joint entre panneaux

II.4.4 Désordres affectant les balcons

La pathologie des balcons regroupe deux familles de désordres :

- ❖ Les désordres structurels ont des conséquences importantes pouvant aller jusqu'à la rupture
- ❖ La seconde famille regroupe de nombreux désordres aux conséquences moins graves :
 - les fissurations secondaires
 - les éclatements des nez de balcons
 - la présence d'efflorescence et de stalactites en sous-face
 - les infiltrations au travers de la dalle au droit de la façade ou au travers des seuils porte-fenêtre.

II.4.5 Désordres sur ossatures en éléments préfabriqués en béton armé ou précontraint

Les ossatures en béton armé ou précontraint destinées à l'édification de bâtiments de grande emprise (Entrepôts industriels, grandes surfaces commerciales...).

Cette technique de préfabrication permet un montage rapide des bâtiments, avec une réduction du planning et des coûts. Toutefois, au-delà de la résistance nécessaire de chacun des composants, l'essentiel de la solidité de la structure repose sur l'efficacité et la pérennité des assemblages de ces mêmes composants entre eux, c'est-à-dire les jonctions (ou nœuds), qui sont présentes dans les assemblages suivants :

- ❖ Poteaux ⇒ fondations,
- ❖ Poteaux ⇒ poutres et/ou poteaux ⇒ fermes
- ❖ Pannes ⇒ poutres

Les désordres affectant majoritairement ces ossatures se manifestent dans ces jonctions par des fissurations des bétons de clavetage ou des abouts des composants, fissurations souvent signe d'un défaut de solidité de l'ouvrage du fait des efforts importants transitant par ces assemblages.

Ces fissurations peuvent s'accompagner en outre de chutes d'éclats de béton, point particulièrement dangereux du fait des grandes hauteurs usuelles de ces bâtiments dans lesquels l'activité humaine peut être intense, tels les centres commerciaux. [6]

Chapitre III

Causes et conséquences des principales dégradations

III.1 Introduction

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

III.2 Action Chimiques

III.2.1 Les dégradations dues à la corrosion des armatures

Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures.

Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits " finaux " non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enroulement continu de l'acier.

C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton. Il s'agit aussi du début d'un éclatement (délaminage) de cet enrobage ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement.

Les dégradations mises en évidence sont des éclatements, des épaufrures et des fissures du béton d'enrobage. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres. Lorsque la corrosion est très avancée, des traces de rouille sont visibles, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution (perte de section) constatée.

III.2.2 Les Origines Et Mécanismes Des Désordres Dus à La Corrosion

III.2.2.1 Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent

provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le pH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures. Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe "concentration-profondeur" qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas). [7]

III.2.3 Les stades de corrosion

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

La figure (2-3-a) ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant.

Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide.

Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment.

Cette valeur correspond à un rapport de concentrations $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments.

Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative. La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration.

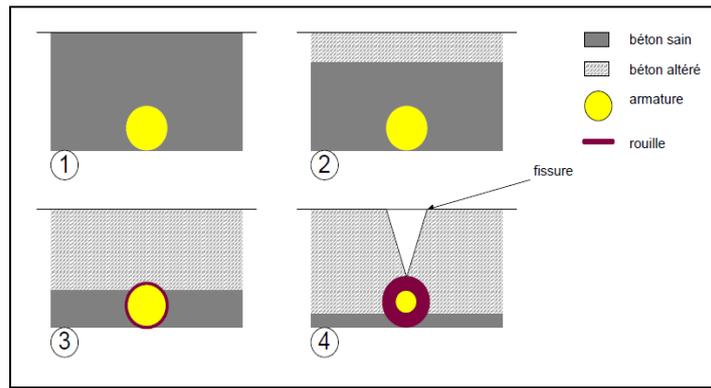


Figure 6: Dégradation due à la corrosion

Cette dégradation procède par étape : dans le béton sain (1), un agent agressif pénètre progressivement (2), lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder (3) et la rouille peut faire éclater l'enrobage (4)

L'apparition des fissures dépend fortement des caractéristiques de l'enrobage :

Epaisseur, résistance mécanique, etc. Plus précisément, une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement.

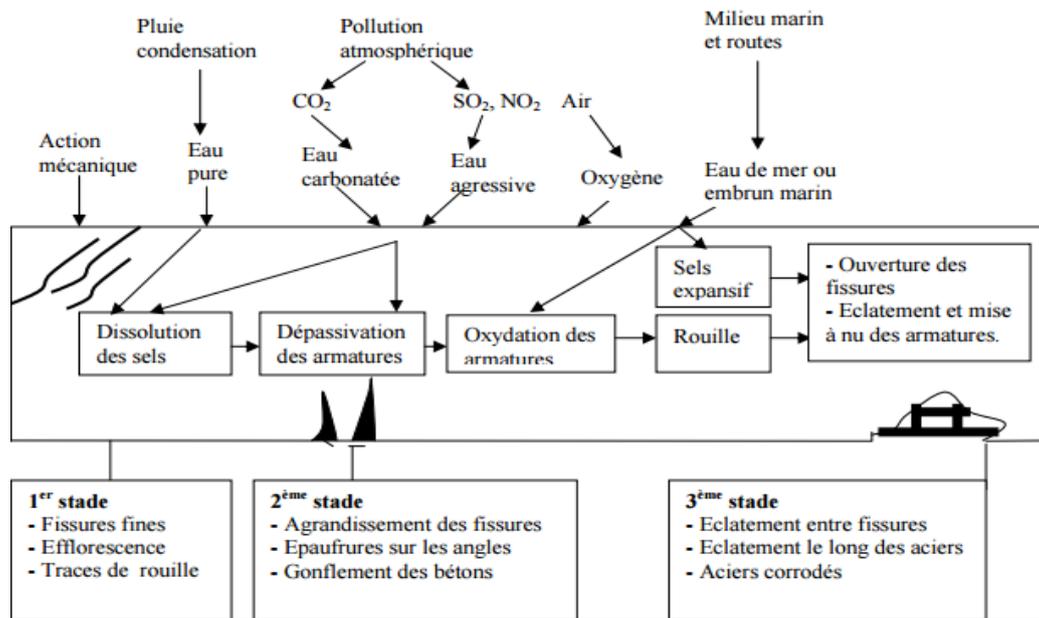


Figure 7: Processus de corrosion



Figure 8 : Conséquences de la corrosion sur un ouvrage



Figure 9 : La corrosion des aciers dans le béton

III.2.4 Dégradation du béton due aux chlorures (XD/XS)

A partir d'une certaine teneur en chlorures, la couche de passivation de l'acier est attaquée. La corrosion due aux chlorures est un phénomène dangereux, parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section d'armature.

La pénétration des ions de chlore et d'oxygène dans le béton durci est limitée lorsque celui-ci est de bonne qualité, c'est-à-dire rapport E/C faible, teneur suffisante en ciment. L'enrobage des armatures doit être suffisant. [8]

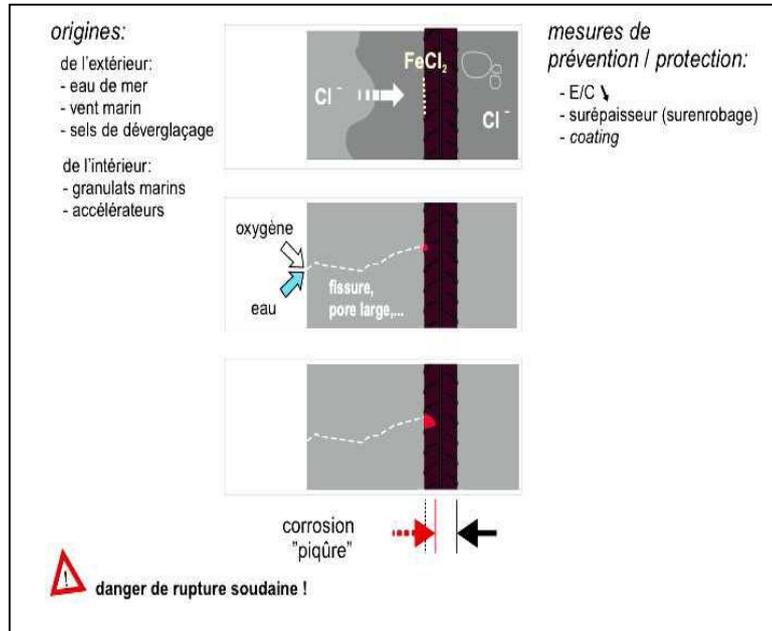


Figure 8: Processus de dégradation due aux chlorures

III.2.5 Dégradations dues aux sulfates

Le sol et les eaux souterraines peuvent contenir des sulfates. Leur présence peut également être la conséquence de diverses activités industrielles ou de l'utilisation d'engrais. Les ions de sulfate pénètrent à l'intérieur du béton soit par diffusion, soit par absorption capillaire et y réagissent de la manière suivante :



Dans cette réaction chimique, un des produits qu'on obtient est le gypse ou le sulfate de calcium.

Le sulfate de calcium réagit uniquement avec les aluminates de calcium hydraté et forme ainsi un sulfone-aluminate de calcium (appelé étrangéité) dont la propriété est de gonfler. Les contraintes Internes qui en résultent peuvent donner lieu à une fissuration du béton et même à sa destruction. [9]

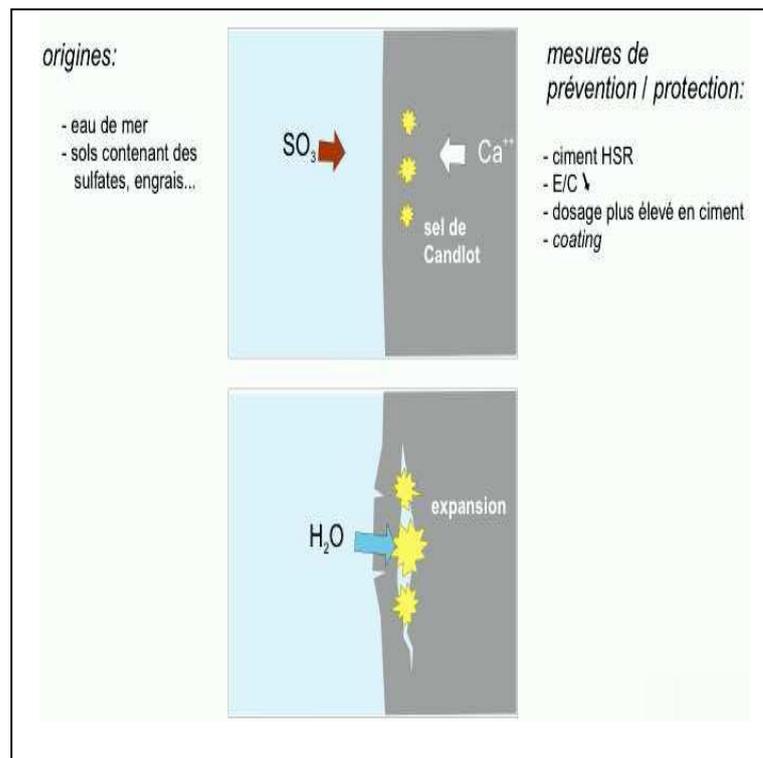


Figure 9: Processus de dégradation due aux sulfates

III.2.6 Dégradation due aux acides

Le béton est un matériau basique et se voit donc attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les corps composés à base de calcium du ciment durci : l'hydroxyde de calcium, les silicates et aluminates de calcium hydratés. La réaction mène à la formation de sels de calcium de l'acide corrodant ainsi que de la silice (SiO_2). Ainsi, l'attaque des silicates de calcium hydratés par l'acide Chlorhydrique donne le chlorure de calcium très soluble.

L'acide carbonique est dangereux aussi pour le béton. Même la faible quantité d'acide carbonique présente dans une eau de ruissellement pure (comme l'eau de dégel) parviendra à dissoudre très lentement le $Ca(OH)_2$ que l'on trouve en surface des éléments en béton, délavera cette surface et entraînera une érosion superficielle.

Dans le secteur agricole et dans l'industrie chimique, le béton se trouve régulièrement en contact avec des acides organiques comme les acides acétiques et lactiques. On les trouve par exemple dans le "jus" qui se forme dans les silos lors de la fermentation du fourrage vert. Les aliments pour animaux en contact avec de l'eau (par exemple lorsque la nourriture tombe à côté de l'auge) surira et attaquera le sol de l'étable ou de la porcherie.

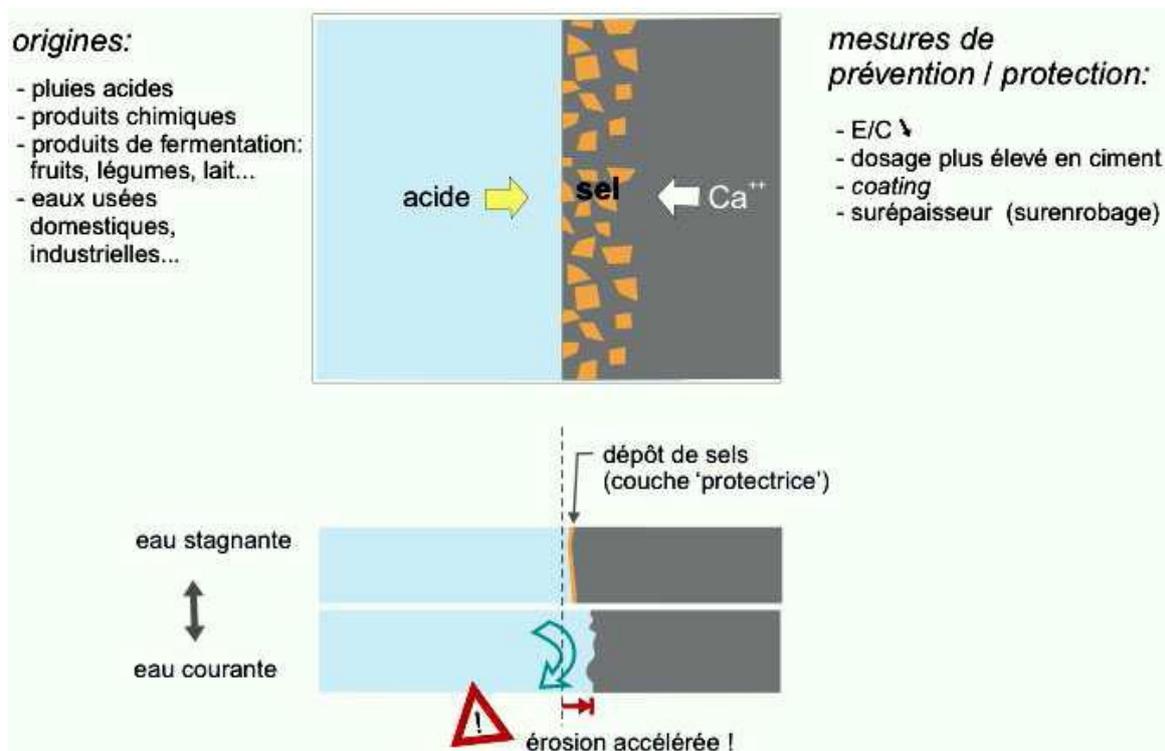


Figure 10: Processus de dégradation due Acides

III.2.7 Dégradations due au réaction-alkali

III.2.7.1 Différents types de réactions

Les alcalis-réactions, dans leur globalité, peuvent se définir comme la réponse des minéraux à un déséquilibre avec leur milieu ambiant, milieu dans lequel règne un pH souvent supérieur à 13. Ce sont des réactions chimiques solide-liquide dans lesquelles la phase solide est constituée par le granulat et la phase liquide par la solution interstitielle fortement alcaline du béton. Ces réactions se caractérisent par le fait que la partie réactive des granulats est en faible quantité et irrégulièrement distribuée, et que la solution agressive contenue dans la microporosité du matériau est, de ce fait, distribuée de façon hétérogène. On est donc conduit à admettre que les dégradations observées sur les ouvrages sont le résultat moyen des effets localisés de la réaction. On admet également que la réaction observée en un point donné du béton peut être dans un état D'avancement bien différent de celui observé en un autre point.

Des produits d'alcali-réaction différents par l'âge (plus ou moins cristallisés) ou par la nature de la réaction (rapport local silice/alcalin) peuvent donc coexister au sein d'un même béton.

Les conditions qui gouvernent la réaction sont l'abondance et la réactivité des espèces minérales la quantité d'alcalins et la présence d'eau. En effet, rien ne se passerait sans eau, et une humidité relative d'au moins 80 % semble indispensable au développement de la réaction.

Si l'on recense trois types d'alcali-réaction : les réactions alcali-silice, alcali-silicate et alcali-carbonate, la réaction dominante est la réaction alcali-silice. Schématiquement, le mécanisme de la réaction alcali-silice passe par une dissolution de la silice sous l'action de la solution interstitielle, suivie de la précipitation d'un gel silico-calco-alcalin. L'importance de la réaction et le caractère endommageant des produits formés dépendent de plusieurs facteurs.

❖ **Facteurs liés à la minéralogie**

❖ **Facteurs liés à la structure et à la texture**

❖ **Facteurs liés à la composition du fluide interstitiel**

III.2.7.2 Propriétés des gels

Les produits d'alcali-réaction peuvent se présenter sous plusieurs formes et montrer des compositions différentes. Selon **Louant et L'arrive [10]**, ils se classent en trois catégories :

- 1- les produits amorphes (gels lisses, gels mamelonnés).
- 2- les produits semi-organisés (produits polymorphes, botryoidaux et microgrenus).
- 3- les produits cristallisés (cristaux en feuillets, en rosettes, cristaux aciculaires).

Les trois morphologies peuvent coexister dans un même ouvrage, et parfois dans une même zone. Leur composition est le plus souvent silico-calco-alcaline, l'alcalin le plus fréquent étant le potassium, le sodium accompagnant parfois le potassium.

L'épaisseur des couches de gel d'alcali réaction est habituellement de l'ordre d'une dizaine de micromètres, et peut atteindre exceptionnellement la centaine de micromètres. Elles sont très riches en eau, se localisent préférentiellement à l'interface pâte-granulat et s'accompagnent relativement souvent d'une présence d'étrangeté.

Si les gels d'alcali-réaction provoquent une expansion du béton une expérience conduite au LCPC a montré qu'il fallait appliquer des contraintes comprises entre 5 et 10 MPA pour s'opposer à l'expansion du béton [11].les résultats de cette expérience réalisée sur des carottes

prélevées dans un ouvrage fortement atteint, puis conservées dans l'eau sous différents taux de contraintes (0, 1, 3 et 5 MPA). Vers la fin de cette expérience, une modification des contraintes appliquées sur les éprouvettes a été opérée ; l'éprouvette précédemment chargée à 5 MPA a été déchargée jusqu'à 1 MPA, et s'est alors mise à gonfler jusqu'à atteindre des valeurs proches de celles mesurées sur l'éprouvette initialement chargée à 1 MPA. Cette constatation tend à prouver que la contrainte s'oppose aux manifestations mécaniques de la réaction, mais qu'elle semble insuffisante pour bloquer la réaction chimique.

III.2.7.3 Conséquences mécaniques pour le matériau

Le gel d'alcali-réaction possède la propriété d'être gonflant. On peut admettre, en simplifiant à l'extrême, qu'il exerce sur la matrice qui l'entoure des pressions locales qui ont été estimées entre 3 et 10 MPA par divers auteurs. De telles contraintes engendrent des désordres dans le matériau qui sont facilement observables au microscope optique ou au microscope électronique à balayage ; il s'agit de réseaux de fissures transgranulaires et inter granulaires, de microfissurations autour des particules réactives, ou de décollements à l'interface pâte de ciment-granulats. La plupart des auteurs s'accordent pour affirmer que les caractéristiques mécaniques du matériau sont altérées par l'alcali réaction.

La microfissuration qui se développe progressivement dans le matériau étant probablement la cause principale de ce phénomène. À partir de notre expérience, il est possible de confirmer que la résistance à la traction du béton est la caractéristique mécanique la plus affectée, que le module de déformation subit une baisse significative et que, par contre, la résistance à la compression est peu affectée (tout au moins au début de la réaction). « **Le document de l'Institution of Structural Engainées [12]** » fournit quelques valeurs des coefficients de réduction relatifs aux caractéristiques mécaniques du béton (tableau 1).

Tableau 1 – Coefficient de réduction des caractéristiques mécaniques d'un béton atteint d'alcali-réaction par rapport à un béton sain (d'après [12])					
Caractéristiques mécaniques du béton	Gonflement libre du béton (mm/m)				
	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0
Résistance en compression (sur cylindre)	0,95	0,80	0,60	0,60	
Résistance en traction (par fendage)	0,85	0,75	0,55	0,40	
Module de déformation	1,0	0,70	0,50	0,35	0,30

Table 1 : Coefficients de réduction relatifs aux caractéristiques mécaniques du béton

III.2.8 Action Physiques Et Mécaniques

III.2.8.1 Action Physiques

a) Abrasion : C'est l'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.

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

c) 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.

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

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

f) Le feu : Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

g) 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.

g-1) Mécanisme de dégradation par le gel

Un béton en contact avec l'environnement extérieur contient toujours une grande quantité d'humidité. Lorsque la température extérieure descend au-dessous de zéro, l'eau des pores dans les parties les plus froides du béton gèlera en premier lieu.

De surcroît, les forces d'adhésion capillaires abaissent le point de congélation. Il s'ensuit que l'eau contenue dans les pores les plus fins ne se transforme en glace qu'à une température loin au-dessous de 0°C ! [13]

En conclusion

- ❖ La glace se forme d'abord dans les pores les plus grands et ensuite, lors d'un abaissement plus poussé de la température, dans les plus petits,
- ❖ Seule l'eau contenue dans les pores capillaires les plus larges est susceptible de geler dans notre climat,
- ❖ La résistance au gel augmente lorsque le nombre et la section des pores capillaires sont limités, ce que l'on obtient en adoptant un rapport E/C le plus faible possible (max 0.55 dans un environnement normal et 0.5 dans un environnement marin).

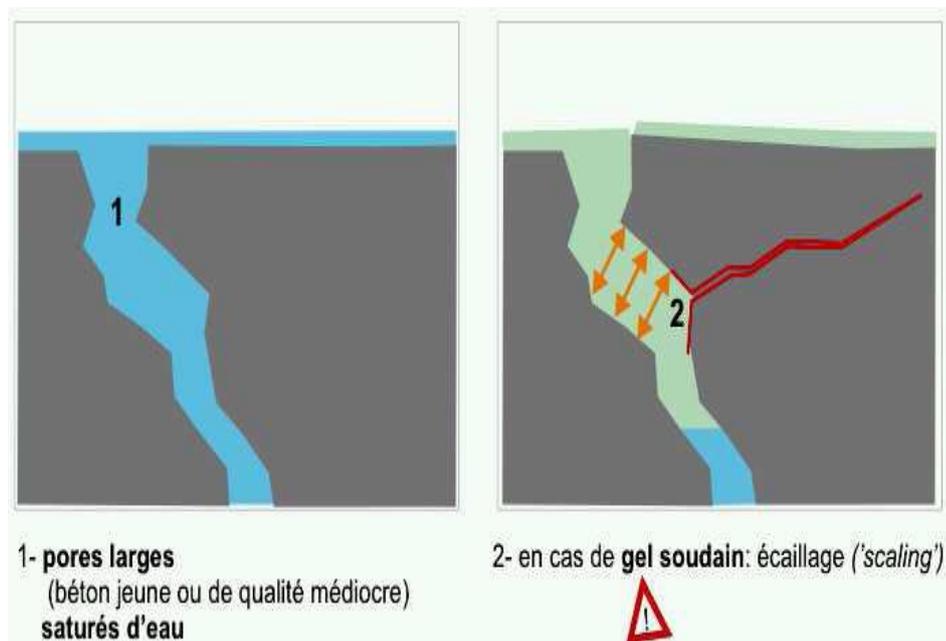


Figure 11: Mécanisme de dégradation par le gel

Exemples de dégradation due à l'action gel-dégel



Figure 14 : dégradation due à l'action gel-dégel

Figure 12: Exemple de dégradation d'un pont

Problème de Défaut de conception (la photo ci-dessus : trous pour fixation des potelets du garde-corps -> ruissellement des chlorures sur les poutres qui, en principe, ne devaient pas être en contact avec ceux-ci).

III.2.8.2 Action Mécaniques

III-2-8-2-1 Retrait lors du durcissement

Le retrait thermique peut être la cause de pré fissuration du béton. La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur. L'expérience montre que le retrait gêné, hydraulique et / ou thermique, peut provoquer la fissuration dans tous les éléments, mais particulièrement dans les murs et les dalles en fonction de la longueur, l'épaisseur, le ferrailage, l'hygrométrie ambiante et les conditions climatiques (ensoleillement, vent, pluie...). Le retrait hydraulique s'effectue sous l'action de l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage. [14]

Dans le cas d'une dalle, cette évaporation se produit inégalement sur les deux faces : alors qu'en partie basse le coffrage de la dalle rend cette évaporation malaisée, la face supérieure, au contraire, est en contact avec l'atmosphère et la dessiccation sera d'autant plus rapide que l'air sera chaud (ensoleillement) et, surtout, en mouvement.

Les deux faces de la dalle sont ainsi soumises à un retrait différentiel, et, dans certains cas (béton trop liquide, absence de produit de cure), il peut en résulter un soulèvement de la dalle au droit des angles.

Ce phénomène de soulèvement des angles, empêché par les liaisons avec les poutres ou les murs périphériques, explique certaines fissures à 45° que l'on voit parfois apparaître dans les angles des dalles.

Pour éviter ces fissures qui sont sans gravité, il est nécessaire de prévoir un quadrillage d'armatures supérieures obtenu par le croisement des chapeaux (Figure 3.2.a), ou à la rigueur, des armatures disposées dans le sens perpendiculaire à la fissure (Figure 3.2.b)

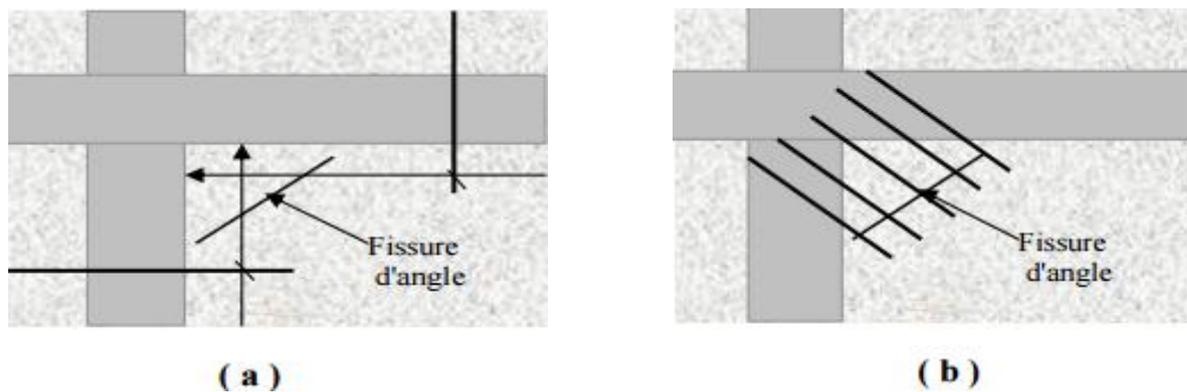


Figure 13: Fissuration à 45° d'une dalle, dispositions préventives du ferrailage

- ❖ a) croisement des chapeaux
- ❖ b) armatures en renfort

III-2-8-2-2 La Fissuration

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

- 1) Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.
- 2) Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- 3) Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant

D'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.

- 4) Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.[15]

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

- 1) Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton
- 2) Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm
- 3) Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires à la trace plus ou moins régulière dont la largeur est d'au moins 0,2 mm

❖ **Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution. [6]**

- 1) 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.
- 2) Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.
- 3) Les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température.

III-2-8-2-3 La flexion et le retrait des planchers

Le plancher sur vide sanitaire, de l'étage, ou haut de rez-de-chaussée de la maison est généralement du type poutrelles-hourdis, réalisé à l'aide de poutrelles préfabriquées en béton armé, portant dans un seul sens, sur des longueurs pouvant dépasser 5 m. Un tel plancher peut subir une légère déformation de flexion dans sa partie centrale. Si la déformation ne nuit pas à la solidité du plancher, elle peut toutefois s'accompagner d'une rotation sur l'appui au niveau du mur de façade et d'un soulèvement de la rive du plancher. Ces mouvements peuvent engendrer une fissure horizontale sous l'arête de la base d'appui du plancher.

Le retrait du plancher en béton peut aussi causer un cisaillement en façade au niveau de l'appui.

III.2.9 Paramètres atmosphériques et environnementaux

III.2.9.1 Humidité en sous-sols des bâtiments

Les infiltrations se manifestent sous diverses formes, depuis de simples traces d'humidité ponctuelles sur la face intérieure des murs périphériques ou à la jonction entre murs périphériques et dallage, jusqu'à l'inondation totale du sous-sol.

Ce type de désordre concerne essentiellement les sous-sols réalisés en maçonnerie de petits éléments, et principalement les maisons individuelles. Mais des sous-sols réalisés en béton banché sont aussi susceptibles d'être concernés.

III.2.9.2 Le diagnostic

❖ a)- L'absence d'ouvrage

- ❖ Selon la destination du sous-sol, les murs devront être réputés « imperméables » ou « étanches ». Les locaux destinés à être aménagés (atelier, buanderie, pièces habitables) doivent être protégés par des murs étanches et traités avec des complexes adaptés à cette fonction. Les locaux restant à l'état de cave peuvent tolérer des traces d'humidité et les murs devront seulement être traités par un revêtement imperméabilisant.
- ❖ Cuvelage non prévu ni réalisé alors que le niveau de la nappe phréatique est susceptible d'être supérieur à celui du dallage.
- ❖ Cuvelage non prévu ni réalisé alors que des ruissellements d'eau souterrains importants sont susceptibles d'atteindre le sous-sol.
- ❖ Drainage périphérique non prévu ni réalisé alors que des eaux souterraines (telluriques) ou de ruissellement sont susceptibles de s'accumuler contre les murs de sous-sol.

❖ b)- Le mauvais choix des revêtements extérieurs

- ❖ Emploi de revêtements inadaptés sur la face extérieure des murs périphériques. Une simple émulsion bitumineuse appliquée directement sur la maçonnerie n'apporte pas de protection efficace contre les infiltrations d'eau. Il faut, au minimum, un revêtement à fonction imperméabilisante, type enduit de mortier ou enduit bitumineux. Voir un revêtement étanche (type membrane bitumineuse collée) qui interdit tout passage d'eau.

- ❖ Les nappes à excroissances n'assurent aucune protection à l'eau car, n'étant pas collées, l'eau les contourne. Elles n'assurent qu'une protection mécanique des revêtements, ou sont intégrées à des systèmes de drainage en association avec d'autres matériaux.

- ❖ **c)- Les défauts d'exécution**

- c-1) Défauts d'exécution des drainages**

- ❖ Drainage vertical inefficace : par absence ou mauvaise mise en œuvre de matériaux drainants ou de procédés drainants performants, contre toutes les surfaces de murs enterrés.
- ❖ Mauvais raccordement de ce drainage vertical avec les drains.
- ❖ Utilisation de drains type agricole (perforés de tous côtés) à la place de drains type bâtiment (perforations uniquement sur le dessus).
- ❖ Insuffisance de pente des drains, contre-pente entraînant des rétentions d'eau.
- ❖ Fil d'eau du drain plus haut que le sol intérieur du sous-sol.
- ❖ Absence ou insuffisance d'exutoire des eaux recueillies par les drains. L'eau s'accumule alors contre les murs de sous-sol.
- ❖ Absence de feutre géotextile, ou équivalent, empêchant le colmatage du système de drainage par entraînement des particules de terre.
- ❖ Absence, mauvaise réalisation ou décrochage, par le compactage des terres de remblai, de la protection en tête du système de drainage (nappe à excroissances). La terre pénètre dans le système de drainage et le colmate.
- ❖ Absence de regards de visite aux changements de direction des drains (impossibilité de contrôle et d'intervention en cas de colmatage).

- c-2)- Défauts d'exécution des revêtements extérieurs des murs périphériques**

- ❖ Nombre de couches de produit de revêtement inférieur aux préconisations du fabricant.
- ❖ Omission de l'enduit de mortier préalable à la mise en œuvre de certains produits bitumineux.
- ❖ Discontinuités du revêtement extérieur.

- ❖ Manques localisés de revêtement autour des châssis de sous-sol, aux attentes de murets sur rampe de sous-sol, au niveau supérieur des sols.

Chapitre IV

Techniques de diagnostic et d'évaluation des dégradations des constructions en béton armé

IV.1 Introduction

Le but du diagnostic est de fournir des éléments techniques objectifs pour évaluer l'état d'une structure, proposer les préconisations nécessaires à la remise à niveau et examiner la faisabilité des projets de prolongation de durée de vie, d'aménagement ou de changement de destination. Le diagnostic d'une structure ancienne doit intégrer et associer des informations relatives aux matériaux et à la structure. Le diagnostic "matériaux" est établi à partir de mesures réalisées in situ et sur prélèvements. Il est destiné à évaluer les caractéristiques des matériaux constitutifs – essentiellement béton et acier sur la base d'investigations menées sur des zones considérées comme représentatives de l'ensemble de la structure. Le diagnostic "structure" est élaboré en combinant l'analyse de relevés de défauts, de mesures géométriques et de modélisations numériques. Il aboutit à un avis sur les performances et le fonctionnement réels de la structure et permet d'identifier des anomalies de fonctionnement.

IV.2 Méthodologies d'investigation des ouvrages en béton armé

IV.2.1 L'investigation des ouvrages

Cette étape commence par une inspection exhaustive sur le terrain. Cette partie du travail doit être effectuée afin de confirmer les surcharges réelles et les détails de l'ouvrage fini, dont la présence d'une imperméabilisation et sa condition aux endroits moins accessibles visuellement.

Les constatations relevées sur le terrain doivent être consignées par écrit afin de pouvoir y référer ultérieurement. Des formulaires types de collecte de données devraient être employés pour simplifier l'enregistrement et réduire les possibilités d'erreurs ou d'omissions d'informations clés.

IV.2.2 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. **[16]**

Ces différents paramètres sont les suivants :

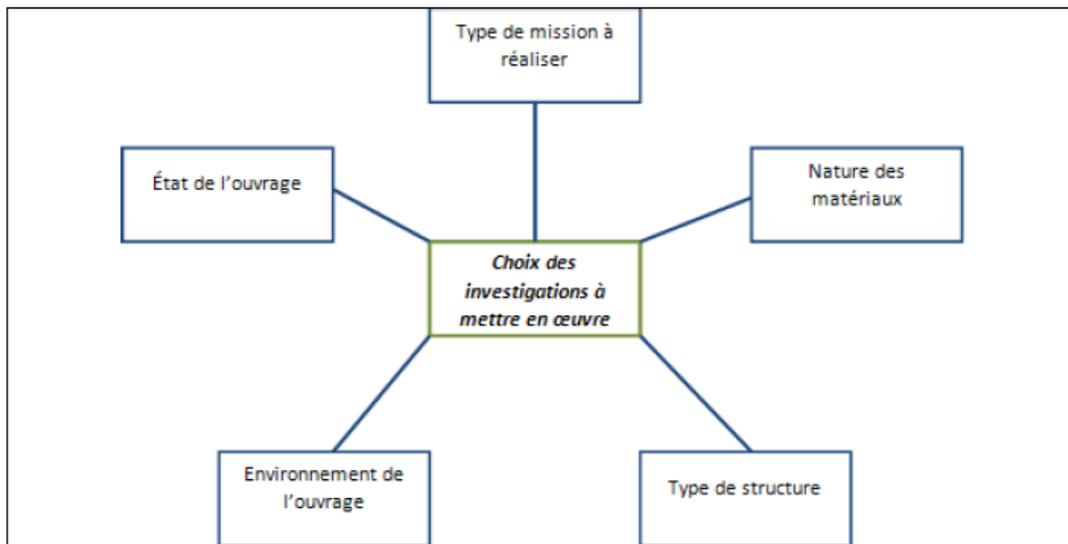


Figure 14: Schéma du choix d'investigation

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 se trouve dans un milieu avec beaucoup d'éléments de chlorures, directement lie à l'activité se déroulant dans le bâtiment.

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

S'il est à la limite de la stabilité, on se dirigera plutôt vers des méthodes non destructives afin de ne pas affecter plus la structure.

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

IV.2.3 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.

IV.2.3.1 Investigations Non Destructives

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

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

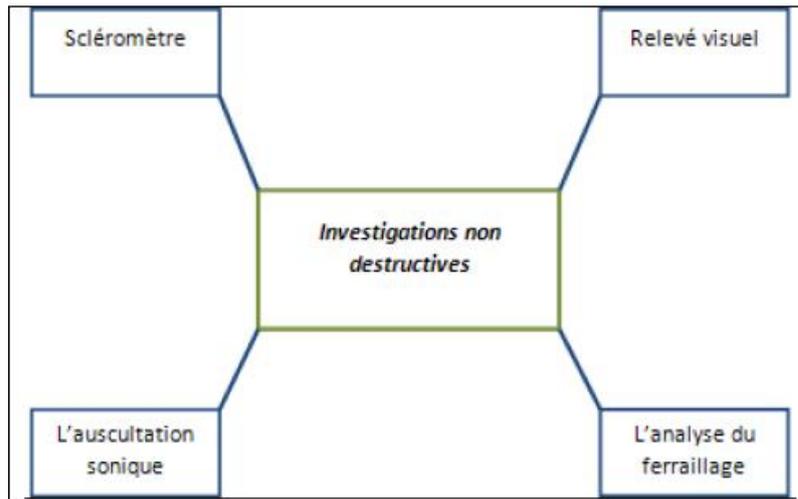


Figure 15: Schéma des investigations non destructives

IV-5-3-1-1 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 les différentes pathologies présentes sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

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

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 quel sort de traitement sera nécessaire afin de stopper le phénomène.
- ❖ Quantifier les désordres, car selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.
- ❖ Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème. S'il est seulement prévu de réparer l'élément sans s'attaquer à ce qu'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 fis uromètre (réglette en plastique transparente munie de traits de largeurs calibres que l'on place successivement sur la fissure à observer pour estimer sa largeur)
- Le nécessaire pour prendre des notes



Figure 16: Le Fis uromètre

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.



Figure 17: Mesure d'une fissure

IV-5-3-1-2 L'analyse Du Ferrailage

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

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil. Le phacomètre détecte la diffusion de ce champ magnétique ainsi que les modifications de la

résonance magnétique induite par la présence d'aciers. Ainsi, l'appareil mesure la variation électromagnétique due à la présence d'éléments ferromagnétiques, les armatures.

La détermination du diamètre et de l'enrobage repose sur le fait que plus une armature n'a un diamètre important, plus le signal reçu par l'appareil sera important. au contraire, 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).

IV-5-3-1-3 L'auscultation Sonique

L'auscultation sonique permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre deux points. Une partie de l'auscultateur, le transducteur, produit des ultrasons. Grâce aux propriétés piézo-électriques 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 a été conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées.

Le tableau suivant donne les résultats d'essais obtenus par le CEBTP sur l'auscultation sonore

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

des bétons :



Figure 18: Mesure par transparence

IV-5-3-1-4 Scléromètre

Le principe de l'essai sclérotique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille 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 ausculté, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérotique I_s de l'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par rapport de l'indice sclérotique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément considéré.

Il est important de savoir que différents paramètres peuvent 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 19: Scléromètre

IV-5-3-2 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 :

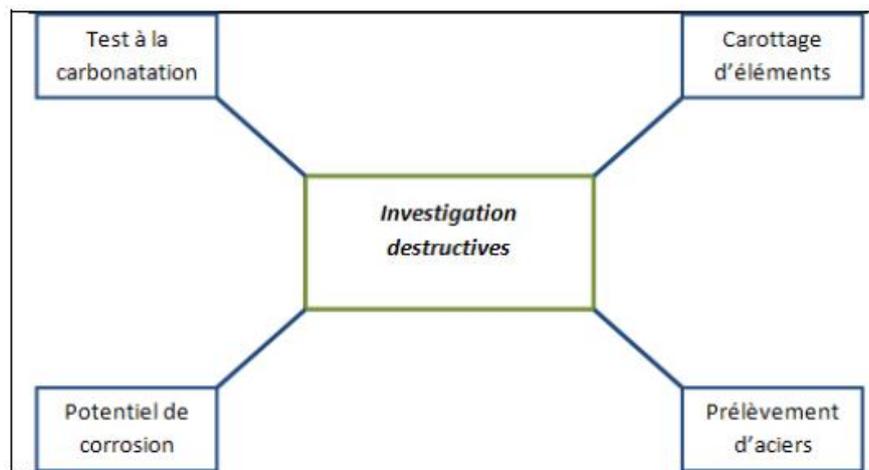


Figure 20: Schéma des investigations destructives

IV-5-3-2-1 Carottage Des Elément 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 carotte 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.



Figure 21: Carotte prélevée

IV-5-3-2-2 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 exploitée afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.[17]



Figure 22: Prélèvement d'aciers

IV-5-3-2-3 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 du a 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.

La norme ASTM C876-91 fait une corrélation entre le potentiel mesure 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 a 10%)
- Si $-350 < E < -200$ mV alors la corrosion est possible (probabilité de cinquante pour cent)
- Si $E < -350$ mV alors la corrosion est très probable (probabilité de 50 à 90%)

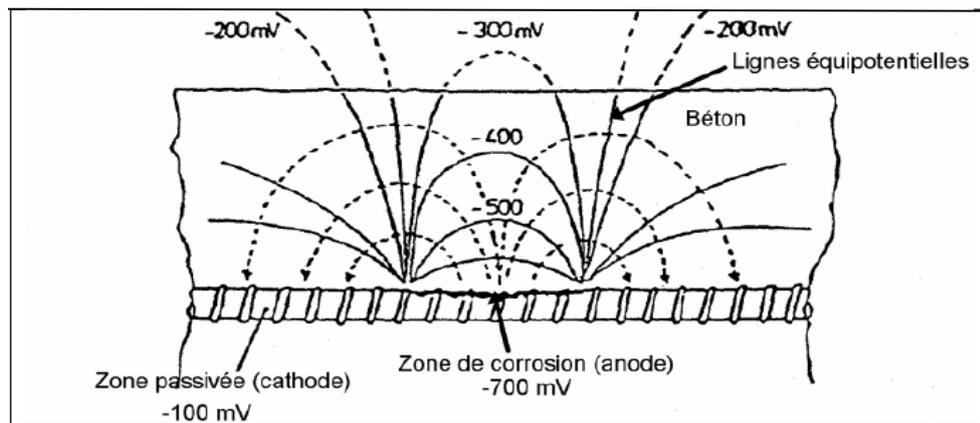


Figure 23: Principe du potentiel de corrosion

Cependant, il est important de noter le fait que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats obtenus, [18] 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.

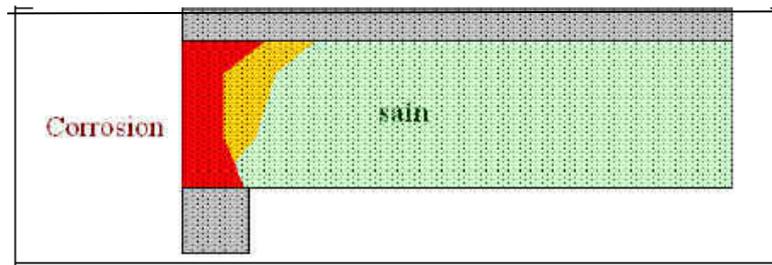


Figure 24: Cartographie de potentiel de corrosion



Figure 25: Mesure du potentiel de corrosion

IV.2.4 Conclusion Sur Le Diagnostic

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

Chapitre V

Méthodes de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé

V.1 Introduction

La réparation des ouvrages dégradés en béton est une opération qui fait intervenir deux matériaux, dont les propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont différentes. Il s'agit d'une part, d'un matériau de base (substrat) dont l'hydratation est terminée et dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées. D'autre part, il y a le matériau de réparation, matériau encore jeune, qui va subir d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre.

Il existe deux types de réparation :

- ❖ une réparation superficielle (mince) qui fait référence à des réparations d'épaisseur inférieure à 100 mm, pour laquelle les aciers de renforcement n'ont pas été dégagés.
- ❖ Une réparation structurale dont l'épaisseur dépasse 100 mm et, qui sera alors dictée par les lois de la résistance des matériaux et de la mécanique, dont l'objectif est de restituer la capacité portante initiale de l'élément considéré. [19]

V.2 Durabilité de la réparation

V.2.1 Définition d'une réparation durable

Le principal objectif de toute opération de réparation durable est de prolonger la vie de la structure réparée, se prolongement peut être expliqué par le terme durabilité de la réparation, notion qui se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support, qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps.

Les deux notions : fissuration évitée, et adhérence au support, nous conduisent plus précisément vers le phénomène de la compatibilité, car nous constatons de nombreux cas de réparations déficientes sont dues à l'incompatibilité du matériau de réparation avec l'ancien béton. A cet effet, il est essentiel de développer des outils de caractérisation simples et accessibles, pour implanter la notion de la compatibilité dans la pratique des réparations.

V.3 Stratégie de la réparation

(« Il est parfois difficile de déterminer avec exactitude la cause des dégradations et a fortiori, les causes des dégradations des réparations. Une étude a été réalisée dans le cadre de **REHABCON (Tilly, 2004)** a montré que plus de 75% des dégâts étaient causés par une

conception incorrecte (32%), un mauvais diagnostic (12%), une mauvaise mise en œuvre (16%) et le choix inadéquat du matériau de réparation (32%). ») « 2 »

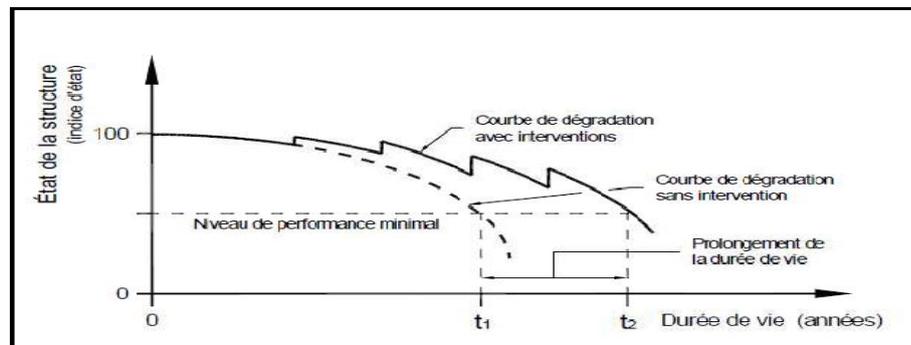


Figure 26: Courbes de dégradation d'une structure

V.3.1 Les principales étapes de la réparation

(« Pour avoir une réparation durable, voit qu'il doit faire apparaître (03) trois étapes principales indissociables, pour une telle stratégie de réparation : ») « 2-1 »

V.3.1.1 Identification des causes

(« L'identification des causes des dégradations est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées.

Car il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisir la ou les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, bien identifié l'origine des dégradations.») « 2-1-1 »

V.3.1.2 Analyses des causes de la détérioration

(« Cette phase exige une suppression du béton endommagé avec un soin particulier aux bords de la réparation, qui peut se faire avec plusieurs techniques. Trois techniques sont le plus couramment employées, il s'agit du marteau pneumatique ; de l'hydro démolition et du sablage, ces techniques génèrent à la surface du support une rugosité plus ou moins importante, joue un rôle prépondérant pour l'assurance d'une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

Après l'enlèvement du béton détérioré, un nettoyage de la surface est nécessaire pour enlever les débris et permettre d'obtenir une surface propre et prête pour l'application d'une réparation. Cependant, il est important de protéger lors de la préparation des surfaces, les aciers d'armatures apparents ou de les remplacer si besoin. ») « 2-1-2 »

V.3.1.3 Mise en place du béton de la réparation

(« C'est la phase finale de la stratégie de la réparation.

Après avoir identifié les causes de dégradations, les méthodes et les matériaux de réparation et après le nettoyage et l'humidification de la surface à réparer, le béton de réparation, alors sera mis en place selon les techniques exigées généralement par un cahier de charge afin d'obtenir une réparation de qualité. ») « 2-1-3 »

V.4 Pour Quoi La Réparation ?

(« Donc en générales on applique des réparations pour les raison suivantes :

- ❖ restaurer et augmenter la force
- ❖ restaurer et augmenter la rigidité
- ❖ améliorer les performances fonctionnelles
- ❖ fournissent l'étanchéité
- ❖ améliorer l'apparence de la surface du béton
- ❖ améliorer la durabilité
- ❖ empêcher le développement d'un environnement corrosif à l'armature. ») « 3 »

V.5 Choix Des Méthodes Et Matériaux De Réparations ?

(« C'est l'étape la plus difficile et qui exige une connaissance approfondie ainsi un très bonne jugement de l'ingénieur entre les variétés de méthodes d'intervention, des matériaux et des pratiques reconnues. Donc on peut définir cette étape comme une décision multicritères, dans laquelle on vise le choix et la combinaison entre les méthodes et les matériaux jugée techniquement faisable pour atteignent efficacement le but poursuivi par les opérations de réparations avec le moindre cout.») «4 »

V.6 Remplacement physique de la partie endommagée

Il s'agit de remplacer le matériau de la partie fissurée, bombée ou menacée par la dégradation et de reconstruire avec le même matériau ou d'autres dont la résistance et la déformabilité seront similaires. Dans les murs ou les piliers en pierre ou en brique, l'usage veut que l'on reprenne le même matériau, tandis que dans les murs en terre, on pourra employer la brique. Dans tous les cas, l'objectif de l'intervention ne peut que prétendre restaurer la capacité portante initiale de l'élément endommagé. Il est important de ne pas oublier que ce type

d'intervention requiert l'élimination préalable de la cause du problème ou au moins la constatation d'un dommage passif au sens où la cause aura cessé d'agir. En ce qui concerne l'exécution, il faut prendre grand soin du contact de la partie remplacée avec l'ouvrage, pour assurer une correcte transmission des charges, sans oublier la similitude déjà citée de leurs caractéristiques mécaniques.

V.6.1 Ragréage de béton

Le ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet dans un premier temps de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparu, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation. Puis, le principe est de protéger les armatures par reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortier de réparation.

Les étapes de la réparation sont les suivantes :

- ❖ éliminer les zones de faible cohésion
- ❖ dégager l'armature corrodée jusqu'à une zone où celle-ci est saine
- ❖ nettoyer l'armature
- ❖ remplacer l'armature si la perte de section est trop forte
- ❖ passiver les armatures corrodées par application de produit
- ❖ reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide de mortier de réparation



Figure 27: Ragréage de béton

V.6.2 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. Il existe deux méthodes d'application du béton projeté :

soit par voie humide, soit par voie sèche. La seule différence entre ces deux méthodes réside dans le moment où l'on ajoute l'eau. Pour le béton projeté par voie sèche, l'eau est ajoutée au dernier moment au niveau de la lance alors que par voie humide, l'eau est introduite lors du malaxage du béton. Les étapes préalables à la projection du béton sont identiques à celles du ragréage. [7] [20]



Figure 28: Béton projeté

V.6.3 Inhibiteur de corrosion

L'application d'un inhibiteur de corrosion permet de ralentir voir de stopper la corrosion des aciers dans le béton.

L'inhibiteur de corrosion peut être intégré dans la formulation du béton ou appliqué par la suite soit au rouleau soit au pulvérisateur. La progression du produit au sein du béton se fait naturellement mais n'est pas optimale. La migration du produit peut également être forcée de manière électrochimique afin d'obtenir un résultat optimal.



Figure 29: Inhibiteur de corrosion

V.6.4 La ré-alcalinisation des bétons

La ré-alcalinisation permet d'augmenter l'alcalinité du béton, c'est-à-dire d'augmenter pH. Cela a pour conséquence que les armatures sont à nouveau protégées.

La méthode de réalisation de la ré-alcalinisation est identique à celle de l'extraction des chlorures. Seul l'électrolyte utilisé change.

V.6.5 Revêtement imperméabilisant

Les revêtements imperméabilisants, une fois appliqués sur le parement, permettent de stopper la pénétration d'éléments dans le béton. Il existe différents types de revêtement selon contre quoi on souhaite protéger la structure. Parmi eux il y a les revêtements hydrofuges, contre l'arrivée d'eau, ignifuges contre les attaques du feu. Certains d'entre eux protègent aussi contre les attaques de chlorures ou bien contre la pénétration du CO₂ au sein du béton.



Figure 30: Revêtement imperméabilisant

V.6.6 Adjonction d'armatures complémentaires

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Dans tous les cas, les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation. Un étaielement et un déchargement de l'ouvrage à réparer peuvent éventuellement être nécessaires. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. Il faut donc porter une attention particulière à la disposition et à l'ancrage de ces armatures.

Les armatures complémentaires peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément (par exemple, en les disposant dans des engravures dimensionnées en fonction du diamètre de l'acier et des caractéristiques du produit d'enrobage ; Figure.5) ou en surépaisseur (le treillis soudé constitue alors souvent une bonne solution Figure.6).

La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé, ou projeté. Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire.

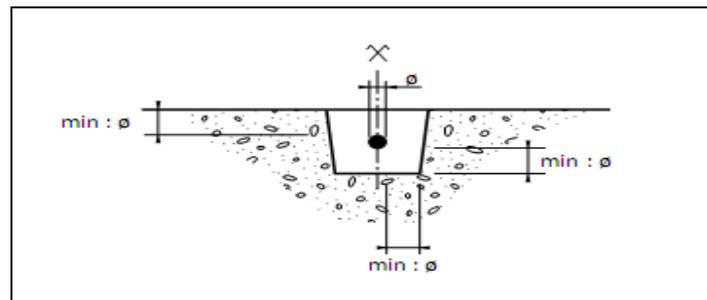


Figure 31: Armatures supplémentaires en engravure

(Celle-ci pouvant être en sous face)

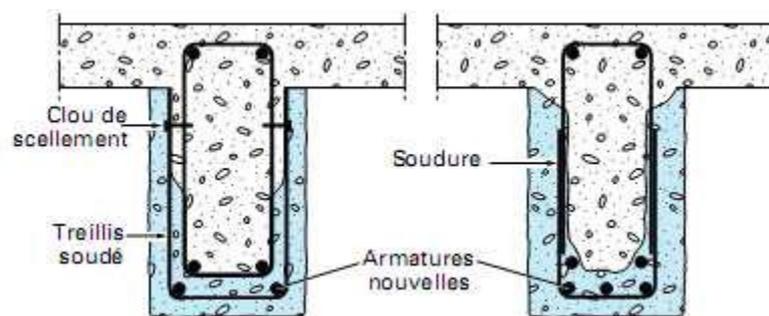


Figure 32 : Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre

V.6.7 Reprise de fissures

La méthode consiste à intercaler entre les lèvres de la fissure du mur des éléments plus résistants et plus rigides en guise de sutures, tels que des agrafes métalliques, des morceaux de brique, etc. Il s'agit de retrouver la continuité perdue du mur endommagé, de sorte que les tensions puissent être de nouveau transmises et distribuées de manière homogène dans la partie lézardée. Pour que cette méthode soit efficace, il faut que la fissure soit passive comme nous venons de l'expliquer, c'est-à-dire que la cause de son apparition n'agisse plus sur la partie à réparer.

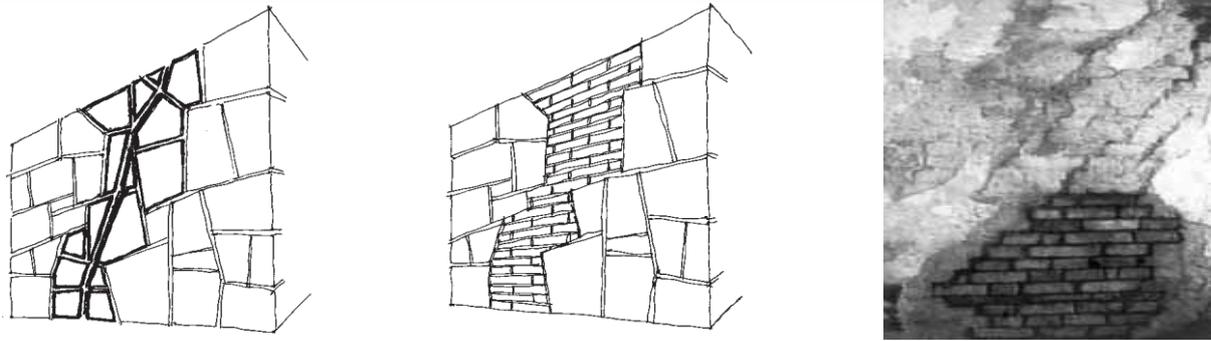


Figure 33: Reprise de fissures

V.7 Les techniques de réhabilitation :

Renforcer les structures

La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne :

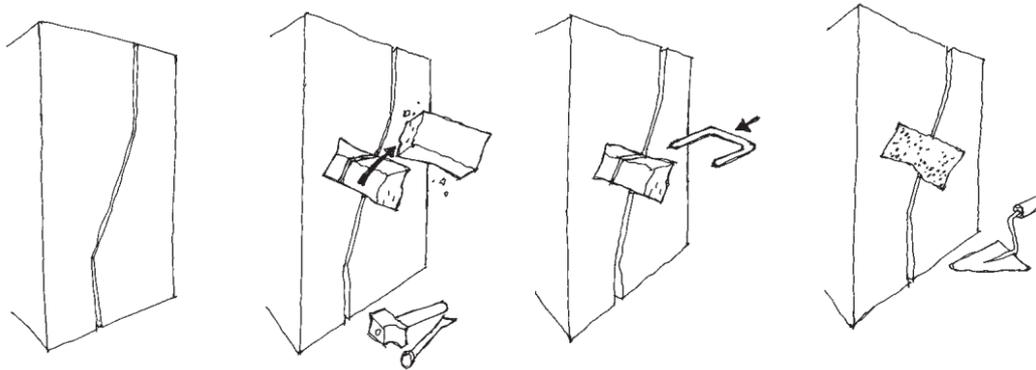


Figure 34: La réhabilitation des éléments structuraux

V.7.1 Injections

Il s'agit d'un autre système de réparation de fissures et de brèches passives, applicable à des murs en maçonnerie appareillée ou en brique, qui consiste à introduire un liquide sous pression pour colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure. En durcissant et en adhérant au support, ce liquide restitue à l'élément endommagé sa continuité d'origine. Les caractéristiques du liquide généralement à base de composants époxydiques– et la pression d'injection varient en fonction des matériaux du mur et de la taille du trou à reboucher. Le scellement superficiel, préalable à l'injection dans la fissure ou la brèche, doit être capable de supporter la pression du liquide avant son durcissement.



Figure 35: Injections

V.7.2 Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé

Cette technique consiste à augmenter la section du mur endommagé ou sous-dimensionné en incorporant aux parements des épaisseurs de matériau –mortier ou béton– après la pose de treillis métalliques, solidarisés entre eux dans le mur. La mise en œuvre du matériau de renfort peut se faire en disposant des coffrages parallèles aux parements et en y coulant ensuite la préparation, ou bien par simple projection sur les parements avec le treillis déjà en place ou encore par gunitage en choisissant la procédure selon l'épaisseur requise et le supplément de résistance attendu du renfort. Cette solution est très polyvalente en ce qu'elle s'adapte à des structures de murs complètes, à des murs entiers ou à des pans précis. Cette qualité la rend tout spécialement appropriée pour renforcer des bâtiments que les mouvements sismiques auront abîmés, en augmentant la rigidité des parties du bâtiment qui l'exigent et, au besoin, celle de l'ensemble du bâti.

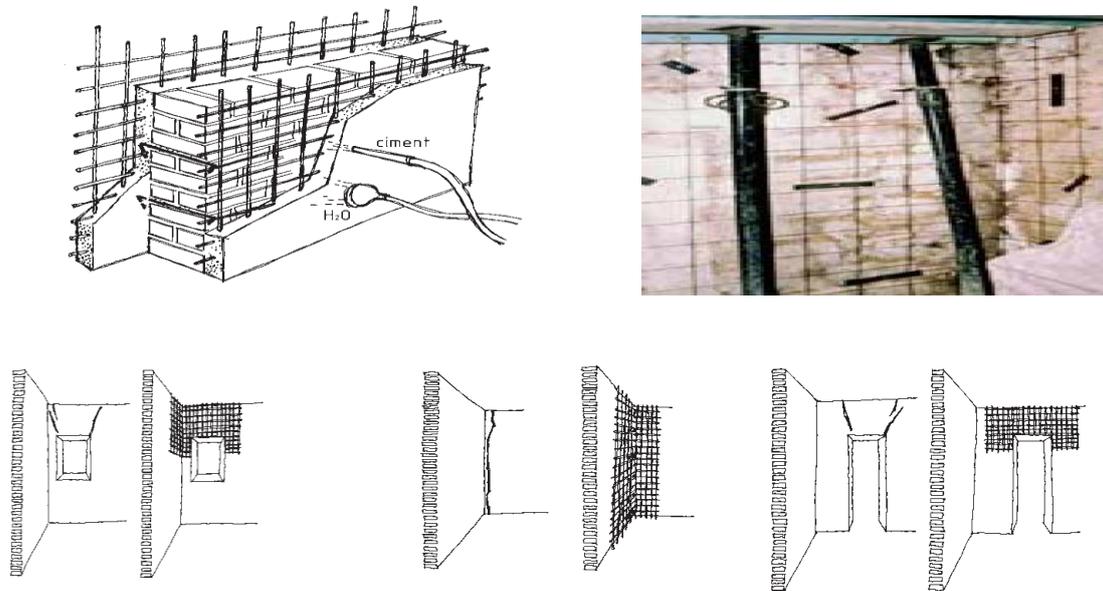


Figure 36: Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé

V.7.3 Contreforts

Leur fonction équivaut à celle des tirants et il est pratiquement obligatoire de les appliquer lorsque le bâtiment ne dispose pas d'éléments suffisamment rigides, capables d'absorber les tensions ponctuelles créées aux points d'ancrage des tirants. Dans ces cas, l'absorption des poussées des voûtes, des arcs ou de tout autre élément qui introduirait des sollicitations inclinées dans les murs, peut être confiée aux contreforts, car ils sont capables de transmettre ces actions au terrain à travers leur section. Dans la conception et le calcul du contrefort, il faut tenir compte de la forte limitation de l'assise requise par le nouveau contrefort pour fonctionner correctement.

V.8 Interventions sur les planchers et les couvertures

Les interventions sur les planchers de poutres et poutrelles en bois doivent partir d'un diagnostic préalable des causes des dysfonctionnements, dus à l'attaque d'agents biotiques, au fluage du bois ou à des déficiences dans le dimensionnement du plancher par rapport aux sollicitations mécaniques qu'il reçoit. Le choix de l'intervention requiert la connaissance des conditions d'utilisation futures et de la nécessité de conservation non seulement des éléments sur lesquels on intervient mais aussi de ceux sur lesquels l'action prévue peut avoir une influence, tels que les faux plafonds ou les sols de grande valeur artisanale et picturale.

Nous allons exposer maintenant les formes et les méthodes d'intervention les plus usuelles sur ces éléments résistants :

V.8.1 Remplacement fonctionnel des appuis sur les poutres et poutrelles

Les attaques de champignons et de termites se concentrent souvent sur les appuis des poutres et des poutrelles en bois, notamment du côté des murs extérieurs, à cause des conditions spéciales d'humidité et d'obscurité qui les caractérisent. Dans ces cas, il faut généralement procéder au remplacement fonctionnel ou au renfort des appuis endommagés par la décomposition du bois, à l'aide de l'un des nombreux procédés existants que l'on choisira en fonction de plusieurs paramètres : problème concernant quelques poutrelles désolidarisées ou une ligne d'appuis contigus, caractéristiques du mur sur lequel elles reposent, techniques disponibles et apparence formelle de la solution retenue.

V.8.2 Suppléments de résistance pour les poutres et les poutrelles

Cette technique consiste à ajouter de nouveaux éléments qui vont collaborer à l'absorption des efforts jouant sur la poutre ou les poutrelles, lorsque le dimensionnement est jugé insuffisant ou lorsque les effets du fluage du bois ont créé des déformations excessives. Les matériaux de renfort utilisés sont généralement en bois ou constitués de profilés en acier, leur position étant latérale, inférieure ou supérieure par rapport à l'élément à renforcer. On choisit la position supérieure dans tous les cas où il y a lieu de conserver l'apparence du plancher d'origine, en présence de peintures ou de faux plafonds de valeur. La position inférieure est retenue le plus souvent pour renforcer les poutrelles quand la hauteur libre au sol admet une réduction, tandis que la position latérale est plus répandue si les poutres en bois à renforcer supportent des pans entiers de planchers de poutrelles ; il suffit alors de fixer deux éléments avec des goujons traversant la poutre. Les hypothèses pour le calcul des renforts sont diverses, selon la possibilité de collaboration résistante des éléments sous-dimensionnés ou endommagés et les déformations préalables (contre-flèches) à envisager pour obtenir leur entrée en charge conjointe avec le renfort.

V.8.3 Pose additionnelle de dalles en béton armé

La pose additionnelle de dalles en béton armé, raccordées aux poutrelles en bois des planchers, est l'une des solutions les plus courantes aujourd'hui dans les interventions de réhabilitation de bâtiments. Le principe réside dans la transformation des poutrelles d'origine en poutres mixtes, bois et béton, et offre la possibilité de distribuer les tensions de la flexion de manière coplanaire dans toutes les directions du plan du plancher en augmentant la rigidité globale de la construction par la liaison de la nouvelle dalle dans l'épaisseur des murs et sur tout le périmètre, ce qui améliore aussi la résistance au séisme. Par ailleurs, le béton ajouté améliore aussi

l'isolation acoustique du plancher. L'élément le plus critique de cette solution est celui de la liaison de la nouvelle dalle avec le mur, laquelle va dépendre des caractéristiques de rigidité, de cohésion et de percement des murs, ces caractéristiques étant très variables et imprévisibles.

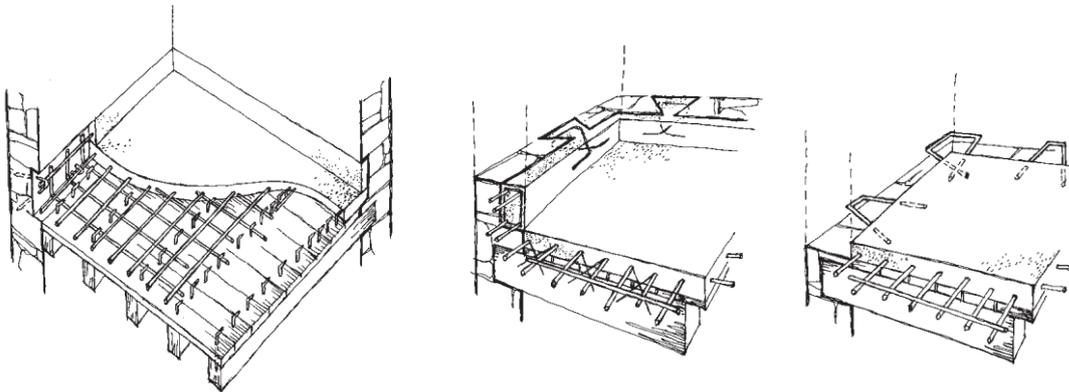


Figure 37: Pose additionnelle de dalles en béton armé

V.8.4 Interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes des couvertures

Alors que, selon l'état de ces éléments, il est généralement conseillé de les remplacer, dans la mesure où ils sont les plus exposés aux effets de l'humidité, il arrive aussi que l'on préfère envisager de les renforcer. C'est le cas lorsque leur état général le permet, selon leur importance ou leur intérêt fonctionnel. Bien entendu, le remplacement fonctionnel des appuis et leur régularisation par une disposition, si possible, sur un linteau de décharge rigide pour distribuer au mieux les charges transmises aux murs sont des opérations souvent nécessaires et recommandables. Pour le renfort des paires, tirants et contre-fiches, que l'on ne veut pas masquer, on emploie de plus en plus des armatures post contraintes pour compenser les tractions ou créer de nouveaux équilibres de forces.

V.9 Interventions dans les fondations

La décision quant au type d'intervention à entreprendre quand un bâtiment fait l'objet de problèmes découlant de mouvements du terrain requiert une connaissance du type ainsi que des caractéristiques des fondations du bâtiment, une phase de suivi de l'activité des lésions, et une autre d'information sur les caractéristiques géotechniques du terrain jusqu'à une profondeur suffisante. Ce n'est qu'après avoir obtenu l'ensemble de ces données et après cette phase d'analyse que doit être envisagé le type d'intervention à entreprendre. Ce sera précisément la

nécessité ou non d'entreprendre telle ou telle action qui fera des conditions de charge de la partie solide des fondations originales ou d'amélioration du terrain l'une des décisions les plus importantes à prendre dans cette phase initiale. Lorsque les fondations du bâtiment sont de type superficiel, ce qui constitue le cas le plus fréquent, le système le plus habituel de reprise est celui qui consiste à placer en-dessous un support un peu plus large compacté à la partie solide des fondations préexistantes. Il faut définir dans chaque cas, en fonction des caractéristiques du terrain, la fondation à renforcer, la ; profondeur et la largeur du nouveau support, ainsi que la longueur des tranchées d'excavation effectuées sous les fondations préexistantes.

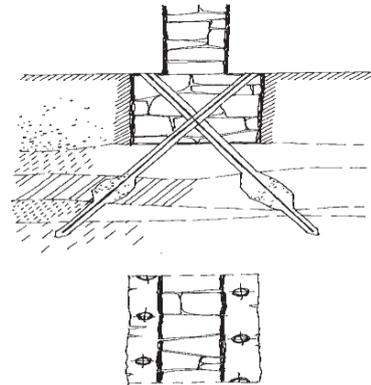


Figure 38: Interventions dans les fondations

Conclusion générale

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 de constructions neuves au détriment du maintien de l'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 bâtiments et ouvrages en tant que fonction à part entière n'a été prise au sérieux que vers les années deux mille.

- 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 termes 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.

De nombreux bâtiments 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 les structures 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.

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.

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] **PIGEON (M), MARCHAND (J), PLEAU (R)**, « Frost resistant concrete », Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996.
- [2] **TUUTTI (K)**, « Corrosion of steel in concrete », Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed, Stockholm, 1982.
- [3] **ACKER (P)** « Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique », rapport de recherche LCP n° 152, juillet 1988
- [4] **WOOD (J)**, « Désordres provoqués par la réaction alcalis-granulats dans les ouvrages en béton armé », Annales de l'ITBTP n° 469, Novembre 1988
- [5] **ACKER (P)**, « Retraits et fissurations du béton », documents scientifiques et techniques de l'Association française pour la construction, France, septembre 1992
- [6] **GOTO Y**, « Cracks formed in concrete around deformed tension bars », ACI Journal, Proceedings, Vol. 68, n°4, 1971, pp. 244-251.
- [7] **RAHARINAIVO A., ARLIGIE G., CHAUSSADENT T., GRIMALDI G., POLLET V. et TACHE G.**, « La corrosion et la protection des aciers dans le béton », Presse Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1998.
- [8] **RAHARINAIVO A, Genin J.M.**, « Sur la corrosion des armatures du béton en présence de chlorures », Bulletin de liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 144, 1986, pp. 59-64
- [9] **POURBAIX (H)**, « Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution », Oxford, 1966.
- [10] **LARIVE (C.) et LOUARN (N.)**. – Diagnosis of alkali-aggregate réaction and sulphate réaction in french structures. - 9e Conférence Internationale sur l'alcali-réaction, Londres, 27-31 juil. 1992.
- [11] **LE ROUX (A.), MASSIEU (E.) et GODART (B.)**. – Evolution under stress of a concrete affected by AAR. Application to the feasibility of strengthening a bridge by prestressing.

[12] The Institution of Structural Engineers. Structural effects of alkali-silica reaction – Technical guidance on the appraisal of existing structures, juil. 1992.

[13] **DYSLI (M)**, « Le gel et son action sur les sols et les fondations » Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991.

[14] **BARRON J**, «Formation de la microstructure. Hydratation, prise, durcissement », Le béton et l'eau, Séminaire Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 18-20 juin 1985, Conseil international de la langue française, Ed, 1987, pp. 26-45.

[15] **JOCELYNE JACOB (S)**, « Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion », documents scientifiques et techniques de l'AFGC, par le groupe de travail AFGC/CEFRACOR (Centre Français de l'Anticorrosion), Novembre 2003

[16] **GODART (B)**, « Progression dans les connaissances sur les phénomènes d'alcali-réaction. Evaluation et surveillance des ouvrages », Annales de l'ITBTP, Octobre 1993

[17] **BEEBY A.W**, «Corrosion of steel in concrete », Trans. J. Brit. Cer. 1981, pp. 97-100.

[18] **ANDRADE C, ALONSO C**, «Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site », Construction and Buildings Materials, Vol. 10, n°5, 1996, pp. 315-328.

[19] **JEAN ARMAND CALGRO et ROGER LACROIX** « Maintenance et réparations des ponts »

[20] **VESIKARI E**, «Reliability of corrosion rate measurement by linear polarization», Proceedings of the International Workshop MESINA, Measurement and interpretation of the On-site corrosion rate, RILEM, Madrid, Spain, 1999, pp.15-31.