



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



Université Amar Telidji- Laghouat

Faculté de Génie civil et d'Architecture

Département de Génie civil

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Travaux Publics

OPTION : Voies et Ouvrages d'arts

Présenté par : Brahimi Yasmine et Lachlegue Karima

Thème

**Etude des pathologies courantes dans les
ouvrages d'art, analyse et mesures préventives**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr Boukhelkhal Aboubakeur	MCA	Président
Mr. Annane Abdellah	MAA	Examineur
Mme. Damene Zineb	MCA	Encadrant

Promotion : 2022 - 2023

Dédicace

Ma mère, l'étoile brillante de mon cœur, pour son amour et tout ce qu'elle a fait pour moi. Que Dieu la protège."

À mon cher père, pour son amour, son soutien, et la sécurité qu'il m'a offerte. Ô Dieu, protège-le.

À ma chère sœur, Naziha, et à mes frères, Mohammed et Sid Ahmed, pour leur amour et leur soutien envers moi. Ô Dieu, protège-les.

À l'âme précieuse de mon grand-père paternel. Ô Dieu, aie pitié de lui pour sa bienveillance envers moi

À mes grands-parents, pour leurs prières constantes pour moi, ô Seigneur, protège-les.

À tous les membres de la famille Brahimi et Saadoudi.

mes oncles et mes cousins , mes tantes

À ma collègue de travail, Karima Lachlag

À mes amis, Anfal, Safiya, et Chaima , Chaima2, Halima ,Hadil...

A Ma chère mariam karssa

À mon fiancé Oualid.

A mon encadreur Mme Z. Damene

A Mes voisines dans la cité universitaire de LAGHOUAT

A Toute la promotion 2022/2023

Brahimi Yassmine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, Fruit d'énormes sacrifices :

A mon père qui a consacré sa vie pour la réussite de ses enfants

A Ma Mère, Pour son sacrifice

A mon marie, Pour son sacrifice

Je tiens également à remercier ma deuxième famille

A mes sœurs pour les sacrifices

A Mon encadreur Mme Z. Damene

A mon Amis de binôme (Brahimi Yassmine)

A toute personne qui a contribué à l'achèvement de ce travail

Lachlege Karima

Remerciement

*Avant tout, nous **remercions Allah** pour nous avoir guidés durant toutes les années d'études et nous avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.*

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif de certaines personnes que nous tenons à remercier personnellement.

*Nous remercions notre encadreur Madame « **Zineb Damene ép Goual** » d'avoir accepté d'être notre encadrant et pour avoir dirigé ce travail, ainsi que pour la confiance qu'elle nous a prodiguée durant la réalisation de ce travail.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury « **Mr Anan abdellah et Mr Boukhelkhal Aboubakeur** » pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre étude en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs critiques.*

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

Et enfin, que tous ceux qui ont contribué à notre formation morale et scientifique et dont les noms ne figurent pas ici, trouvent à travers ce travail l'expression de notre profonde gratitude.

Résumé :

L'étude des pathologies courantes dans les ouvrages d'art est cruciale pour la gestion des infrastructures et la durabilité à long terme. Ces structures, comme les ponts et les tunnels, jouent un rôle essentiel dans la société, mais sont exposées à des facteurs environnementaux et à l'usure, les rendant vulnérables aux dommages. Cette étude vise à comprendre ces pathologies, à analyser leurs causes et à proposer des mesures préventives. Elle repose sur des méthodes d'inspection, des essais et méthodes pour identifier les risques et garantir la sécurité publique tout en promouvant la durabilité des ouvrages d'art. Cette recherche est vitale pour préserver notre patrimoine bâti, garantir la sécurité et minimiser les coûts à long terme.

Mots clés : Pathologie, ouvrage d'art, causes, inspection, risque, prévention

ملخص :

دراسة الأضرار الشائعة في الهياكل الهندسية تعتبر أمرًا بالغ الأهمية لإدارة البنية التحتية وضمان استدامتها على المدى الطويل. هذه الهياكل، مثل الجسور والأنفاق، تلعب دورًا أساسيًا في المجتمع، ولكنها تتعرض لعوامل بيئية وتآكل، مما يجعلها عرضة للتلف. تهدف هذه الدراسة إلى فهم هذه الأمراض، وتحليل أسبابها، واقتراح تدابير وقائية. تعتمد هذه الدراسة على طرق فحص واختبار وطرق لتحديد المخاطر وضمان سلامة الجمهور مع تعزيز الاستدامة. هذا البحث ضروري للحفاظ على تراثنا وضمان السلامة وتقليل التكاليف على المدى البعيد.

الكلمات المفتاحية: علم الأضرار، الهياكل الفنية، الأسباب، التفتيش، المخاطر، الوقاية

Abstract

The study of common pathologies in civil engineering structures is crucial for infrastructure management and long-term sustainability. These structures, such as bridges and tunnels, play an essential role in society but are exposed to environmental factors and wear and tear, making them vulnerable to damage. This study aims to understand these pathologies, analyze their causes, and propose preventive measures. It relies on inspection methods, testing, and numerical models to identify risks and ensure public safety while promoting sustainability. This research is vital for preserving our heritage, ensuring safety, and minimizing long-term costs.

Key words: Pathology, engineering work, causes, inspection, risk, prevention

Table des matières

Liste des figures
Liste des tableaux

Résumé :	6
Introduction générale	1
Chapitre I	3
Revue bibliographique sur les pathologies des ouvrages d'art et les principes de diagnostic	3
I.1 Introduction	4
I.2 Origine des pathologies des ouvrages d'art	4
I.2.1 Erreurs de conception	4
I.2.2 Erreurs d'exécution	5
I.2.3 Actions dues au trafic	5
I.2.4 Actions dues au climat	5
I.2.4.1 Action de la température	5
I.2.4.2 Action de l'eau	6
I.2.4.3 Action du vent	6
I.2.5 Actions Accidentelles	6
I.2.5.1 Le choc	7
I.2.5.2 Le séisme	7
I.3 Les pathologies rencontrés	8
I.3.1 Dégradation d'origine physique ou mécanique	8
I.3.1.1 Cycle de gel-dégel.....	9
I.3.1.2 Le retrait.....	10
I.3.1.3 Le ressuage.....	10
I.3.2 Les actions chimiques	11
I.3.2.1 L'alcali-réaction	11
I.3.2.2 l'attaque sulfatique	12
I.3.2.3 La carbonatation.....	13
I.3.2.4 Actions des acides	14
I.3.2.6 Corrosion de l'acier	16
I.3.3 Les dégradations de la surface	17
I.3.3.1 L'érosion.....	17
I.3.3.2 L'abrasion.....	17

I.3.3.3 Cavitation	18
I.3.3.4 Fissuration.....	18
I.4 principes d'évaluation et diagnostic des ouvrages d'art	19
I.4.1 Diagnostic préliminaire	20
I.4.1.1 L'inspection des ouvrages :	20
I.4.1.2 L'auscultation des ouvrages	21
I.5 Conclusion :	24
CHAPITRE II.....	25
Techniques de réparation et réhabilitation des ouvrages d'art	25
II.1. Introduction	26
II.2. Définitions des techniques d'intervention	26
II.2.1. Réhabilitation	26
II.2.2. Restauration	27
II.2.3. Réparation	27
II.2.4. Renforcement	28
II.3. Principales catégories de dégradations	28
II.4 Différents types d'entretien	30
II.4.1 Entretien courant	30
II.4.2 Entretien spécialisé.....	30
II.5 Méthodes et matériaux de réparation	31
II.5.1 Critères de choix des méthodes de réparation.....	31
II.5.2 Les matériaux de réparation	32
II.5.2.1 Bétons Conventionnels (selma, 2004)	32
II.5.2.2 Les latex.....	32
II.5.2.3 Les mortiers latex	32
II.5.2.4 La résine époxy.....	33
II.5.2.5 Les matériaux composites	33
II.5.2.6 Les charges	33
II.5.2.7 Les matériaux de renfort.....	34
II.5.2.8 La matrice	34
II.5.3 Les méthodes de réparation	34
II.5.3.1 Remplacement Du Béton Altéré	34
II.5.3.2 Adjonction d'armature complémentaire	34
II.5.3.3 Renforcements et réparation par Matériaux composite	35
II.5.3.4 Le Renforcement Au Moyen Des Profiles Métalliques (Hicham, 2009):	38

II.5.3.5 Béton Projeté	39
II.5.3. 6 La précontrainte additionnelle	41
II.5.4 Les traitements des ouvrages	42
II.5.4.1 Ré-alkalinisation Du Béton Carbonate (Hikmat , 2008).....	42
II.5.4.2 Extraction Electrochimique Des Ions Chlores :	43
II.5.4.3 La Protection Cathodique	45
II.6. Conclusion.....	46
Chapitre III.....	47
Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives	47
III.1 Introduction	48
III.2 Étude des cas pathologiques	48
III.2.1 Cas lié à un problème d'exécution	48
III.2.1.1 Analyse du défaut	49
III.2.1.2 Conséquences sur les ouvrages	49
III.3.2.3 Solutions et mesures préventives	50
III.2.2 Cas d'un ouvrage soumis à un choc	51
III.2.2.1 Désordres constatés	52
III.2.2.2 Solutions envisagées	54
III.2.3 Cas lié à un problème de corrosion	56
III.2.3.1. Désordres constatés	57
III.2.3.2. Analyse des causes de dégradation	61
III.2.3.3. Solutions envisagées	62
III.2.4. Cas lié à un problème L'eau :	63
III.2.4.1. Analyse du défaut	63
III.2.4.2. Conséquences sur les ouvrages	64
III.2.4.3. Solutions et mesures préventives :	64
III.3. Conclusion	66
Références	70
Liste des Abréviations :	71

Liste des Figures

Figure I. 1:Les diverses altérations engendrées par l'impact.....	7
Figure I. 2:Le séisme	8
Figure I. 3:Image au MEB d'un fissure Interne Due au Cycle de gel-dégel	9
Figure I. 4: Le ressuage	10
Figure I. 5:Observation au microscope électronique à balayage des produits de la réactions alcali _silice.....	11
Figure I. 6:Fissures de type faïençage sur le pilier d'un pont effectuée par La réaction alcali silice	12
Figure I. 7: Illustrations de structures affectées par l'attaque des sulfates	13
figure I. 8:Processus de Carbonatation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$	13
Figure I. 9: processus de dégradation causé par l'action des acides	14
Figure I. 10 Chlorures présents dans la microstructure du béton :(a) liés et (b) non liés (Na Cl):.....	15
Figure I. 11:Corrosion atmosphérique des structures Métalliques	16
Figure I. 12:Corrosion des armatures au sein des constructions en béton armé	17
Figure I. 13:Fissures de forme polygonale et Zones soumises à l'érosion par abrasion	17
Figure I. 14:Abrasion visible sur des fondations du pont	18
Figure I. 15:Cavitation	18
Figure II. 1:Réhabilitation des immeubles d'Alger.....	26
Figure II. 2:Restauration de la citadelle d'Alger (palais du dey) à la casbah d'Alger	27
Figure II. 3:Réparation de béton	28
Figure II. 4:Courbes de dégradation d'une structure.....	30
Figure II. 5:Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre	35
Figure II. 6:les principes de l'enroulement (ROCHDI 2004)	36
Figure II. 7:Mise en œuvre par Stratification directe	37
Figure II. 8:Procède par collage De plaque (sika, 1996).....	38
Figure II. 9:Renforcement de poteaux Au moyen de profiles Métallique.....	39
Figure II. 10:Projection par voie humide	40
Figure II. 11:Projection par voie sèche.....	41
Figure II. 12:Tracés rectiligne	41
Figure II. 13:Tracés polygonal	42
Figure II. 14:illustration du processus électrochimique de relatinisation	43
Figure II. 15:Schéma D'application D'un traitement d'EC	44
Figure III. 1:Etat de l'intrados d'un ouvrage en béton armé sans étanchéité	48
Figure III. 2:Dissolution du mortier de jointoiement avec déplacement des moellons.....	50
Figure III. 3:Vue de l'ouvrage après le heurte de l'engin.....	52
Figure III. 4:Destruction des poutres de l'ouvrage	52
Figure III. 5:Différentes Fissures sur plusieurs poutres de l'ouvrage.....	53
Figure III. 6:Discontinuité du béton entre l'âme et le talon supérieur.....	53
Figure III. 7:Eclatement du béton et apparition des aciers et des câbles de précontrainte.....	54
Figure III. 8:Enlèvement les poutres endommagées	55
Figure III. 9:Pose des nouvelles poutres	55

Figure III. 10:Reconstitution de la partie de la dalle démolie	56
Figure III. 11:Reconstitution du trottoir et pose garde-corps	56
Figure III. 12:Disposition de la galerie à la ville de Touggourt	57
Figure III. 13:Schéma 3D avec la section transversale de la galerie.....	57
Figure III. 14:La Carbonatation des parois du regard de galerie	58
Figure III. 15:la corrosion des armatures d'une paroi extérieure de galerie	58
Figure III. 16:la corrosion des armatures et l'éclatement du béton d'une paroi.....	58
Figure III. 17:La Corrosion des armatures et la fissuration du béton a la dalle	59
Figure III. 18:ségrégation de dalle de la dernière partie première de galerie.....	59
Figure III. 19:Ségrégation de dalle de la partie de galerie	59
Figure III. 20:L'éclatement du béton d'une paroi de faible d'enrobage d'acier.....	60
Figure III. 21:Les dégradations des faces extérieures des dalles de galerie	60
Figure III. 22:Fissuration transversale du béton d'une poutre de dalle de galerie.....	60
Figure III. 23:Fissuration longitudinale d'une paroi de galerie	61
Figure III.24:Dégradation des parois intérieures de galerie sous l'effet de perméabilité.....	61

Liste des Tableaux

Tableau 1: Résumé des Principaux instruments de mesure employés sur les ouvrages d'art...	23
Tableau 2: Classification des altérations du béton	29

Introduction générale

Introduction générale

L'étude des pathologies courantes dans les ouvrages d'art constitue un domaine crucial de l'ingénierie civile et de la gestion des infrastructures. Les ouvrages d'art, tels que les ponts, les tunnels, les barrages et les viaducs, jouent un rôle fondamental dans notre société en assurant la fluidité des transports, la gestion des ressources en eau et la sécurité publique. Cependant, au fil du temps, ces structures sont exposées à diverses contraintes environnementales, à l'usure naturelle et aux charges de circulation, ce qui les rend vulnérables aux pathologies.

Cette étude vise à comprendre à travers une recherche bibliographique les pathologies courantes qui affectent ces ouvrages d'art, à analyser leurs causes et à développer des mesures préventives pour garantir leur durabilité et leur fonctionnalité à long terme.

Les pathologies peuvent prendre de nombreuses formes, telles que la corrosion, la fissuration, la déformation, l'érosion, et bien d'autres encore. Chacune de ces pathologies peut avoir des conséquences graves, allant de la détérioration de la structure à la mise en danger de la sécurité publique.

L'analyse des pathologies courantes dans les ouvrages d'art repose sur une combinaison de méthodes d'inspection visuelle, d'essais non destructifs, de modélisation numérique et d'expertise technique. Ces études permettent d'identifier les facteurs contributifs et de quantifier l'étendue des dommages. Sur cette base, des mesures préventives peuvent être élaborées pour minimiser les risques et préserver l'intégrité des structures.

Dans ce contexte, cette recherche vise à explorer en profondeur les pathologies courantes dans les ouvrages d'art, à comprendre leurs mécanismes et à connaître les propositions des solutions novatrices pour assurer la pérennité de ces infrastructures cruciales. Il s'agit d'un domaine d'étude essentiel pour l'ingénierie civile et la gestion des infrastructures, avec des implications majeures pour notre société et notre avenir.

Notre travail est divisé en trois chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les principales pathologies et désordres affectant les ouvrages d'art ainsi que les principes d'évaluation et diagnostic des ouvrages existants.

- ✓ Dans le deuxième chapitre, on a parlé des différentes techniques d'interventions et méthodes et matériaux de réparation
- ✓ Dans le troisième chapitre, on a abordé des exemples d'étude de diagnostic et analyse des cas particuliers présentant les plus importantes pathologies rencontrées dans les ouvrages d'art.

Chapitre I

Revue bibliographique sur les pathologies des ouvrages d'art et les principes de diagnostic

I.1 Introduction

Dès qu'ils entrent en service, les ouvrages de toutes natures commencent un processus de vieillissement qui durera tout au long de leur existence. Les ouvrages d'art, en particulier, peuvent être sujets à divers problèmes de gravité variable, aux origines multiples. Ces problèmes se manifestent au niveau des matériaux et de la structure, et ont un impact sur la stabilité et la durabilité de l'ouvrage. Ainsi, comprendre l'origine de ces problèmes permet non seulement une meilleure conception et construction des ouvrages, mais également la recherche de solutions appropriées pour leur réparation.

Dans ce contexte, nous présentons dans ce chapitre une revue bibliographique sur les principales causes probables des pathologies et désordres qui touchent fréquemment les ouvrages d'art.

I.2 Origine des pathologies des ouvrages d'art

Les variations des charges (dû au trafic et aux conditions climatiques) ainsi que les incidents accidentels jouent un rôle significatif dans la détérioration des ouvrages, en plus des éventuels défauts qui peuvent survenir lors de la phase de conception et de construction, lesquels peuvent également contribuer à l'apparition de problèmes. (TANKEU, et al., 2011)

I.2.1 Erreurs de conception

Les erreurs les plus couramment observées se rapportent principalement au poids propre de la structure, avec une sous-estimation de la masse volumique du béton et du poids des équipements, des erreurs de mesure, ainsi que l'oubli du poids de certaines pièces. En fonction de l'âge d'un ouvrage, le poids de certains équipements peut également connaître des variations importantes. Par exemple, dans le cas d'un pont routier, il est possible de recharger la couche de roulement de la chaussée. De plus, il est à noter que la prise en compte insuffisante des risques de corrosion pendant la phase de conception peut entraîner des problèmes tels que l'absence de chape d'étanchéité, une mauvaise évacuation des eaux provoquant des écoulements sur les poutres, et des joints de chaussée qui permettent à l'eau de s'infiltrer sous le tablier.

I.2.2 Erreurs d'exécution

En général, les erreurs d'exécution résultent soit d'une insuffisance des documents de mise en œuvre, ce qui entraîne des improvisations aux conséquences souvent graves, soit de lacunes dans l'organisation ou le contrôle de la qualité, ou encore du non-respect de certaines règles de l'art. De nombreux problèmes surviennent en raison de plans de ferrailage incomplets ou "illisibles" parce qu'on a tenté de regrouper toutes les informations nécessaires à l'exécution sur un seul dessin, ou parce qu'une partie de l'ouvrage a été représentée à une échelle inappropriée. Dans les cas courants, c'est la qualité de la mise en œuvre des différents matériaux qui est principalement en cause. Sur le chantier, le béton peut présenter une qualité médiocre pour diverses raisons : irrégularités dans la fabrication sur le chantier, absence de contrôle des délais de transport depuis une centrale de béton prêt à l'emploi, mauvaise réalisation des reprises de bétonnage, utilisation de coffrages mal nettoyés, ségrégation due à une hauteur de chute excessive, etc. (TANKEU, et al., 2011)

I.2.3 Actions dues au trafic

Les ponts par exemple et chaussées ont pour fonction de supporter la circulation routière, ce qui constitue l'une des principales raisons de leur détérioration, à la fois en raison des contraintes extrêmes et des contraintes répétitives qu'elle engendre (fatigue). Les modes de transport et leurs caractéristiques ont évolué au fil du temps, notamment avec l'augmentation de la vitesse des véhicules, ce qui influe considérablement sur la durabilité des ouvrages routiers.

I.2.4 Actions dues au climat

Les ouvrages sont exposés aux influences de l'environnement qui les entoure tels que : la température, l'eau et le vent

I.2.4.1 Action de la température

La température est l'une des causes de la fissuration du béton pendant sa phase de durcissement en raison de son séchage naturel, un phénomène connu sous le nom de fissuration due au retrait de dessiccation. À l'inverse, le bétonnage par temps froid, sans précautions particulières, comporte un risque de gel de l'eau dans le béton, ce qui entraîne sa détérioration par expansion. De plus, la rapide augmentation de la vitesse d'hydratation du

ciment crée des écarts de température entre le cœur des pièces coulées et leur surface, augmentant ainsi le risque de fissuration lorsqu'elles refroidissent.

L'acier est également sensible à la température : lorsque la température d'une éprouvette d'acier soumise à une tension varie, on observe une variation parallèle de ses caractéristiques de ductilité.

I.2.4.2 Action de l'eau

L'eau constitue également une source de problèmes pour les structures des ouvrages d'art. Dans le cas des ouvrages en béton, l'infiltration d'eau dans le matériau peut causer des dommages (phénomènes de gel-dégel, corrosion des armatures). L'action mécanique de l'eau peut également se manifester sur les structures par le biais de phénomènes d'affouillement et d'abrasion. Ces phénomènes peuvent être dus aux courants hydrauliques et à la présence d'obstacles dans le lit des cours d'eau, ce qui entraîne l'érosion des protections des appuis et des problèmes au niveau des fondations. La présence d'objets flottants tels que des arbustes déracinés peut également causer des chocs sur les parements des ouvrages. (TANKEU, et al., 2011)

I.2.4.3 Action du vent

Tout comme la température, le vent a une influence sur le béton utilisé dans la construction des ouvrages d'art. Ce phénomène se manifeste par l'action sur le béton frais, phénomène connu sous le nom de dessiccation du béton.

Le second effet du vent concerne la structure elle-même de l'ouvrage. Il s'agit de l'effet dynamique du vent sur la structure, se traduisant par son déplacement et pouvant entraîner des phénomènes tels que le flottement ou le galop, en particulier pour les structures souples telles que les ponts suspendus. (BOUTARAA , 2019)

I.2.5 Actions Accidentelles

Nous considérons les inondations, les séismes, les accidents de véhicules et les incendies comme actions accidentelles pouvant avoir de graves conséquences et pathologies dans les ouvrages. Les niveaux de sécurité sont évalués de manière probabiliste, Le risque absolu et la fréquence de ces actions ne peut être pris en compte. En conséquence, toute structure, quelle qu'elle soit, sera exposée à des contraintes extérieures qui auront un impact sur sa durée de vie.

I.2.5.1 Le choc

Ce phénomène se produit le plus souvent suite à une attaque mécanique, caractérisée par des chocs. Les chocs les plus fréquents sont ceux causés par exemple ; par des poids lourds hors gabarit contre la partie inférieure des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles situées en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue, qui constituent une autre source de chocs non négligeable.

Les dommages causés par ces chocs se manifestent généralement par des ondes de choc. Les éléments en béton sont écaillés, laissant souvent à découvert l'armature interne. (Hamlaoui , 09/12/2012)



Figure I.1: Les diverses altérations engendrées par l'impact

I.2.5.2 Le séisme

Plusieurs régions peuvent être considérées comme étant sujettes à des activités sismiques. Il est très important lors de la conception des structures d'ouvrages d'art de considérer le risque sismique dans le but de prévenir les effondrements catastrophiques et de réduire les niveaux de dommages. Le séisme le plus récent en Algérie ayant affecté la région de Boumerdès en 2003, d'une magnitude de Mw 6.8, en est une illustration notable. Cet événement a également suscité des débats quant à la prise en compte du risque sismique lors de la conception des structures. En effet, l'intégration des études parasismiques est relativement récente, marquée par la mise en application du premier règlement parasismique pour les structures d'art en Algérie en 2006. (Hamlaoui , 09/12/2012)





Figure I. 2:Le séisme

I.3 Les pathologies rencontrés

Les ouvrages d'art en béton armé sont principalement composés de deux matériaux, à savoir le béton et l'acier utilisé pour les armatures. Nous allons donc examiner les différents problèmes auxquels ces composants peuvent être exposés.

Certains de ces problèmes, que l'on peut qualifier de "visibles", découlent directement de facteurs externes auxquels la structure est soumise. C'est notamment le cas de la corrosion des armatures métalliques, qui peut provoquer des dégradations, ainsi que de la fissuration du béton.

En revanche, d'autres problèmes, tels que la réaction alcali-agrégat, sont attribuables uniquement aux caractéristiques intrinsèques du matériau lui-même. En effet, l'interaction entre les granulats siliceux présents dans le béton et les alcalins contenus dans la pâte de ciment peut entraîner un gonflement du béton en présence d'eau

Le béton est donc soumis à diverses formes d'agression, qu'elles soient d'ordre physique, physico-chimique ou chimique, et leur gravité est étroitement liée à la rapidité avec laquelle l'eau pénètre dans son réseau capillaire. Ses propriétés se détériorent lorsque des agents externes interagissent avec les hydrates du ciment, créant ainsi des composés expansifs ou solubles.

I.3.1 Dégradation d'origine physique ou mécanique

Les différents phénomènes d'érosion et d'abrasion se manifestent au niveau des supports des ponts en raison du courant et des impacts de corps flottants contre les parois. Les signes les plus fréquents sont :

➤ **L'écaillage de la surface :**

L'exposition à certains phénomènes climatiques tels que le vent ou les écoulements d'eau (ruissellement et suintement) peut entraîner la dégradation des surfaces extérieures de la structure. Cela se manifeste par la disparition de la couche de ciment, laissant apparaître des agrégats de pierre. Ces "nids de cailloux" rendent les granulats vulnérables aux agressions extérieures. Il est important de noter que de tels défauts dans les revêtements n'ont pas d'impact direct sur le comportement structurel de l'ouvrage

➤ **Le gonflement de la surface :**

Ces dommages, qu'ils affectent l'intégralité ou une partie de la structure, sont généralement accompagnés d'une fissuration en forme de réseau. L'ampleur de ces détériorations dépend naturellement de la porosité variable du béton et de son degré de saturation. (TANKEU, et al., 2011)

I.3.1.1 Cycle de gel-dégel

Ces détériorations affectent principalement les parties non protégées par une couche imperméable et sont exacerbées par l'utilisation de sels anti-gel. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage de la surface et le gonflement de la structure en totalité ou en partie, souvent accompagnés d'une fissuration en forme de réseau. Consultez La Figure (I. 3) «ci-dessous pour plus de détails. (Ouiza , 2017)

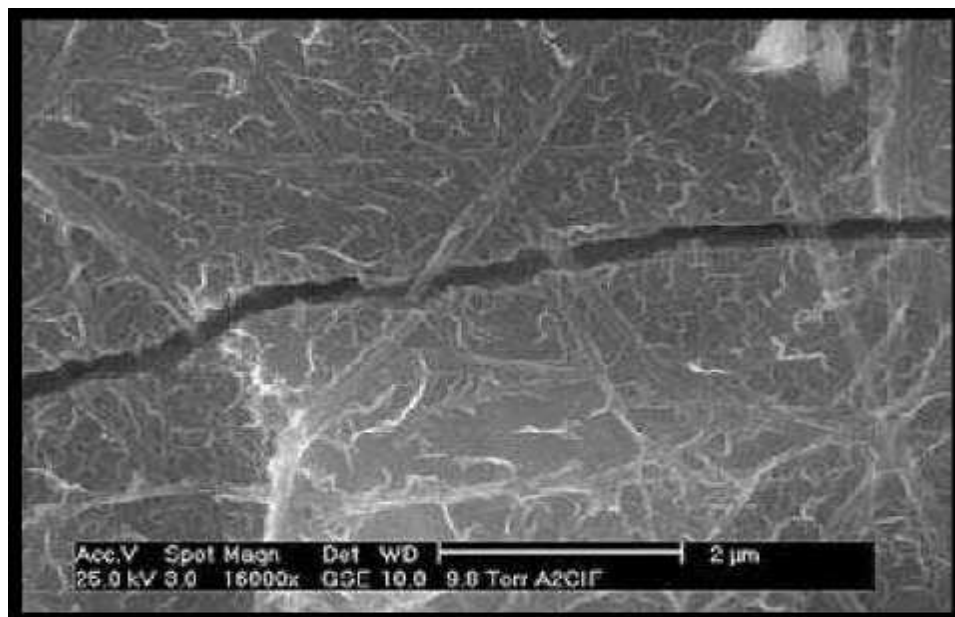


Figure I.3:Image au MEB d'un fissure Interne Due au Cycle de gel-dégel

I.3.1.2 Le retrait

Le retrait du béton entraîne fréquemment des fissures, qui peuvent être orientées dans une direction spécifique ou multidirectionnelles. Certaines fissures peuvent se former une ou deux heures après la coulée du béton, en raison du tassement du béton frais dans les coffrages et du phénomène de ressuage qui l'accompagne. Elles peuvent également être causées par une sédimentation du béton due à un manque de compacité et ont souvent tendance à suivre le tracé des armatures situées à la surface supérieure.

D'autres fissures apparaissent juste après le retrait du coffrage, formant un réseau de quelques décimètres de côté. Enfin, certaines fissures peuvent surgir plusieurs jours voire plusieurs mois après le retrait du coffrage. Ces fissures sont le résultat du retrait par dessiccation, également appelé retrait à long terme, qui survient lorsque l'excès d'eau dans le béton s'évapore avec le temps. (TANKEU, et al., 2011)

I.3.1.3 Le ressuage

Le ressuage se réfère à la libération en surface d'une fine couche d'eau sur le béton frais, accompagnée d'un compactage de sa structure granulaire. Généralement, la formation d'une pellicule d'eau en surface prévient le dessèchement et le retrait plastique du béton. Cependant, le phénomène de ressuage peut avoir des effets négatifs, notamment en compromettant l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats, ainsi que l'adhérence entre l'acier et le béton. Par ailleurs, le tassement provoqué par le ressuage peut entraîner la formation de fissures dans le béton, réduisant ainsi sa résistance à l'eau. (BOUKSANI , 2013)

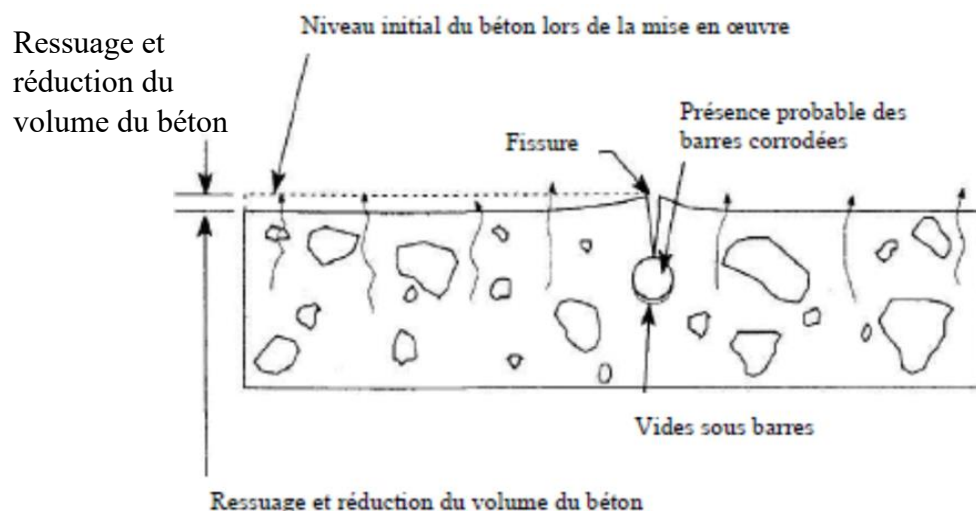


Figure I. 4: Le ressuage

I.3.2 Les actions chimiques

I.3.2.1 L'alcali-réaction

La réaction alcali-silice est un processus chimique qui se déroule lentement entre certains granulats potentiellement réactifs et les alcalins solubles tels que les ions sodium Na^+ et potassium K^+ . Ces alcalins sont normalement présents dans les constituants du béton, principalement le ciment (représentant environ 80 %), ou proviennent de l'environnement, comme les eaux souterraines, les sels de déverglaçage et l'eau de mer. Découverte pour la première fois en 1940 en Californie, aux États-Unis, cette réaction, également appelée alcali-réaction ou cancer du béton, a été identifiée comme la cause de désordres dans des structures en béton armé. Malheureusement, jusqu'à présent, il n'existe aucun remède pour les pathologies liées à cette réaction, qui ont une période d'incubation prolongée, allant de 2 à 40 ans.

Lorsque l'humidité est élevée ($\text{HR} > 80\%$), la silice réactive présente dans les granulats réagit avec la pâte de ciment, entraînant ainsi la formation d'un gel gonflant contenant des silicates alcalins qui provoquent la fissuration du béton. (BOUTARAA, 2019).

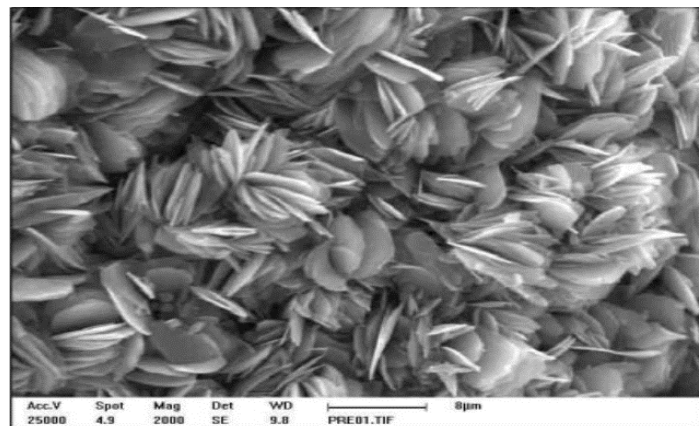


Figure I.5: Observation au microscope électronique à balayage des produits de la réaction alcali _silice

Les principaux signes d'une alcali-réaction comprennent des fissurations en forme de faïençage sur les parois en béton, présentant des contours polygonaux (**Figure I.5**). On observe également des fissurations orientées dans le sens des contraintes pour les parties de la structure pré ou post-contraintes, ou fortement armées. En plus de cela, on peut constater la formation de cratères et de gel blanchâtre qui durcit à l'air Libre . Cependant, pour confirmer la présence de cette pathologie, des analyses au microscope à balayage électronique (MEB) sont nécessaires (BOUTARAA, 2019)



Figure I.6:Fissures de type faïençage sur le pilier d'un pont effectuée par la réaction alcali silice

I.3.2.2 l'attaque sulfatique

Les phénomènes responsables de l'attaque sulfatique ne sont pas complètement connus ni maîtrisés. Elle est liée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, à une expansion importante et à une détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion, etc.). Cela peut entraîner la dégradation du matériau en béton, à court ou à long terme selon l'ampleur de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates en contact) et le type de ciment utilisé (rapport eau/ciment et type de ciment). On distingue l'attaque sulfatique interne, où les sulfates sont déjà présents dans le béton, de l'attaque sulfatique externe qui se produit lorsque les conditions externes sont réunies.

Les Produits Résultants de l'attaque : Trois types de composés peuvent se former en fonction de la concentration en sulfate de l'eau, du pH environnant et de la température (voir **Figure I.7**)

- L'ettringite,
- Le gypse,
- La trémoalite. (ZIGHEM, 2021)

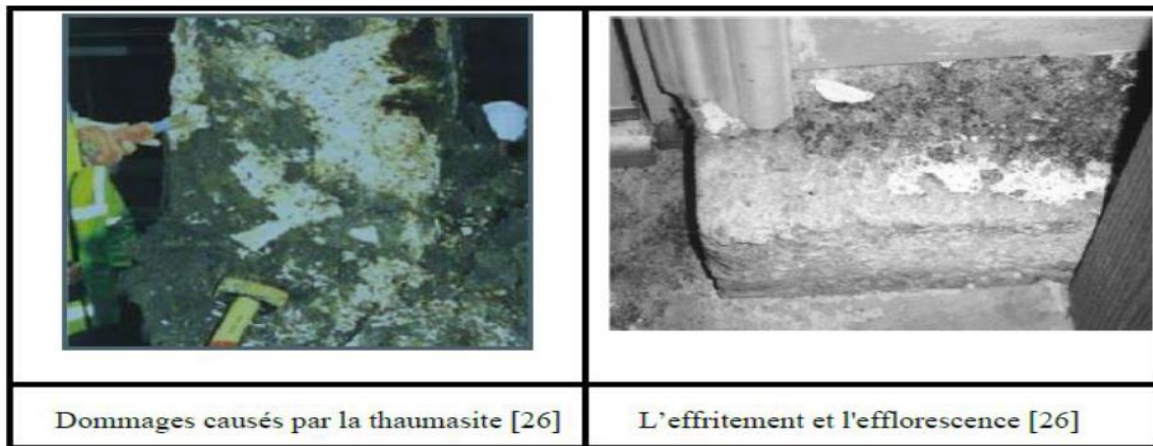


Figure I. 7: Illustrations de structures affectées par l'attaque des sulfates

I.3.2.3 La carbonatation

Ce phénomène est le résultat de la réaction chimique entre les gaz de dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère et les éléments constitutifs de la pâte de ciment hydratée qui sont susceptibles de réagir, tels que : la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, les silicates de calcium hydratés (C - S - H), les chloroaluminates et les sulfoaluminates (voir **Figure I. 8**).

Comme de nombreux autres gaz, le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former un acide faible (H_2CO_3) qui réagit avec la majorité des hydrates présents dans le ciment :

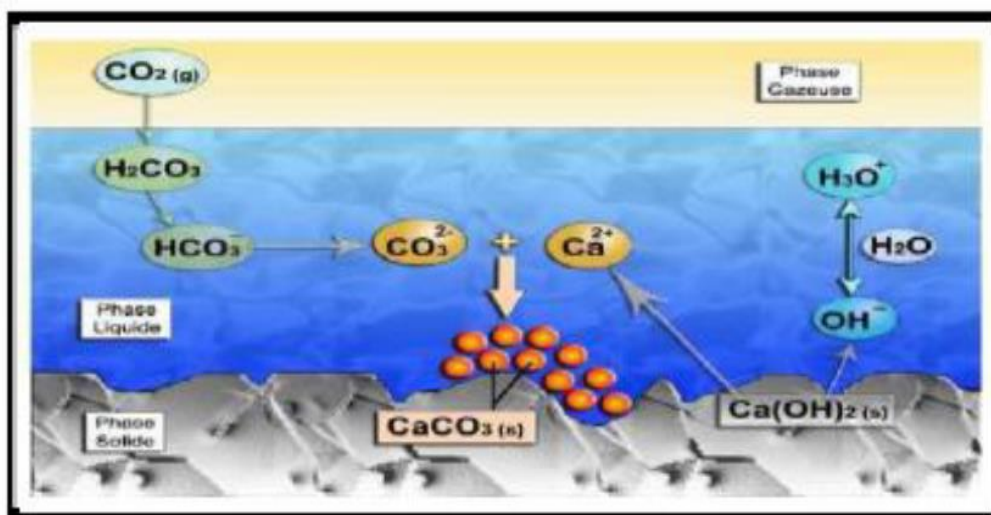
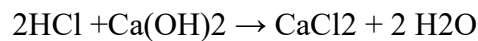


Figure I.8: Processus de Carbonatation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$

I.3.2.4 Actions des acides

Lorsque des acides (en tant que substances agressives) agissent sur le béton durci (comme substance réactive), cela entraîne une transformation des composés de calcium (tels que l'hydroxyde de calcium hydraté, le silicate et l'aluminate de calcium hydraté) en sels de calcium. Par exemple :

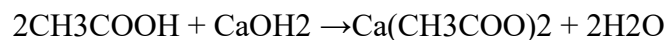
- L'action de l'acide chlorhydrique conduit à la formation de chlorure de calcium, qui est très soluble :



- L'acide sulfurique donne du sulfate de calcium, qui précipite sous forme de gypse.
- L'acide nitrique donne du nitrate de calcium, qui est également très soluble.

De même, avec des acides organiques, les résultats sont similaires :

- L'action de l'acide lactique conduit à la formation de lactates de calcium.
- L'acide acétique produit de l'acétate de calcium, et ainsi de suite :



Ces réactions entraînent la dégradation de la structure du ciment durci, selon le mécanisme présenté dans la Figure I.9

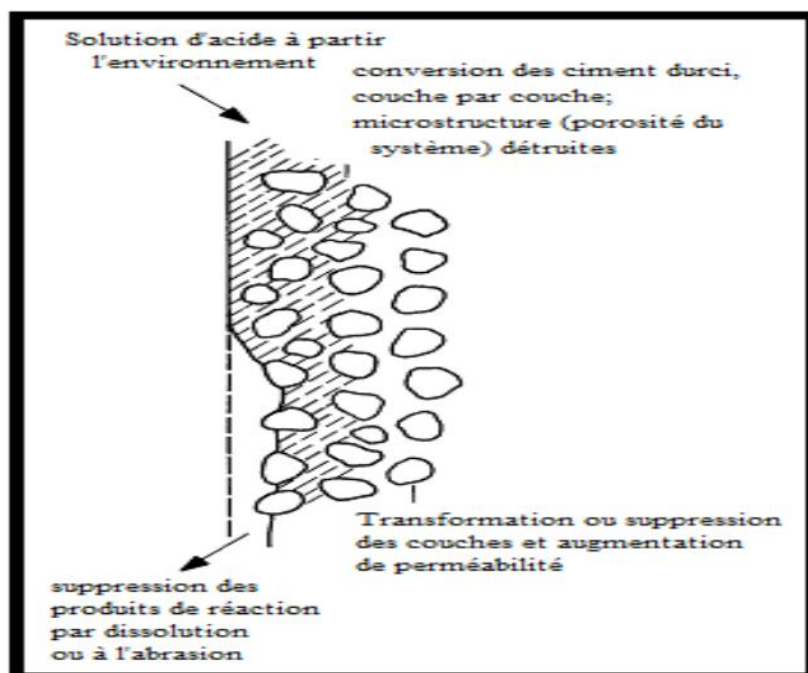


Figure I.9: processus de dégradation causé par l'action des acides

Le taux de réaction des différents acides avec du béton ne dépend pas de l'agressivité de l'acide, mais plutôt de la solubilité du sel de calcium qui se forme par la réaction. (Hamlaoui , 09/12/2012)

I.3.2.5 Attaque des chlorures

Les chlorures pénètrent dans le béton par diffusion, ce processus étant plus marqué lorsque le rapport E/C (rapport eau/ciment) augmente. Ils réagissent alors avec les aluminates de calcium pour former des chlore-aluminates, également appelés chlorures liés (**Figure I.10 a**). Ces derniers ne sont pas néfastes pour le béton. Cependant, une partie des ions chlorures reste sous forme ionique, c'est-à-dire des chlorures libres (**Figure I.10 b**), présents dans la solution interstitielle du béton. Lorsque leur concentration atteint une valeur suffisante au niveau des armatures, le film protecteur est altéré, dépassivant ainsi l'acier et initiant le processus de corrosion.

Les chlorures proviennent de deux sources : la première est interne au béton, résultant des adjuvants utilisés, qui doivent donc être employés de manière rationnelle. La seconde source est externe au béton et inclut l'eau de mer, les eaux souterraines, les eaux usées et les sels anti verglas.

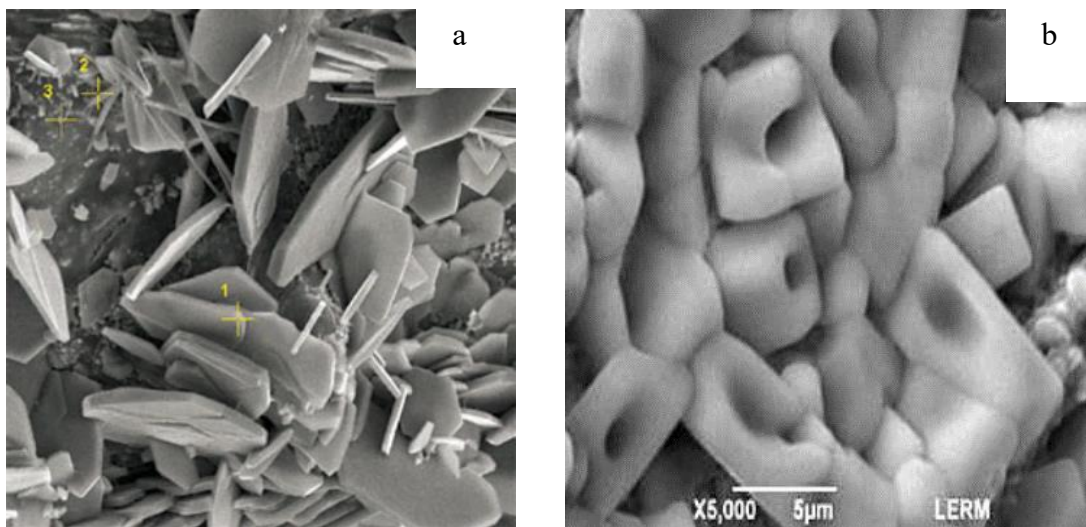


Figure I.10 Chlorures présents dans la microstructure du béton :(a) liés et (b) non liés (Na Cl):

L'interaction de l'eau de mer est complexe, mais moins préjudiciable que celle de certaines eaux fortement salines ou riches en sélénium, en raison de la carbonatation de la surface du béton qui limite la pénétration des sulfates. Cependant, le sulfate de magnésium,

présent dans cette eau en tant que sel acide, réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du sulfate de calcium et de l'hydroxyde de magnésium. Le premier conduit à la formation d'ettringite secondaire. Le chlorure de magnésium est également un sel acide qui, en réagissant avec l'hydroxyde de calcium, donne naissance au chlorure de calcium, lequel réagit ensuite avec les aluminates de calcium. En présence de sulfates, cela entraîne la formation d'ettringite expansive, provoquant ainsi des fissures dans le béton. (BOUTARAA , 2019)

I.3.2.6 Corrosion de l'acier

La corrosion de l'acier survient généralement sous l'effet d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, mais d'autres facteurs entrent également en jeu. Certains de ces facteurs sont inhérents au métal lui-même, se divisant en facteurs métallurgiques et en facteurs liés aux conditions d'utilisation. Les facteurs liés aux réactifs sont principalement influencés par leur nature, leur concentration, leur pH, la teneur en oxygène, la présence d'impuretés, etc

Corrosion Atmosphérique : Dans les structures métalliques laissées sans protection spécifique à l'air libre, l'acier développe une couche d'oxydes formant ce que l'on appelle couramment la rouille. Cette couche de rouille occupe un volume bien plus important que celui de l'acier d'origine

Corrosion des Armatures dans les Structures en Béton Armé : La corrosion des armatures passives dans une structure en béton armé engendre :

- Une fissuration du béton due au gonflement important de l'acier lorsqu'il rouille. La réduction de la résistance à la fatigue et de la ductilité des armatures. (Ouiza , 2017)



Figure I.11:Corrosion atmosphérique des structures Métalliques



Figure I.12:Corrosion des armatures au sein des constructions en béton armé

I.3.3 Les dégradations de la surface

I.3.3.1 L'érosion

Les structures situées le long des cours d'eau ou en bord de mer sont exposées à l'érosion causée par le transport de particules solides, soit en raison d'un courant puissant ou sous l'effet des vagues pour les ouvrages côtiers. (Ouiza , 2017)



Figure I.13:Fissures de forme polygonale et Zones soumises à l'érosion par abrasion

I.3.3.2 L'abrasion

Il s'agit de l'usure de la surface due aux frottements répétés et aux tempêtes dans les zones exposées, ce qui peut entraîner l'abrasion des matériaux. (Ouiza , 2017)



Figure I. 14:Abrasion visible sur des fondations du pont

I.3.3.3 Cavitation

C'est un processus qui se traduit par l'apparition de détériorations sous forme de piqures en surface, de trous ou de crevasses très profondes (**voir figure I.15**). Cette détérioration mécanique est déclenchée par l'écoulement d'un fluide sur la surface du béton. (BOUKSANI , 2013)



Figure I.15:Cavitation

I.3.3.4 Fissuration

La fissuration revêt une importance particulière dans cette situation. Elle représente assurément le désordre le plus aisément détectable et caractéristique. Dans le cas du béton

armé, il s'agit d'un phénomène normalement attendu. Cependant, il est impératif d'en surveiller l'évolution et de s'assurer qu'elle ne devienne pas dangereuse pour la stabilité de la structure. En réalité, le problème associé à la fissuration ne réside pas dans son existence, mais plutôt dans son développement. Le plus souvent, la fissuration est le résultat d'une contrainte anormale, qu'il s'agisse de traction, de cisaillement, etc., dépassant la limite de résistance du matériau (comme récapitulé en annexe 1). Les caractéristiques principales des fissures comprennent :

- Leur âge, souvent difficile à estimer dans la plupart des cas ;
- Leur tracé, qui révèle souvent leur origine ;
- Leur ouverture, qui peut être mesurée à l'aide d'instruments spécialisés ;
- Leur profondeur, permettant de distinguer les fissures qui traversent, celles qui sont en surface ou celles qui sont aveugles ;
- Leur activité et/ou leur évolution, qui permettent de faire la distinction entre les fissures inactives et celles qui sont toujours en cours de développement. (TANKEU, et al., 2011)

I.4 principes d'évaluation et diagnostic des ouvrages d'art

L'évaluation d'une structure existante implique l'appréciation de son état physique et mécanique. En d'autres termes, elle vise à caractériser qualitativement et/ou quantitativement son état global, ses composants et les matériaux qui la constituent. Cette évaluation devient nécessaire lorsque l'on envisage de modifier ses conditions d'exploitation ou de remédier à des anomalies révélatrices d'une détérioration précoce ou avancée. Elle sert donc de bilan de santé pour le responsable de la structure. En général, l'évaluation des ouvrages comprend deux phases successives : le diagnostic préliminaire et le recalcul.

Les deux principaux objectifs du recalcul sont les suivants :

1. Obtenir une estimation aussi précise que possible de l'état de contrainte probable de la structure, en tenant compte, le cas échéant, des anomalies constatées.
2. Évaluer les marges de sécurité par rapport au dépassement de certains états limites irréversibles ou de rupture.

En raison de la complexité de cette phase, qui nécessite de nombreuses calculs et qui ne peut être standardisée car elle dépend des caractéristiques de chaque structure, nous allons maintenant nous concentrer sur le diagnostic préliminaire des ponts.

I.4.1 Diagnostic préliminaire

Le diagnostic préliminaire conduit à l'élaboration d'un programme d'investigations nécessaires pour parvenir à un diagnostic précis et à une évaluation fiable de la sécurité structurelle. Il facilite également la création d'un projet de réparation ou de renforcement. Ces investigations permettent ensuite de passer à la deuxième phase, qui consiste en le recalcul proprement dit de la structure, élément essentiel de l'évaluation de sa fiabilité structurelle.

Les différentes investigations menées dans le cadre du diagnostic préliminaire peuvent inclure:

- Mise à jour des dimensions et des plans de la structure.
- Réalisation d'un certain nombre d'essais, effectués et interprétés par un laboratoire ou une entreprise spécialisée.
- Évaluation aussi précise que possible des propriétés des matériaux.

Cependant, elles consistent principalement en des opérations d'inspection et d'auscultation visant à détecter les risques d'affaiblissement des matériaux et de la structure avant que la stabilité de la structure ne soit compromise

I.4.1.1 L'inspection des ouvrages :

L'inspection des ouvrages permet de recenser les anomalies. On peut distinguer plusieurs types :

- **L'inspection détaillée périodique** : Elle est réalisée à intervalles réguliers et planifiés (généralement tous les 6 ans) par des spécialistes dans le but de vérifier l'état général de l'ouvrage et d'identifier toutes les petites anomalies présentes.
- **La surveillance renforcée** : Elle est mise en place lorsque la nature ou l'étendue des anomalies peut avoir des conséquences sur la stabilité de l'ouvrage. Un suivi attentif est alors décidé pour prévenir toute évolution anormale de ces anomalies et expliquer les causes de la détérioration accélérée de l'ouvrage.

- **La haute surveillance :** Elle est instaurée uniquement pour les ouvrages défectueux qui pourraient avoir des conséquences à court terme sur la sécurité physique des usagers ou de tiers. La procédure d'inspection d'un pont est relativement simple à mettre en œuvre

La procédure pour inspecter un ouvrage d'art est relativement simple d'application :

Tout débute par la visite de la structure : l'agent en charge de l'évaluation recueille tous les problèmes apparents à l'aide d'un formulaire de visite. Pour ce faire, il se réfère au répertoire des défauts et désordres, un pour chaque type de structure (pont en béton armé, pont précontraint, ponts métalliques, murs de soutènement, etc.). Ce document répertorie les désordres et défauts connus, les classant en fonction de leur impact sur la résistance structurelle de la construction. Dans la mesure du possible, il tente également d'informer l'observateur sur les causes des désordres constatés.

La mise en œuvre peut être divisée en plusieurs étapes :

1. Organiser le patrimoine en fonction des types d'ouvrages à évaluer.
2. Classer les ouvrages en fonction du matériau principal qui les constitue.
3. Évaluer les différentes parties constitutives de chaque ouvrage.
4. Établir une note globale d'évaluation de l'état de chaque ouvrage pour le classer définitivement.

Diverses méthodes de gestion, y compris l'inspection, des ouvrages ont été élaborées dans plusieurs pays, notamment en France par le MEEDDAT avec le soutien du SETRA. Elles ont pour objectif de connaître, gérer et pérenniser le patrimoine. L'annexe 31 présente les méthodes les plus couramment utilisées

I.4.1.2 L'auscultation des ouvrages

L'auscultation désigne l'ensemble des examens et des mesures spécifiques qui font généralement usage de techniques avancées dans le but d'acquérir une compréhension approfondie d'une structure donnée. Elle complète l'inspection visuelle détaillée des ouvrages en permettant d'évaluer la qualité des matériaux en place et de caractériser le fonctionnement actuel de la structure.

Les techniques d'auscultation varient en fonction de la nature des désordres constatés, mais le choix des méthodes est influencé par les hypothèses que l'on peut émettre quant aux causes probables des problèmes observés. L'évaluation des matériaux repose à la fois sur des études et des analyses de prélèvements, ainsi que sur des méthodes d'analyse physique sur site. Les moyens pour caractériser le fonctionnement de la structure sont également très diversifiés.

a) Etudes et analyses de prélèvements :

Afin de minimiser le risque d'endommager davantage l'ouvrage, on prélève des échantillons dans des zones moins critiques, en quantité et en taille limitées. Ces échantillons sont ensuite soumis à des analyses en laboratoire, qui incluent des mesures des propriétés mécaniques des matériaux ainsi que des caractéristiques physiques telles que la densité, la porosité et la teneur en eau. Les résultats obtenus doivent être ajustés pour prendre en compte l'effet de l'échelle lié à la taille des échantillons, mais ils servent principalement de point de référence. En réalité, ils ne reflètent pas nécessairement l'état de l'ouvrage et doivent être complétés par des examens effectués sur les matériaux en place

b) Examen du matériau en place :

L'examen en place de l'acier d'un pont est une pratique assez rare. En revanche, pour le béton, il existe plusieurs méthodes disponibles, notamment la méthode sonique, la radiographie ou la gammagraphie, la radioscopie et l'utilisation d'un scléromètre.

Le scléromètre, qui est la méthode la plus simple de toutes, permet d'évaluer la dureté superficielle d'une surface en béton. Cet instrument se compose d'une masselotte guidée dans un tube, que l'on projette à l'aide d'un ressort préalablement réglé sur une enclume en contact avec le béton. La mesure du rebondissement de la masselotte permet d'estimer la résistance en compression du béton examiné

c) L'étude des fissures :

Comme indiqué précédemment, une enquête détaillée sur les fissures, ainsi que le suivi de leur évolution au fil du temps, représentent un élément de diagnostic extrêmement crucial. En effet, les fissures dans le béton sont une expression visible du comportement de la structure et reflètent assez clairement ce comportement, à condition d'être correctement interprétées. En général, deux dispositifs sont utilisés à cette fin :

▪ **Le fissuromètre :**

Ce dispositif permet de mesurer l'ouverture d'une fissure à un instant précis. Il prend généralement la forme d'une règle transparente et permet de mesurer l'ouverture avec une précision allant jusqu'au dixième de millimètre

▪ **L'extensomètre LVDT :**

Il est fréquemment intéressant de surveiller l'évolution d'une fissure sur une période de temps plus ou moins longue. L'extensomètre LVDT (Linear Variable Differential Transformer) est un capteur électrique/électronique que l'on installe de part et d'autre de la fissure. Il fournit une indication quantitative de l'ouverture ou de la fermeture de la fissure. Ce type de capteur peut également être utilisé dans des zones non fissurées pour mesurer la déformation du matériau.

d) Etude du fonctionnement de la structure

Le suivi d'un ouvrage implique la vérification périodique de ses éventuelles déformations sous des charges permanentes. Si possible, on compare ces déformations à un état de référence établi juste avant la mise en service de l'ouvrage. Pour ce faire, on peut utiliser une méthode de nivellement topographique. Il existe également d'autres dispositifs pour inspecter les ouvrages, et nous les présentons brièvement comme suit :

Tableau 1:Résumé des Principaux instruments de mesure employés sur les ouvrages d'art

Désordres	Instruments	Caractéristiques
Fissures	Fissuromètre	- Mesure manuelle - Permet de repérer toutes les fissures
	Extensomètre	Mesure automatisée et locale
Déplacements/ Déformations	Tachéomètre	Nécessité de 3 références fixes et indépendantes de l'ouvrage
	Fil INVAR	- Mesure de flèche - Résultats très précis
	Accéléromètre	- Intéressant si associé à une autre instrumentation (fissuration) - Permet de mesurer l'oscillation du tablier

	Inclinomètre	Mesure des angles
	Jauges d'extensométrie	Permet de remonter aux contraintes dans le matériau

À la conclusion de l'évaluation, une analyse préliminaire technico-économique des diverses solutions possibles est effectuée. Cela permet au responsable de la gestion des ouvrages de prendre une décision, que ce soit en faveur d'un remplacement total ou partiel, d'une réparation, d'un renforcement, voire du maintien en l'état de l'ouvrage avec la mise en place de mesures spécifiques d'exploitation et de surveillance. (TANKEU, et al., 2011)

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, il a été démontré que tous les processus de dégradation des matériaux et la perte de performance ou de comportement sont causés par de multiples facteurs sur lesquels nous n'avons pas un contrôle total. Par conséquent, l'idée d'une structure parfaitement durable est irréalisable. Cette vulnérabilité des structures nous contraint à envisager des réparations ou des renforcements tout au long de la durée de vie de l'ouvrage.

Dans cette optique, il est essentiel d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation, de maîtriser les méthodes de détection des causes et des pathologies, ainsi que de distinguer ces différentes pathologies les unes des autres afin d'établir un diagnostic aussi précis que possible.

CHAPITRE II

Techniques de réparation et réhabilitation des ouvrages d'art

II.1. Introduction

La réparation, la rénovation ou l'amélioration d'un ouvrage d'art implique l'utilisation d'une combinaison de diverses méthodes afin de remédier aux problèmes constatés et de restaurer les performances d'origine de la structure. Le choix des techniques de réparation dépend de plusieurs facteurs, tels que l'ampleur des problèmes identifiés, le matériau utilisé pour la construction de l'ouvrage (acier, béton armé, béton précontraint, maçonnerie), ainsi que des considérations budgétaires et de calendrier. (ZIGHEM, 2021)

II.2. Définitions des techniques d'intervention

II.2.1. Réhabilitation

La réhabilitation consiste à mettre un bâtiment aux normes de confort contemporaines (MAIZI, et al., 2013). Elle englobe toutes les actions visant à restaurer et à améliorer un édifice en l'adaptant à une utilisation moderne et confortable. (Jean , 1997). L'objectif principal est d'éliminer les défauts de construction ou les dysfonctionnements accumulés au fil du temps, de moderniser les installations, les équipements et l'agencement des espaces, améliorant ainsi son efficacité et le préparant à une utilisation actuelle. (Bertrand, 2010).

Contrairement à la construction neuve, la réhabilitation nécessite de composer avec l'existant et parfois de revoir le projet, d'où l'importance de développer une relation de confiance avec le concepteur. Il n'est pas toujours possible d'inspecter la structure du bâtiment avant le début des travaux. Prévoyez des coûts supplémentaires éventuels. (MAIZI, et al., 2013)



Figure II. 1:Réhabilitation des immeubles d'Alger

II.2.2. Restauration

Cette opération englobe toutes les actions nécessaires pour préserver un bâtiment et restaurer son apparence, dans sa conception d'origine, en respectant au mieux les techniques et les matériaux de construction de l'époque. Cette démarche est réservée aux bâtiments ayant une valeur historique incontestable qui nécessitent une restauration à l'identique. Redonner au bâtiment son caractère d'origine est un excellent moyen de prévenir tout type de dommage :

en utilisant les matériaux d'origine et en appliquant les techniques de l'époque. La restauration exige un haut niveau d'expertise et de compétence spécialisée.



Figure II.2: Restauration de la citadelle d'Alger (palais du dey) a la casbah d'Alger

II.2.3. Réparation

La réparation d'un ouvrage implique de lui rendre son niveau de performance perdu par le biais de travaux appropriés. Cette perte de performance peut résulter de diverses causes, les plus courantes étant la détérioration progressive des matériaux (due à l'exposition aux intempéries ou à des altérations des propriétés des matériaux), une utilisation intensive (due à des charges répétées) voire abusive (au-delà des limites de conception), ainsi que des incidents et des sinistres tels que les incendies, les chocs ou les séismes (Ouzza, 2015).

La réparation d'un ouvrage en béton armé implique des interventions plus substantielles au niveau de la structure ou du matériau constitue (HAMOUCHI, 2013). Pour réparer le béton, il est essentiel de comprendre le support à réparer, les matériaux de réparation, l'environnement dans lequel ils seront utilisés, ainsi que les mécanismes d'adhésion. La compatibilité joue un rôle crucial dans la durabilité de la réparation (Habbache, 2021).

Il existe principalement deux méthodes de réparation du béton armé : la méthode traditionnelle de ragréage et la technique du béton projeté. Cependant, une troisième méthode plus récente commence à gagner en popularité, à savoir l'utilisation de tissus de fibres de carbone (TFC) (HAMOUCHE, 2013).



Figure II.3:Réparation de béton

II.2.4. Renforcement

Le terme "renforcement" désigne l'amélioration de la capacité de résistance sismique d'une structure au-delà de la simple réparation. Cela implique non seulement la réparation des éléments endommagés localement, mais également une réhabilitation globale visant à améliorer le comportement structurel global du bâtiment. L'impact d'un tel renforcement se traduit par une augmentation de la résistance sismique R de la structure. (Habbache, 2021)

II.3. Principales catégories de dégradations

Dans un ouvrage en béton, les altérations peuvent être initialement détectées par une observation visuelle. Selon les informations disponibles dans la littérature, on peut classifier ces altérations en six catégories principales, comme indiqué dans le tableau II.1. Chacune de ces catégories d'altérations peut être associée à divers facteurs.

Tableau II.2:Classification des altérations du béton (BOUKSANI , 2013)

Catégorie de dégradation	Désordres constatés	
Fissuration	Fissure continue	Faïençage, Craquelage Fissuration en série à proximité d'un joint
	Fissure individuelle (Isolée)	Longitudinale, Transversale, Verticale, Horizontale, Fissure capillaire, Optique, Irrégulière.
Désintégration	Ecaillage, Cloquage, Pelade, Déaminations, Décollement, Vieillissement Farinage, poudrage	
Eclatement Ou Perte de masse	Eclat, Craquage Epaufre Cratère	
Erosion	Abrasion Cavitation	
Infiltration Et Dépôts	Infiltration	Infiltration dans les joints ou joints d'étanchéité. Infiltration dans les fissures. Infiltration à travers la masse de béton.
	Dépôts	Décoloration Exsudation Efflorescence Incrustation, Corrosion
Distorsion	Flambement, Roulages /Voilement Formation de failles Tassement, Inclinaison	
Défaut de Construction	Joint Froid Nids d'abeilles Bullage, Surface irrégulière	

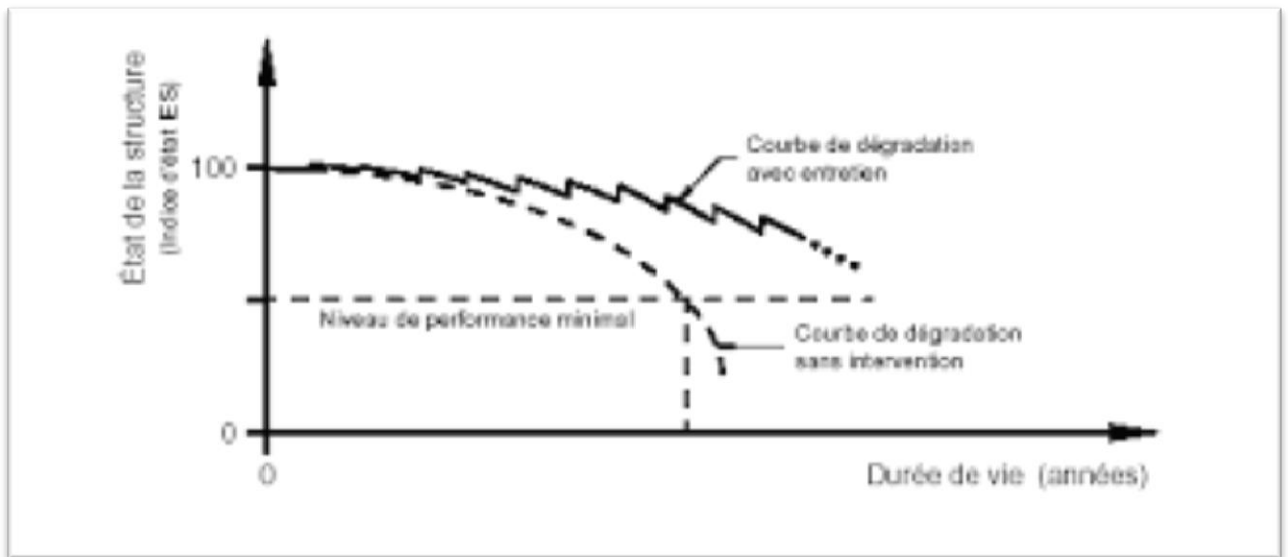


Figure II.4: Courbes de dégradation d'une structure

II.4 Différents types d'entretien

Ils existent deux types d'entretien :

II.4.1 Entretien courant

Travaux ne nécessitant aucune qualification particulière du personnel ni d'équipement spécifique. Ils peuvent être effectués par le personnel de la subdivision à l'aide de leur équipement habituel. Ces travaux consistent généralement en : Le nettoyage des sommiers d'appuis, le nettoyage des appareils d'appuis (y compris la lubrification des appareils d'appuis métalliques) de la chaussée, des joints de chaussée, des avaloirs, des gargouilles, du déboisement et de l'élimination de la végétation, etc. (Christophe, et al., 2018)

II.4.2 Entretien spécialisé

Il s'agit d'un ensemble d'activités d'entretien qui nécessitent les éléments suivants :

L'utilisation de moyens d'accès spécifiques tels que des échafaudages, des nacelles, ainsi que des engins et des équipements de levage tels que des pelles et des vérins hydrauliques, en plus de la nécessité de recourir à une main-d'œuvre spécialisée.

L'utilisation de produits de réparation spécifiques, tels que des mortiers préparés, des résines, divers produits de réparation et des peintures de protection, entre autres.

L'utilisation d'équipements appropriés pour la mise en œuvre, tels que des machines pour l'injection de coulis et de mortiers, des machines pour le béton projeté, des compacteurs, etc. (Christophe, et al., 2018).

II.5 Méthodes et matériaux de réparation

II.5.1 Critères de choix des méthodes de réparation

Tous les facteurs qui influencent le choix et favorisent une méthode et un matériau par rapport aux autres peuvent être distingués comme suit :

- a) Le coût des réparations ainsi que tous les frais supplémentaires liés à l'entretien et aux réparations ;
- b) Le type de dégradations : si les dommages sont relativement peu nombreux et isolés, il est recommandé d'opter pour des réparations partielles. Si les dommages sont étendus, il faut envisager de reprendre l'ouvrage dans son ensemble ;
- c) La sécurité structurelle, avant, pendant et après la réparation ;
- d) La disponibilité des matériaux de réparation et les compétences des entrepreneurs dans l'utilisation de matériaux spéciaux ou de procédures exceptionnelles avec succès ;
- e) Les conditions d'exploitation de l'ouvrage, afin de s'assurer que les réparations, pendant leur exécution, ne perturberont pas sérieusement l'utilisation de l'ouvrage ;
- f) L'importance de l'ouvrage, la durée de vie souhaitée pour les réparations, les conditions d'exploitation de l'ouvrage ;
- g) Les contraintes du chantier, telles que les difficultés d'accès, l'absence des surfaces nécessaires pour l'application des méthodes de réparation, les conditions climatiques défavorables ;
- h) Les modifications apportées par les réparations sur l'aspect esthétique ou sur le comportement des éléments (comme l'augmentation de la section d'un élément, ce qui implique une augmentation de la rigidité et modifie la distribution des efforts et des moments)
- i) La combinaison la plus économique des méthodes et des matériaux jugés techniquement réalisables.

II.5.2 Les matériaux de réparation

II.5.2.1 Bétons Conventionnels (selma, 2004)

Les réparations en béton conventionnelles sont généralement privilégiées dans les cas où la zone à réparer dépasse 1000 cm² en surface et où la profondeur de réparation dépasse 150 mm, ou lorsque cette profondeur dépasse de 25 mm le niveau inférieur des barres d'armature. Cette méthode de réparation présente l'avantage d'être économique.

- ❖ Il est recommandé de préalablement saturer la surface du vieux béton pendant plusieurs heures avant d'appliquer le nouveau béton.
- ❖ Un bon processus de maturation est essentiel pour garantir une durabilité optimale et pour réduire au minimum les risques de fissuration liée au retrait lors du séchage.
- ❖ le périmètre de la zone à réparer sur une profondeur d'au moins 25 mm.
- ❖ Les bétons conventionnels peuvent être utilisés avec diverses techniques de mise en place, telles que l'utilisation de coffrages classiques, la projection par voie humide, la projection par voie sèche ou le pompage.
- ❖ Il est crucial de choisir un béton de réparation dont les propriétés physicochimiques, telles que le module élastique et le coefficient de dilatation thermique, sont similaires à celles du béton existant afin d'assurer une réparation durable.

II.5.2.2 Les latex

Le terme "latex", à l'origine utilisé pour décrire le liquide sécrété par certains végétaux, fait maintenant référence à une large gamme d'émulsions de polymères synthétiques dissous dans l'eau. Les latex, qui sont constitués de monomères plutôt que de polymères, se distinguent ainsi des autres résines. Ces dernières sont incorporées dans le béton à l'état frais et subissent une polymérisation à l'intérieur de la matrice. Cette distinction fondamentale explique la simplicité de mise en œuvre du mortier ou du béton de latex : il suffit d'ajouter le latex au mélange lorsqu'il est encore frais. (GADRI)

II.5.2.3 Les mortiers latex

Les mortiers à base de latex contiennent généralement entre 10 et 20% de latex par rapport à la masse de ciment. Le latex confère au mortier une adhérence importante même sur des surfaces lisses. Il améliore la plasticité, permettant ainsi de réduire la quantité d'eau nécessaire lors du mélange, tout en renforçant l'imperméabilité, réduisant le module d'élasticité et

augmentant la résistance à la traction. En conséquence, les mortiers à base de latex s'avèrent être d'excellents matériaux pour la réparation de structures. (GADRI)

II.5.2.4 La résine époxy

Ce sont des substances organiques qui, grâce à des durcissements appropriés, forment des produits à la fois résistants sur le plan mécanique et chimique, et qui présentent d'excellentes propriétés d'adhérence. Ils peuvent être utilisés pour fixer du béton sur des surfaces ou pour réparer des parties fissurées ou détachées d'une section de béton en service. Une fois durcis, ces composés conservent leur rigidité, ne s'écoulent pas et ne suintent pas, du moins dans des conditions d'utilisation normale. (Hamlaoui , 09/12/2012)

II.5.2.5 Les matériaux composites

En termes généraux, un matériau composite peut être défini comme un assemblage de deux ou plusieurs matériaux, résultant en un matériau final ayant des propriétés supérieures à celles de chacun des matériaux constitutifs . Plus couramment, on désigne aujourd'hui sous le terme "matériaux composites" des agencements de fibres, appelés renforts, qui sont incorporés dans une matrice présentant une résistance mécanique bien plus faible. Cette matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres tout en permettant de transmettre les contraintes auxquelles les pièces sont soumises. (Hamlaoui , 09/12/2012)

II.5.2.6 Les charges

On regroupe sous l'appellation générale de "charge" toute substance inerte, qu'elle soit d'origine minérale ou végétale, qui, lorsqu'elle est ajoutée à un polymère de base, permet de significativement altérer les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques de ce dernier, d'améliorer son apparence extérieure, ou simplement de réduire le coût de production du matériau transformé.

En règle générale, les substances pouvant être utilisées comme charges pour les matières plastiques doivent tout d'abord répondre à plusieurs critères essentiels :

- Elles doivent être compatibles avec la résine de base ;
- Elles doivent avoir la capacité d'être bien réparties dans la résine ;
- Leur qualité et leur granulométrie doivent être uniformes ;
- Elles ne doivent pas provoquer une usure excessive ;

- Leur coût doit être relativement bas.

II.5.2.7 Les matériaux de renfort

L'armature, qui constitue le squelette de la structure et assure sa résistance à la traction et sa rigidité, est composée de renforts de nature filamenteuse, tels que des fibres minérales ou organiques, allant de particules allongées à des fibres continues. En conséquence, la fibre de renfort est toujours responsable de la résistance mécanique de la structure composite, tandis que la matrice confère sa forme et sa résistance chimique. La quantité de fibre de renfort peut varier de 20 à 80% en termes de masse.

II.5.2.8 La matrice

La matrice joue un rôle essentiel en reliant les fibres de renfort et en répartissant les contraintes auxquelles elles sont soumises. Actuellement, on privilégie principalement l'utilisation de résines thermodurcissables (TD) en combinaison avec des fibres longues. Cependant, l'utilisation de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes connaît une croissance significative..

II.5.3 Les méthodes de réparation

II.5.3.1 Remplacement Du Béton Altéré

Afin d'assurer une bonne adhérence entre le nouveau matériau et l'ancien, un agent de collage doit être appliqué après avoir terminé la préparation et le nettoyage de la surface à réparer, juste avant la mise en place du nouveau matériau. Les mortiers à base de ciment Portland et les coulis sont souvent utilisés. Des produits à base de latex ou de résines époxy sont utilisés lorsque la situation nécessite un temps de durcissement rapide.

II.5.3.2 Adjonction d'armature complémentaire

Il est important de prévoir des renforts supplémentaires lorsque l'on doit remplacer des barres d'acier corrodées ou accidentellement coupées. Cette approche peut également être envisagée pour renforcer une structure existante. Dans tous les cas, il est essentiel de prendre soin des armatures existantes qui seront conservées afin d'éviter leur détérioration continue. Il peut être nécessaire de soutenir et de décharger la structure à réparer. Les renforts supplémentaires doivent être conçus pour résister à la fissuration et contribuer à la solidité des sections renforcées. Par conséquent, il convient de prêter une attention particulière à la disposition et à l'ancrage de ces renforts.

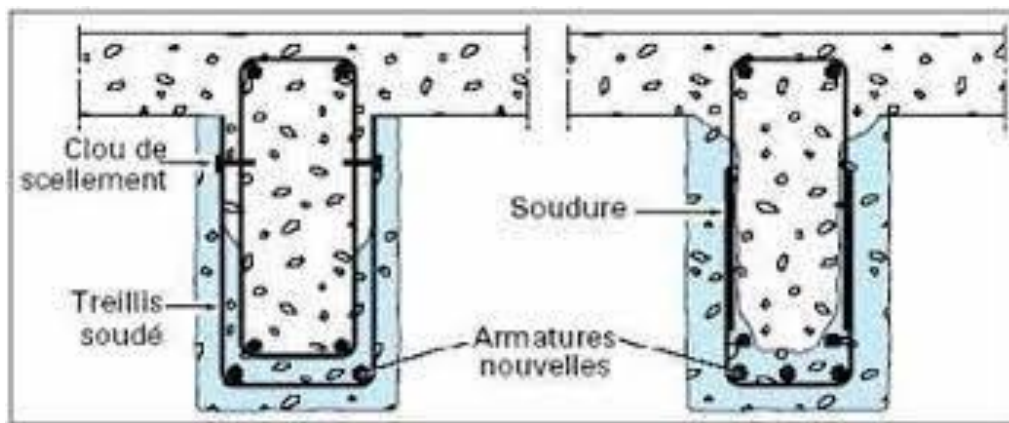


Figure II.5: Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre []

II.5.3.3 Renforcements et réparation par Matériaux composite

L'utilisation de matériaux composites sur une structure endommagée exige tout d'abord la préparation de la surface à réparer. Cette préparation implique de la rendre plane et propre. En général, cela implique l'injection de fissures et le sablage de la surface pour un traitement approprié.

- **Mise en œuvre par enroulement filamentaire :**

La fibre est fabriquée sous forme de fibres continues extrêmement longues, qui sont ensuite enroulées de manière régulière autour d'un mandrin. La longueur des fibres continues peut varier de 600 mètres à 5 kilomètres, ce qui équivaut à 0,8 gramme par mètre linéaire. Pour renforcer une structure directement à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir l'enrouler autour de celle-ci. Par conséquent, cette méthode de renforcement est principalement applicable aux colonnes ou aux pylônes. Le principal avantage de cette approche réside dans son automatisation complète du système de pose. Cependant, son inconvénient majeur réside dans le fait qu'une intervention manuelle est requise pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes, ce qui implique un investissement de temps et d'efforts considérables pour l'installation du matériel. Cette méthode a été principalement développée au Japon et est désormais utilisée à travers le monde.

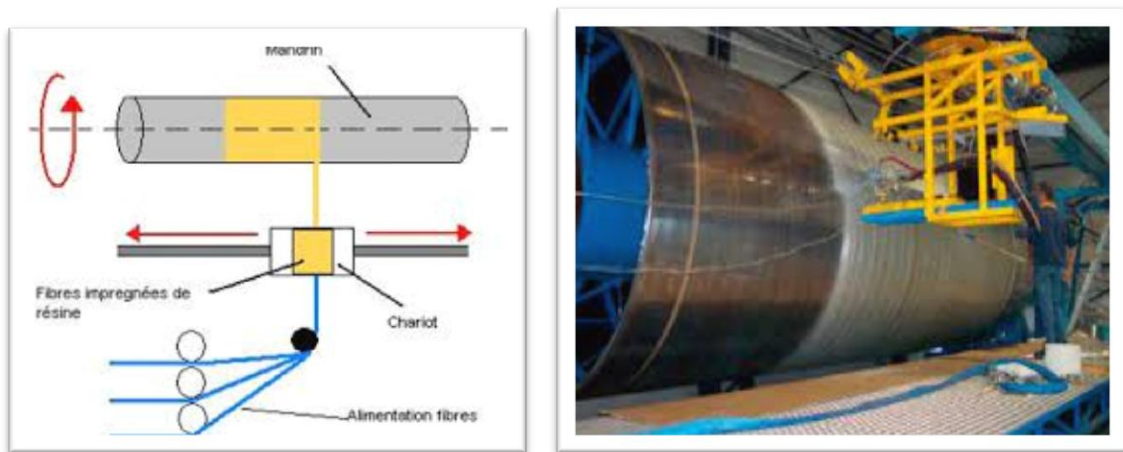


Figure II.6:les principes de l'enroulement

- **Mise en œuvre par stratification directe de tissus sec :**

Le renforcement des structures à partir d'un tissu sec se déroule en appliquant directement ce dernier sur une couche de résine qui couvre l'élément à renforcer, faisant ainsi office de liant. Après les retouches nécessaires, une couche de résine de finition est utilisée pour assurer une imprégnation optimale. Les pressions requises pour cette méthode de renforcement sont relativement faibles par rapport à d'autres techniques similaires. L'avantage principal du renforcement par tissus secs réside dans sa grande facilité de manipulation sur le chantier, sans nécessiter le déplacement de matériel lourd. Cette technique permet en particulier de suivre de manière précise la forme du support et de contrôler l'épaisseur du film de résine. En utilisant des polymères qui durcissent à température ambiante, il est possible d'effectuer une stratification directe selon les étapes suivantes :

- Préparation de la surface et application de la couche primaire.
- Application d'une première couche de polymère époxyde.
- Application d'une première couche de tissus secs.
- Application d'une seconde couche de polymère époxyde.
- Protection et finition.



Figure II.7:Mise en œuvre par Stratification directe

Cette méthode permet d'obtenir une réparation solide et durable en adaptant la forme et l'épaisseur de la stratification aux besoins spécifiques de la structure à renforcer.

- **Le collage de plaques composites :**

Les plaques composites sont des produits finis qui se présentent sous forme de bandes ou de joncs. Leur rigidité varie en fonction de leur épaisseur et de leur diamètre. La section transversale des bandes les plus courantes mesure 100 x 1 mm, mais leur longueur peut varier de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres en fonction des besoins.

La technique de fabrication de ces plaques composites, tout comme celle des platelages collés métalliques, présente des difficultés pour maîtriser l'épaisseur de la colle utilisée. Cela est dû à la rigidité des aciers et des composites. De plus, l'application de ces renforcements sur des surfaces avec des défauts de planéité ou des surfaces courbes reste limitée.

- **Processus de collage :** Le processus de collage des plaques composites comme suit les étapes suivantes :

- **Nettoyage à l'acétone de la face de collage de la plaque :** Avant d'appliquer la colle, la surface de la plaque composite est nettoyée à l'aide d'acétone pour enlever toute saleté ou impureté.

- **Traitement de surface à réparer par sablage :** Si la surface nécessite des réparations, elle est traitée par sablage pour la préparer au collage.

- **Traitement par eau sous pression et meulage** : Après le sablage, la surface est soumise à un traitement par eau sous pression et est meulée pour améliorer son adhérence.
- **Nettoyage de la surface par un dépoussiérage** : Avant d'appliquer la colle, la surface est soigneusement nettoyée pour éliminer toute poussière ou particule.
- **Application de la colle en polymère époxy** : La colle en polymère époxy est appliquée sur la plaque composite.
- **Pressage de la plaque sur la surface** : La plaque composite est ensuite pressée sur la surface à coller.
- **Retrait de l'excédent de colle** : Tout excédent de colle est retiré pour obtenir une surface uniforme.
- **Application d'une pression à l'aide d'un sac à vide** : Une pression est appliquée à l'aide d'un sac à vide jusqu'à ce que la polymérisation du polymère soit complète.

Ce processus permet de coller efficacement les plaques composites sur les surfaces désirées en utilisant de la colle en polymère époxy. Une fois la polymérisation terminée, la liaison est solide et durable. (Hamlaoui , 09/12/2012)



Figure II.8:Procède par collage De plaque (sika, 1996)

II.5.3.4 Le Renforcement Au Moyen Des Profiles Métalliques (Hicham, 2009):

L'association de profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. Il est essentiel de garantir la compatibilité entre ces deux

matériaux pour créer une structure mixte acier-béton, comme illustré dans la Figure II.9. Cette compatibilité dépend étroitement de la qualité de l'interface entre l'acier et le béton, qui assure une transmission efficace des forces internes. L'avantage de cette méthode réside dans sa rapidité de mise en œuvre sur site : les éléments métalliques sont préfabriqués en atelier, puis assemblés à l'aide de chevilles ou de tiges ancrées. Le découpage des éléments en tronçons simplifie leur transport et leur installation sur le chantier.



Figure II.9:Renforcement de poteaux Au moyen de profils Métallique (Hicham, 2009)

II.5.3.5 Béton Projeté

Il y a deux principales méthodes de projection du béton, et leur distinction principale réside dans l'ordre chronologique des opérations de base :

- **Procédé par voie humide :**

Le procédé en voie humide implique le pompage d'un béton ou d'un mortier à travers un tuyau et sa projection à grande vitesse sur une surface en utilisant de l'air comprimé à la lance. Il est principalement utilisé lorsque des quantités importantes de matériaux doivent être produites. Cette méthode offre une meilleure facilité de contrôle qualité, car elle utilise un béton conventionnel dont les proportions des différents composants du mélange sont bien connues.

L'utilisation de ce procédé permet d'effectuer rapidement des applications sur de vastes surfaces, telles que des revêtements de sol, des murs ou des dalles. Elle est fréquemment employée dans des projets de construction commerciale ou industrielle nécessitant d'importantes quantités de béton ou de mortier. La projection à grande vitesse favorise également une meilleure adhérence et une finition plus uniforme sur la surface réceptrice.

Cependant, il est essentiel de noter que ce procédé exige une préparation adéquate du béton ou du mortier, ainsi qu'une expertise dans son application pour garantir des résultats de qualité. Un dosage approprié des composants, une maîtrise de la vitesse et de la pression de projection, ainsi qu'une technique adéquate sont indispensables pour assurer une application réussie.

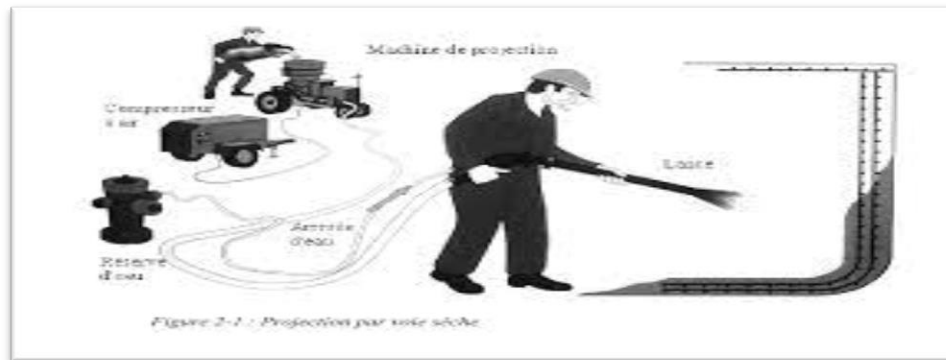


Figure II.10:Projection par voie humide

- **Procédé par voie sèche :**

Le procédé de projection à sec est le plus couramment utilisé pour les réparations. Il implique l'incorporation directe de matériaux secs tels que le ciment et les granulats dans une conduite, où ils sont transportés par de l'air comprimé jusqu'à la buse. L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la buse grâce à une bague perforée, permettant ainsi le mélange de l'eau avec les matériaux, comme illustré dans la **Figure III.9**.

Le mélange de l'eau et des matériaux secs se produit dans la buse ainsi qu'au contact de la surface à réparer. La figure ci-dessous présente l'équipement nécessaire pour l'application du béton projeté par voie sèche. L'avantage du procédé par voie sèche est qu'il peut être arrêté et repris à tout moment pendant les travaux. Cependant, l'inconvénient du procédé sec réside dans le fait que le dosage de l'eau dans le mélange est effectué directement à la buse par le lanceur, ce qui complique le contrôle de la qualité.

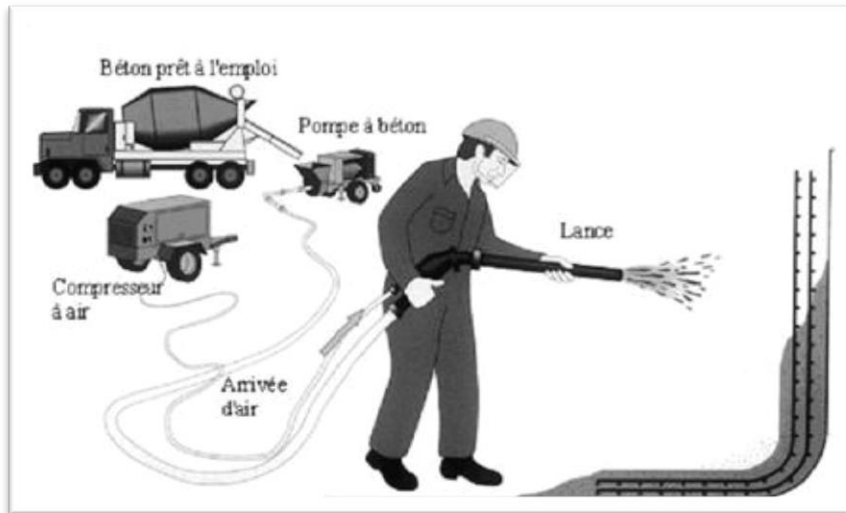


Figure II.11:Projection par voie sèche

II.5.3. 6 La précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle est souvent préférable lorsque l'on a besoin de renforcer une partie significative d'un élément structural ou de refermer des fissures qui se sont formées. Cette méthode implique l'utilisation de câbles ou de barres de précontrainte pour appliquer des contraintes de compression, avec un ancrage adéquat fourni par des éléments situés à l'extérieur de l'élément. La procédure varie en fonction du tracé de précontrainte utilisé, qui peut être soit rectiligne, soit polygonal.

❖ Tracés rectiligne: (A, 2006)

En ce qui concerne le tracé rectiligne, l'utilisation de câbles rectilignes est plus pratique et plus facile à mettre en œuvre. Les pertes d'effort dues au frottement sont localisées près des zones d'ancrage et restent de faible importance, comme illustré dans la Figure II.12

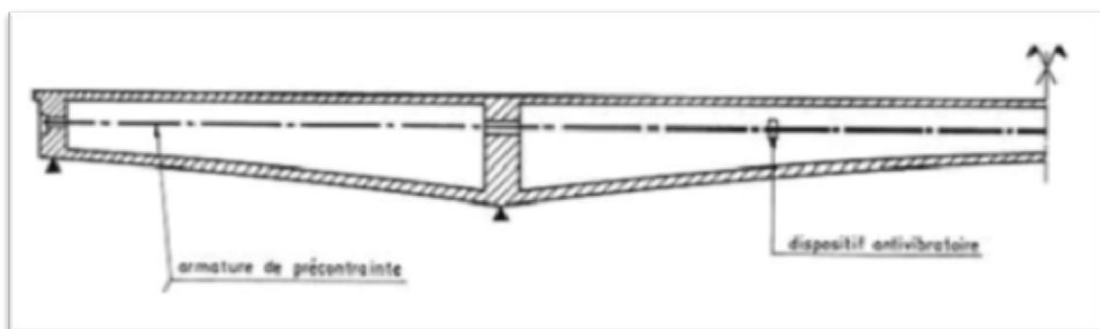


Figure II.12:Tracés rectiligne

❖ Traces Polygonal : (calgaro, et al., 1997)

Cependant, le tracé polygonal implique le déplacement des câbles de manière à maximiser l'effet de précontrainte à la fois en termes de résistance à la flexion et de résistance à la force tranchante. Les pertes par frottement sont légèrement plus élevées par rapport à un tracé rectiligne, bien que restant modérées, et sa mise en œuvre est plus complexe en raison de la fabrication des dispositifs de déviation. Néanmoins, il s'agit de la conception la plus courante en raison de son efficacité, comme illustré dans la Figure II.13.

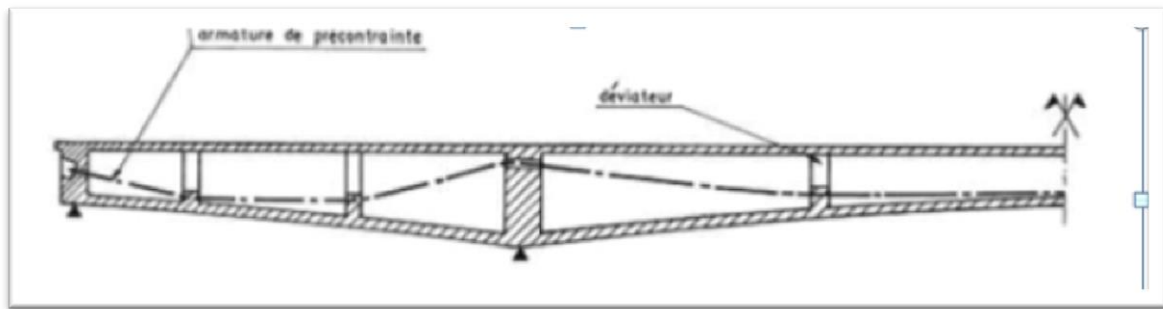


Figure II.13:Traces polygonal

II.5.4 Les traitements des ouvrages

II.5.4.1 Ré-alcalinisation Du Béton Carbonate (Hikmat , 2008)

Le schéma présenté dans la Figure II.14 illustre le principe de protection électrochimique lors de la ré alcalinisation. Cette méthode repose sur le même concept que l'extraction des ions chlore, impliquant l'application d'un courant électrique continu entre une anode temporaire positionnée sur la surface du béton et l'acier. La ré alcalinisation est mise en œuvre spécifiquement lorsque la corrosion est provoquée par la carbonatation du béton d'enrobage. L'objectif de cette approche est de rétablir le pH du béton carbonaté à un niveau permettant la repassivation des armatures en acier.

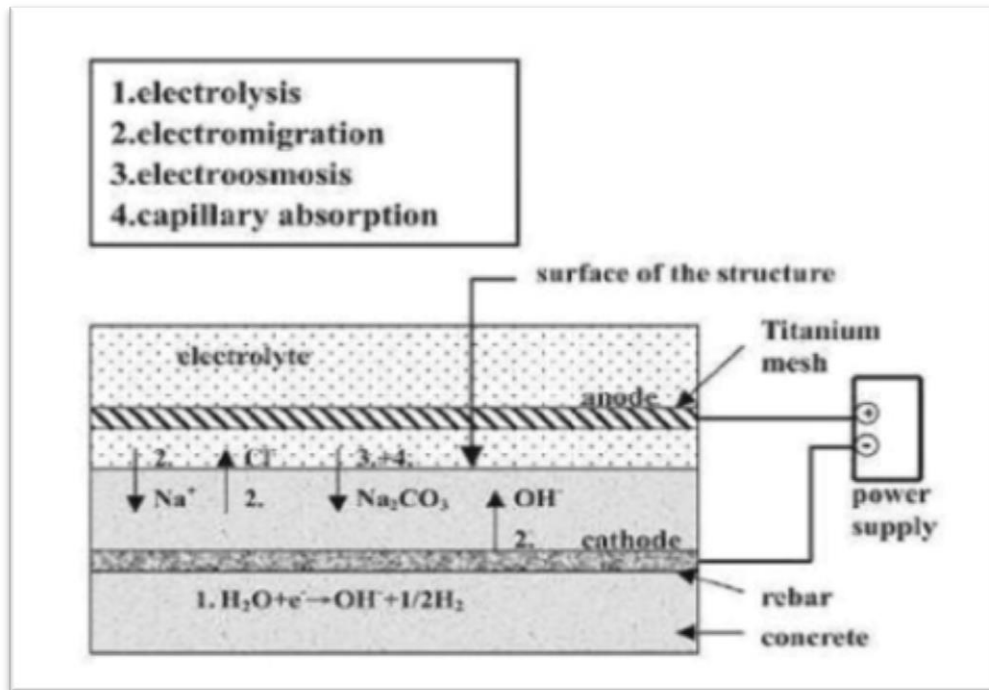


Figure II. 14:illustration du processus électrochimique de relatinisation.

II.5.4.2 Extraction Electrochimique Des Ions Chlores :

En 1973, la toute première utilisation de l'extraction électrochimique des ions de chlore a été entreprise. Le Département des Transports du Kansas (KDOT) a accompli cette extraction en employant une anode en cuivre. Par la suite, cette méthode a été employée pour le traitement d'un pont contaminé par des chlorures en appliquant une densité de courant extrêmement élevée, de 23 à 28 A/m², pendant une durée de 24 heures.

- **Principe de méthode :**

La technique d'extraction électrochimique des ions chlore, également appelée déchlorurassions, est effectivement basée sur l'application d'un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier qui sert de cathode.

Le courant électrique induit le déplacement des ions chlore chargés négativement présents dans le béton vers l'anode extérieure. Lorsque les ions chlore atteignent la surface du béton, ils passent dans l'électrolyte et peuvent être éliminés définitivement du béton.

Le niveau de courant généralement appliqué lors d'un traitement d'extraction est de 1 à 5 A/m². Cette valeur peut varier en fonction des conditions spécifiques de la structure à traiter et des objectifs du traitement.

Il est important de noter que la déchloration est une technique temporaire et sa durée d'application typique est de 4 à 5 semaines. Pendant cette période, le courant électrique continu est maintenu pour permettre l'extraction des ions chlore du béton.

La déchloration est utilisée pour réduire la concentration des ions chlore dans le béton, ce qui peut ralentir ou prévenir la corrosion des armatures en acier. C'est une méthode couramment utilisée pour traiter les structures en béton contaminées par des chlorures, notamment les structures exposées aux environnements agressifs tels que les infrastructures marines et les ponts situés dans des zones où des sels de déneigement sont utilisés.

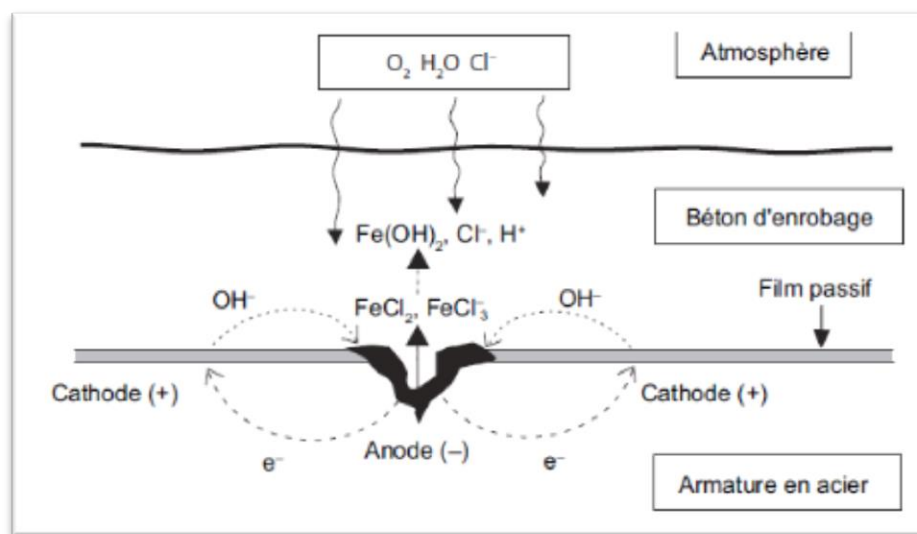


Figure II.15:Schéma D'application D'un traitement d'EC

Effectivement, l'application de la technique d'extraction électrochimique des ions chlore présente plusieurs points positifs, notamment :

1/Abaissement de la potentielle thermodynamique de l'acier : En extrayant les ions chlore du béton, le potentiel de corrosion de l'acier est réduit, ce qui diminue le risque de corrosion et prolonge la durée de vie de la structure.

2/Augmentation de la teneur en ions hydroxyle et augmentation du pH autour de l'armature : L'extraction des ions chlore permet d'augmenter la concentration d'ions hydroxyle à proximité de l'acier. Cela favorise la formation d'une couche passive d'oxyde sur l'acier, ce qui renforce sa protection contre la corrosion. De plus, l'augmentation du pH contribue également à la repassivation de l'acier et à la réduction de la corrosion.

3/Diminution de la teneur en ions chlore près de l'acier : L'objectif principal de la déchlorurassions est de réduire la concentration d'ions chlore dans les zones proches de l'acier. En éliminant les chlorures, on réduit le risque de corrosion et de détérioration des armatures en acier.

En combinant ces effets, la déchlorurassions contribue à améliorer la durabilité et la performance à long terme des structures en béton armé en réduisant le risque de corrosion des armatures. Cela permet de prolonger la durée de vie des ouvrages et de réduire les coûts de maintenance.

II.5.4.3 La Protection Cathodique

- **Principe :** (calgaro, et al., 1997)

La méthode de protection cathodique consiste à abaisser le potentiel de l'armature métallique jusqu'à une valeur appelée potentiel de protection. Cela est réalisé en imposant le passage d'un courant électrique de l'enrobage du béton vers l'armature. Il est important que ce potentiel ne soit pas trop négatif pour éviter la décomposition de l'eau interstitielle du béton par électrolyse, ce qui pourrait entraîner la formation d'hydrogène et fragiliser les aciers à haute résistance, tels que les armatures de précontrainte.

Il existe différents procédés de protections cathodiques utilisées pour les aciers dans les bétons exposés à l'air. Les deux types les plus courants sont les suivants :

Utilisation de revêtements conducteurs comme anodes : Dans ce cas, des revêtements conducteurs tels que des peintures conductrices ou des revêtements de zinc métallique sont appliqués sur la surface du béton en tant qu'anodes. Ces revêtements permettent de générer le courant nécessaire à la protection cathodique.

Utilisation d'anodes externes : Ce type de procédé implique l'installation d'anodes à la surface du béton, qui sont ensuite enrobées de béton, souvent par projection. Les anodes utilisées sont généralement des treillis de titane traité, également appelés treillis activés. Ces anodes sont maintenues en place sur le béton par des fixations isolantes, espacées d'environ 0,60 mètres.

Ces procédés de protection cathodique visent à réduire le risque de corrosion des armatures métalliques en maintenant un potentiel électrique protecteur et en évitant l'oxydation des aciers. Ils sont utilisés pour prolonger la durée de vie des structures en béton et réduire les coûts de maintenance associés à la corrosion des armatures. (Hamlaoui , 09/12/2012)

II.6. Conclusion

La nécessité de réparer les ouvrages est devenue une exigence économique et une nécessité technique essentielle dans la gestion du patrimoine d'ouvrage d'art. Cela implique l'intervention d'entreprises spécialisées dotées d'une vaste expérience, d'une maîtrise des équipements appropriés et bénéficiant de compétences humaines de haute qualité. Cette approche permet de réhabiliter les ouvrages à moindre coût tout en garantissant leur maintien dans leur état de fonctionnement initial, ce qui nous évite d'avoir à recourir à de nouvelles constructions et, par conséquent, génère des économies.

Chapitre III

Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

III.1 Introduction

Un diagnostic précis permet d'identifier les responsabilités des différents acteurs impliqués dans la gestion du projet. Ainsi, trouver la meilleure solution technique est clairement le remède efficace pour remédier à toute anomalie. Pour cette étude, nous avons choisi d'examiner en particulier quelques cas courants.

Ce chapitre a pour objectif d'examiner et d'analyser les problèmes fréquemment rencontrés dans les ouvrages d'art.

III.2 Étude des cas pathologiques

À travers l'étude de quelques cas pathologiques, nous avons pu compiler une documentation sur les causes courantes à l'origine de ces problèmes constatés. Il semble que les principaux facteurs contribuant à ces désordres soient : des erreurs de conception, des méthodes de réalisation inadaptées ou une mauvaise évaluation des caractéristiques du sol.

III.2.1 Cas lié à un problème d'exécution

Les constructions anciennes en maçonnerie, ainsi que les ouvrages en béton armé et précontraint, ont souvent été édifiés sans l'ajout d'une couche d'étanchéité. Cette situation perdue également de nos jours pour certains petits ouvrages, tels que les conduites préfabriqués (cadres, voûtes, ou tout autre procédé breveté, etc.).



Figure III.1:Etat de l'intrados d'un ouvrage en béton armé sans étanchéité

III.2.1.1 Analyse du défaut

À l'exception des structures de maçonnerie, l'absence d'étanchéité est souvent observée dans des ouvrages pour lesquels plusieurs raisons peuvent être identifiées :

- Dans le cas où la pente du profil en long est significative, favorisant ainsi l'écoulement naturel des eaux de ruissellement, la présence de matériaux tels que des feuilles, des gravillons, etc., peut entraîner la stagnation d'eau sur la surface du tablier.
- Des dimensions considérées comme petites ont conduit à la négligence de l'étanchéité.
- Dans certains cas, la précontrainte était considérée comme une technique permettant de minimiser le risque de fissuration, comme cela était le cas pour les premiers ponts à poutres précontraintes de type VIPP ou similaires, par exemple.

Cependant, il est important de noter que les ouvrages sont particulièrement vulnérables aux éléments, notamment aux eaux de ruissellement contenant des ions agressifs, aux conditions climatiques et aux conditions d'exploitation de la route, qui nécessitent parfois l'utilisation de sels de déverglaçage en hiver. L'absence d'étanchéité facilite l'infiltration de l'eau, permettant ainsi aux ions agressifs de pénétrer dans la structure de l'ouvrage. Cela peut entraîner la corrosion des armatures métalliques, leur expansion, ainsi que la dégradation du béton ou des joints en mortier. De plus, l'association des chlorures avec les cycles de gel et de dégel aggrave encore la situation (P, et al., 1998).

Les dégradations seront d'autant plus rapides et importantes que les matériaux utilisés présentent des caractéristiques intrinsèques moins favorables et que la qualité de leur mise en œuvre est médiocre. De manière surprenante, l'étanchéité est souvent négligée même dans la construction d'ouvrages de petite envergure, tels que les passages hydrauliques, les passages piétons ou de service, notamment ceux composés d'éléments préfabriqués assemblés côte à côte

III.2.1.2 Conséquences sur les ouvrages

L'eau, qu'elle soit plus ou moins chargée en ions agressifs, a la capacité de provoquer la détérioration du béton et du mortier, ainsi que la corrosion des armatures en acier. La présence d'hydroxyde de fer peut entraîner des fissures dans le béton et créer des contraintes locales dans la structure, ce qui aggrave les effets néfastes de l'eau sur les matériaux.

Chapitre III Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

La progression de ce phénomène conduit à une diminution de la section des armatures, qui ne peuvent plus supporter les charges prévues. Les fissures apparaissent dans les zones les plus sollicitées, pouvant éventuellement aboutir à une rupture. Sans réparation, l'ensemble de la structure peut être affecté.

Dans le cas des ouvrages d'art en maçonnerie, l'absence d'étanchéité peut entraîner la poussée des remblais gorgés d'eau, ce qui peut provoquer la dissolution progressive du mortier de jointoiement jusqu'à sa disparition complète. Cette situation entraîne généralement un désordre dans la maçonnerie, pouvant aller jusqu'à des conséquences graves, comme la déformation de la voûte voire son effondrement



Figure III.2:Dissolution du mortier de jointoiement avec déplacement des moellons

Les conséquences ont un impact significatif sur le plan économique, notamment :

- Il est nécessaire d'entreprendre des travaux de réparation sur la structure, ce qui implique la suppression des zones endommagées et la passivation des armatures en acier, si nécessaire.
- Il est également essentiel d'installer des armatures supplémentaires pour restaurer la structure d'acier initialement prévue lors de la construction.
- Ces travaux de réparation peuvent entraîner des perturbations pour les usagers, notamment en raison de la nécessité de démolir une partie de la chaussée

III.3.2.3 Solutions et mesures préventives

Pour les ouvrages neufs, il est impératif de prévoir une étanchéité complète en conformité avec les directives réglementaires. Cette étanchéité doit englober l'ensemble de la structure, y compris les conduits préfabriqués, jusqu'aux semelles. Ces recommandations

Chapitre III Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

restent valables même pour les ouvrages construits en utilisant des bétons à haute performance ou à très haute performance, bien que ces types de béton présentent des caractéristiques intrinsèques supérieures aux bétons standards, notamment une compacité remarquable.

En ce qui concerne les ouvrages anciens qui n'ont pas été dotés d'une étanchéité, il est impératif de mettre en place une protection adéquate. Il est également souhaitable de limiter l'infiltration des eaux de ruissellement sur l'ouvrage en prévoyant un système de drainage efficace ainsi que des descentes d'eau fonctionnelles, idéalement à chaque extrémité. Dans le cas de ponts particulièrement longs ou situés en point bas de la route, il est nécessaire d'installer des gargouilles.

Pour les ouvrages en maçonnerie, le guide technique des Ponts-routes en maçonnerie (Protection contre l'action des eaux) offre des directives précises concernant les différentes positions possibles pour l'étanchéité (haute, basse, intermédiaire) ainsi que les mesures d'accompagnement. Si l'étanchéité immédiate de l'ouvrage n'est pas envisageable à court terme, il peut être nécessaire de mettre en place une mesure de sauvegarde provisoire, telle que le drainage à partir de barbacanes crépinées situées en quinconce à la base et aux reins de la voûte.

III.2.2 Cas d'un ouvrage soumis à un choc

Suite à une collision avec un véhicule non conforme aux dimensions autorisé en 2012, l'échangeur situé sur la route RN1 au nord de la ville de Laghouat a été endommagé. L'expertise a été menée par l'équipe SAPTA à la demande de la Direction des Travaux Publics (DTP) de Laghouat. Un diagnostic de l'échangeur a été réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'étude (Benkhalefa, et al., 2013) Cet échangeur construit en 2010 par la société SAPTA, consiste en un pont droit avec des poutres en béton précontraint par pré-tension, sur lequel repose une dalle en béton armé de 20 cm d'épaisseur. Il se compose d'une seule travée mesurant 28 mètres de long sur 10 mètres de large. Le gabarit autorisé est de 5,70 mètres, et la chaussée est bidirectionnelle, comprenant deux voies de circulation.



Figure III.3:Vue de l'ouvrage après le heurte de l'engin (Benkhalefa, et al., 2013)

III.2.2.1 Désordres constatés

Suite à l'expertise réalisée, les dommages suivants ont été constatés :

Les deux poutres côté Laghouat qui ont été heurtées par le véhicule hors gabarit présentent une destruction du béton sur une longueur de 7 mètres, avec cisaillement des armatures passives et actives. Il est à noter que la hauteur minimale disponible sous le tablier est de 5,65 mètres.



Figure III.4:Destruction des poutres de l'ouvrage

Il a également été observé des fissures longitudinales et transversales très marquées et traversantes sur plusieurs mètres de la 6ème poutre du côté Laghouat. Ces fissures ont provoqué une discontinuité dans la section du béton entre le talon inférieur, l'âme et le talon supérieur de la poutre. Il semble que la poutre ait été accrochée et entraînée par le véhicule qui l'a heurtée

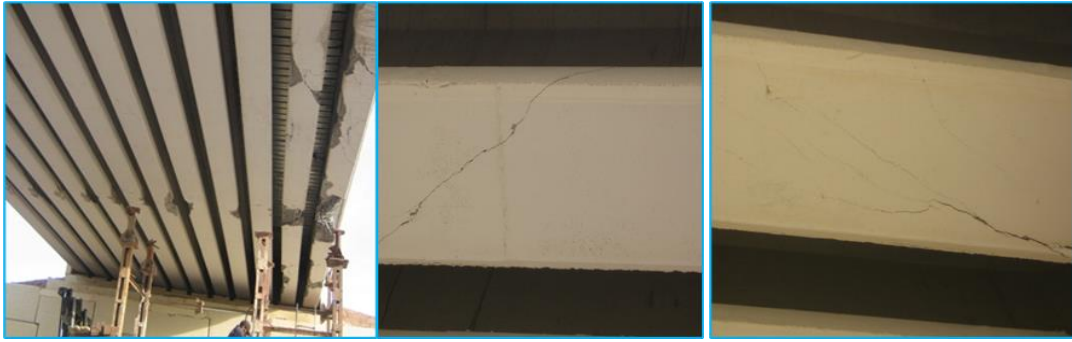


Figure III.5: Différentes Fissures sur plusieurs poutres de l'ouvrage

De plus, des fissures longitudinales et transversales se sont étendues sur une longueur de 4 mètres sur la 2ème poutre du côté Djelfa, entraînant une discontinuité dans la section du béton entre l'âme et le talon supérieur de la poutre.



Figure III.6: Discontinuité du béton entre l'âme et le talon supérieur

En outre, il y a eu un éclatement du béton et l'apparition des armatures passives et actives au niveau du talon de toutes les poutres du tablier endommagé à la suite de la collision avec le même véhicule.



Figure III.7:Eclatement du béton et apparition des aciers et des câbles de précontrainte

III.2.2.2 Solutions envisagées

Après avoir examiné les dommages visibles sur la superstructure, des recommandations ont été formulées pour les travaux à entreprendre :

1. Pour les poutres N°01, 02 et 06 du côté Laghouat, qui sont gravement endommagées et ne peuvent pas être réparées, elles doivent être remplacées conformément aux plans d'exécution initiaux. Les étapes à suivre sont les suivantes :
 - Conserver les poutres restantes avec leur hourdis.
 - Retirer le trottoir et une partie de l'hourdis au-dessus des poutres (de 01 à 06 côté Laghouat), ainsi que le garde-corps.
 - Retirer les poutres endommagées (01, 02 et 06) (voir Figure III.8 ci-dessous).
 - Installer les trois nouvelles poutres préfabriquées conformément aux plans d'origine (voir Figure III.9 ci-dessous).
 - Créer un coffrage perdu (dalles préfabriquées en béton armé ou TN40).
 - Mettre en place le ferrailage de l'hourdis en assurant la connexion avec la partie préservée du tablier (voir Figure III.10).
 - Procéder au coulage de l'hourdis.
 - Rétablir le trottoir ainsi que le garde-corps (voir Figure III.11).

Chapitre III Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

2. Pour les autres poutres présentant des éraflures dans les talons de la travée côté Laghouat, les travaux à entreprendre sont les suivants :

- Réaliser un piquage général des zones endommagées.
- Effectuer un brossage vigoureux des armatures exposées.
- Nettoyer les zones touchées avec de l'air comprimé.
- Appliquer un enduit d'émulsion de résine de type [spécifier le type d'enduit].
- Appliquer un mortier à base d'émulsion de résine de type [spécifier le type de mortier].

Ces mesures permettront de restaurer la stabilité et la sécurité de la structure endommagée de l'échangeur routier



Figure III.8:Enlèvement les poutres endommagées



Figure III. 9:Pose des nouvelles poutres



Figure III. 10:Reconstitution de la partie de la dalle démolie



Figure III. 11:Reconstitution du trottoir et pose garde-corps

III.2.3 Cas lié à un problème de corrosion

La galerie du réseau d'égouts de Touggourt est une structure souterraine d'une longueur totale de 3150 mètres conçue pour la collecte et l'évacuation des eaux de ruissellement, principalement les eaux usées de la ville de Touggourt. La construction de cette galerie a été réalisée en trois phases distinctes : 650 mètres en section rectangulaire en 2002, 1000 mètres en section en voute en 2006, et enfin 1448 mètres en section en voute en 2012 (Benkhalefa, et al., 2013).

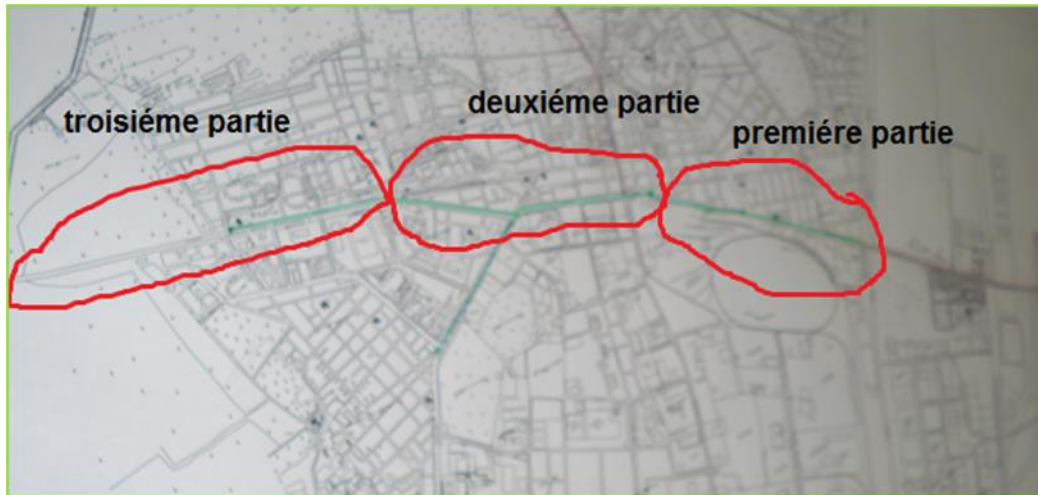


Figure III. 12:Disposition de la galerie à la ville de Touggourt

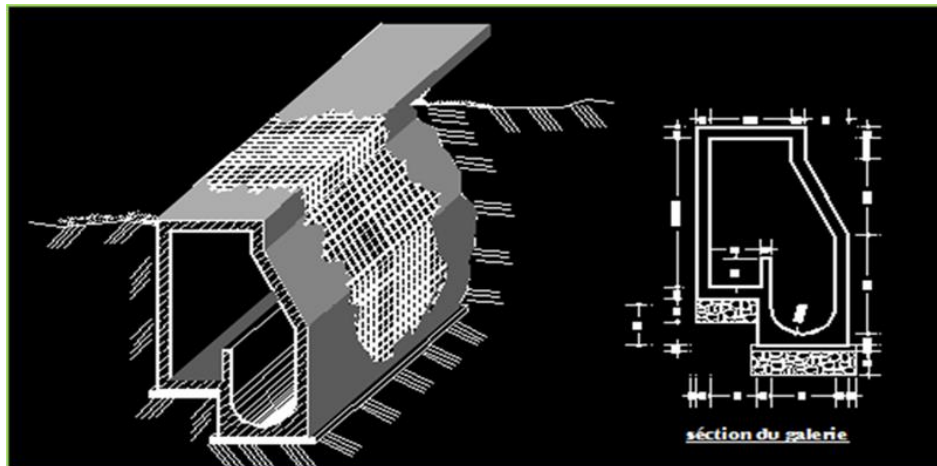


Figure III. 13:Schéma 3D avec la section transversale de la galerie

III.2.3.1.Désordres constatés

➤ Les dégradations liées aux facteurs climatiques et environnementaux

La carbonatation du béton désigne une altération de ses composants due à la présence d'air et à un taux d'humidité élevé. Les parois du regard sont particulièrement vulnérables à la carbonatation. De plus, la présence d'ions chlorures a également contribué au processus de corrosion.



Figure III.14:La Carbonatation des parois du regard de galerie



Figure III.15:la corrosion des armatures d'une paroi extérieure de galerie



Figure III.16:la corrosion des armatures et l'éclatement du béton d'une paroi



Figure III.17:La Corrosion des armatures et la fissuration du béton a la dalle

➤ **Les dégradations liées à la mise en œuvre :**

En raison de problèmes lors de la mise en œuvre, plusieurs ségrégations ont été observées sur les parois intérieures ainsi que sur la dalle de la galerie



Figure III.18:ségrégation de dalle de la dernière partie première de galerie



Figure III. 19:Ségrégation de dalle de la partie de galerie

Chapitre III Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

L'effet d'éclatement du béton se manifeste également sur les parois de la galerie ainsi qu'au niveau des ouvertures des regards d'aération. **Figures (III.20)**



Figure III. 20:L'éclatement du béton d'une paroi de faible d'enrobage d'acier

Les poutres, les dalles, les parois, les escaliers..., présentent aussi des fissurations multiples (voir figures III.21 ; III.22)



Figure III.21:Les dégradations des faces extérieures des dalles de galerie



Figure III.22:Fissuration transversale du béton d'une poutre de dalle de galerie



Figure III.23:Fissuration longitudinale d'une paroi de galerie



Figure III.24 : Dégradation des parois intérieures de galerie sous l'effet de perméabilité

III.2.3.2. Analyse des causes de dégradation

L'analyse du diagnostic a révélé les causes suivantes :

1. Défauts de mise en place du ferrailage : Non-respect des plans de ferrailage (erreurs dans la disposition des aciers) et mauvaise disposition des armatures.
2. Défauts de malaxage et de coulage : Malaxage trop court, un déchargement très lent des malaxeurs à tambour non inclinable qui cause la ségrégation. Généralement, l'équipe sur le chantier essaie de couler le béton rapidement, laissant tomber librement le béton, surtout lorsqu'on bétonne un élément d'une hauteur importante avec une forte densité de ferrailage, ce qui peut nuire à son homogénéité.
3. Défauts de coffrage et de décoffrage : L'absence d'écarteurs de coffrage peut entraîner une insuffisance d'enrobage. Un coffrage qui n'est pas étanche permet à une partie du ciment de s'échapper.

Chapitre III Exemples de cas pathologiques : Analyse, remède et mesures préventives

4. Défauts de vibration : Une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité, induisant des fissurations précoces. De même, une vibration excessive produira une certaine ségrégation dans le mélange, particulièrement dans les bétons assez fluides.
5. Défauts de cure : Le bétonnage par temps chaud (température extérieure $> 35^{\circ}\text{C}$) accélère la prise et diminue rapidement la plasticité du béton, ce qui augmente la fissuration après la mise en œuvre.

Défauts de perméabilité : Chute de résistance mécanique, éclatement du béton, etc.

III.2.3.3. Solutions envisagées

Pour la réparation des dégradations de cette galerie, il a été suggéré de suivre les étapes suivantes :

1. Reprendre l'épaisseur du béton sur toutes les zones touchées en utilisant des techniques appropriées telles que le piquage, le bouchardage, l'hydro-décapage, l'hydro-sablage, le grenaillage, etc.
2. Remplacer les armatures dégradées par de nouvelles armatures présentant les mêmes caractéristiques.
3. Utiliser des produits de réparation tels que les résines, les mortiers à base de liants hydrauliques ou à base de synthèse.
4. Appliquer des produits ou des systèmes d'imperméabilisation sur les parois de la galerie, en particulier celles en contact avec les eaux usées, afin de les protéger contre la corrosion et la carbonatation. Ces produits peuvent inclure des hydrofuges, des enduits superficiels et des membranes d'imperméabilisation.

Réparer et protéger les faces extérieures des dalles de la galerie contre les dégradations causées par les charges extérieures en réalisant des couches bitumineuses.

III.2.4. Cas lié à un problème L'eau :

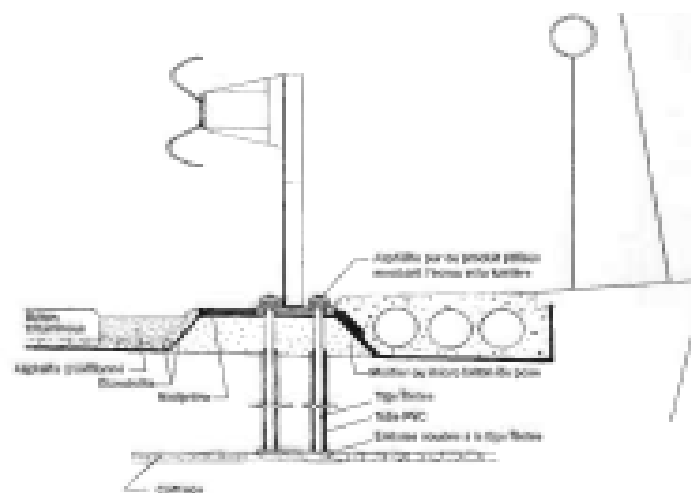
L'eau s'infiltre à travers les espaces réservés aux tiges d'ancrage des platines de soutien des barrières de sécurité et des lampadaires, puis s'écoule le long de la face intérieure des tabliers.

III.2.4.1. Analyse du défaut

L'eau pénètre dans les réservations des tiges d'ancrage malgré les dispositions constructives prévues pour assurer l'étanchéité pour plusieurs raisons :

1. Le vieillissement des matériaux, principalement aux interfaces, facilite l'infiltration d'eau.
2. Souvent, il n'y a pas de larmier ou d'autres dispositifs autour des sorties des réservations en sous-face, ce qui permet à l'eau de suivre le chemin à l'intérieur de la structure.
3. Le manque d'entretien des dispositifs visibles et accessibles accélère les détériorations.
4. Parfois, lors de la mise en œuvre, les dispositions constructives pour assurer l'étanchéité sont négligées.

Les dispositifs d'étanchéité au niveau des ancrages sont des points critiques et complexes à gérer pour garantir l'étanchéité globale du tablier. Cette opération nécessite l'intervention d'un spécialiste de l'étanchéité après la mise en place des dispositifs d'ancrage, ce qui peut créer des tensions en raison des contraintes de calendrier entre différents corps de métier



III.2.4.2. Conséquences sur les ouvrages

Les conséquences de la circulation de l'eau ont un impact relativement limité sur la structure des ouvrages, en comparaison de l'effet qu'elles ont sur les dispositifs de fixation des glissières, des barrières, des lampadaires et des équipements en général.

De plus, les réservations dans le tablier sont revêtues d'un tube en PVC par lequel l'eau s'écoule. Cela évite que le béton du tablier ne soit profondément endommagé, mais les éléments métalliques du dispositif d'ancrage subissent une forte corrosion due à l'eau et aux sels de déverglaçage. Dans certains cas, cette corrosion peut même entraîner la rupture des tiges filetées, ce qui représente un risque significatif pour la sécurité des usagers.

En ce qui concerne les chemins empruntés par l'eau à l'intérieur de la structure, ils causent les détériorations classiques provoquées par l'eau, les sels de déverglaçage et les cycles de gel-dégel, notamment l'écaillage, l'oxydation des armatures, le gonflement de celles-ci et le décollement de l'enrobage.

III.2.4.3. Solutions et mesures préventives :

Afin de résoudre les problèmes mentionnés précédemment, nous chercherons, dans la mesure du possible, à éviter l'utilisation de dispositifs d'ancrage traversants. Voici les directives spécifiques pour différents types d'équipements :

1. Pour les ancrages des équipements de sécurité destinés aux véhicules légers, nous les réaliserons dans des longrines non ancrées, coulées sur l'étanchéité, conformément à la pièce 3.2.3 du GC 77, lorsque la longueur de la longrine peut dépasser 15 mètres. Dans le cas contraire, nous utiliserons des longrines ancrées avec des relevés d'étanchéité. Pour plus d'informations, consultez les fiches 2 "absence d'étanchéité sous trottoir" et 4 "défaut de relevé d'étanchéité".
2. Pour les barrières de sécurité destinées aux poids lourds, qui sont implantées entre la chaussée et un passage de service ou un trottoir, telles que les modèles BHO et BN5, nous ferons de notre mieux pour prévoir des fixations dans des longrines non ancrées. Si cela n'est pas possible, nous utiliserons des longrines ancrées avec des relevés d'étanchéité.
3. Pour les autres modèles de barrières, en particulier lorsqu'elles sont placées en bordure du tablier, comme c'est le cas pour les BN1, BN2, BN4, etc., les ancrages seront prévus dans des longrines ou des plots solidaires de la structure.
4. En ce qui concerne les lampadaires, nous envisagerons de les installer à l'extérieur de l'ouvrage, par exemple sur une console fixée à la structure (âme de poutre, intrados d'encorbellement, etc.), si cela est techniquement réalisable et esthétiquement approprié. Cette disposition devra être étudiée et réalisée avec soin pour éviter tout risque de formation de coulures de rouille, comme illustré dans la photographie ci-dessous, représentant un ouvrage métallique.

5. Pour garantir la durabilité des ancrages, il est essentiel de prévoir une étanchéité autour et sur les vis de fixation en utilisant un procédé adapté, tel que des capsules compressibles et des bouchons, et éventuellement une étanchéité complémentaire conformément à la description de la fiche 14c "défaut d'étanchéité au niveau des équipements : jonction corniche-trottoir" (P, et al., 1998)

III.3. Conclusion

L'étude des défaillances, des dommages et des causes sous-jacentes permet de mieux comprendre les défis auxquels sont confrontés les ingénieurs, les gestionnaires et les décideurs.

Il est évident que la préservation à long terme des ouvrages d'art nécessite une surveillance continue, des inspections régulières et des réparations appropriées. Cela permet non seulement de garantir la sécurité publique, mais aussi de prévenir les coûts élevés de réparation ou de remplacement en cas de négligence. De plus, l'analyse des pathologies offre des opportunités d'innovation dans la conception et la maintenance des ouvrages, notamment grâce à l'utilisation de nouvelles technologies telles que la surveillance par capteurs et la modélisation numérique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La préservation et l'entretien des ouvrages d'art sont d'une importance capitale pour assurer la sécurité des infrastructures et la mobilité des personnes et des biens. L'étude des pathologies courantes dans ces structures et la mise en place de mesures préventives adéquates sont des éléments essentiels de la gestion responsable du patrimoine bâti.

Au cours de cette étude, nous avons exploré en détail les pathologies fréquemment rencontrées dans les ouvrages d'art. Nous avons identifié suite à une profonde recherche bibliographique les causes et origines des pathologies touchant les ouvrages d'art, allant de l'érosion naturelle aux contraintes mécaniques et aux facteurs environnementaux.

L'analyse des pathologies nous a permis de comprendre l'importance de la surveillance régulière et de la maintenance préventive. En mettant en place des inspections périodiques et des protocoles de maintenance adaptés, nous pouvons non seulement prolonger la durée de vie des ouvrages d'art, mais aussi réduire considérablement les coûts de réparation et d'entretien à long terme. De plus, ces mesures préventives contribuent à garantir la sécurité des usagers et à éviter les perturbations majeures dans nos réseaux de transport.

Les mesures préventives vont au-delà de la simple réparation des dommages existants. Elles incluent également l'amélioration des conceptions, des matériaux et des techniques de construction pour minimiser les risques de pathologies futures. L'innovation continue dans le domaine de la construction et de l'ingénierie est essentielle pour garantir la durabilité des ouvrages d'art.

En conclusion, l'étude des pathologies courantes dans les ouvrages d'art et la mise en œuvre de mesures préventives adéquates sont des éléments essentiels pour préserver notre infrastructure essentielle. Cela nécessite une collaboration continue entre les ingénieurs, les chercheurs, les autorités réglementaires et les parties prenantes concernées. En investissant dans la maintenance préventive et en adoptant des approches novatrices, nous pouvons garantir que nos ouvrages d'art continueront de jouer un rôle vital dans la mobilité et la sécurité de notre société pour les générations à venir.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références

A, Plumier. 2006. *Pathologie et réparation structurales des constructions partie III.* s.l. : ArGenCo, 2006.

Benkhalefa, Chouaibe et Amieure, Taha, Yacine. 2013. *Pathologie des Constructions civiles: Diagnostic et Technique de Réparation.* LAGHOUAT : Mémoire de master de l'université LAGHOUAT, 2013.

Bertrand, Schwartz. 2010. *Réhabilitation des bâtiments structures et enveloppe solutions techniques* . s.l. : Lavoisier , 2010.

BOUKSANI , Omar. 2013. *REPARATION DES OUVRAGES EN BETON- Reprofilage-*. Alger : Thèse présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITE des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Alger, 2013.

BOUTARAA , Zohra. 2019. *Polycopié de Pathologies et réhabilitation des ponts* . Chlef : mémoire de master de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2019.

calgaro, J A et LACROIX , R. 1997. *Maintenance et réparation des ponts* . France : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées , 1997.

Christophe, AUBAGNAC, et al. 2018. *Surveillance et entretien courant des ouvrages d'art.* rue de parie : s.n., 2018.

GADRI , KARIMA. *Contribution A L'étude D'un Béton De Sable Avec Fibres Et Résine Destiné Pour La Réparation Mince des structures* . Biskra : Mémoire de magistère l'université de Biskra faculté des sciences de l'ingénieur Département de génie civil Laboratoire De génie civil .

Habbache, Rihab. 2021. *Réhabilitation des structures en béton armé* . Guelma : Mémoire de master université 8 mai 1945 de Guelma, 2021.

Hamlaoui , Salim. 09/12/2012. *Maintenance, entretien et réparation des ponts.* Biskra : Mémoire présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Magistère de l'Université Mohamed Khider – Biskra, 09/12/2012.

HAMOUCHI, Meryem . 2013. *Pathologie et réparation des ouvrages en béton armé.* Guelma : Mémoire de fin d'étude pour obtenir le diplôme de master de l'université 8 Mai 1945, 2013.

Hicham, Belhannachi . 2009. *Réhabilitation Et Renforcement des Poteaux En Béton armé* . Constantine : Thèse De Magistère de l'université Mentouri , 2009.

Hikmat , Al Hajjar. 2008. *Applicabilité Et Efficacité D'une Protection Galvanique aux aciers De Précontrainte.* France : Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier , 2008.

Jean , PERRET. 1997. *Guide de la maintenance de bâtiments.* s.l. : Moniteur, 1997.

MAIZI, Ibtisam et BENJOUDI, Mouslam. 2013. *Réhabilitation des structures en béton armé* . Guelma : Mémoire de master de l'université 8 mai 1945 , 2013.

Ouiza , KACI. 2017. *OUTIL D'AIDE A LA DECISION APPLIQUE AUX OUVRAGES D'ART*. TIZI-OUZOU : MEMOIRE DE FIN D'ETUDES de Master UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017.

Ouzza, kheira . 2015. *polycopié "Réhabilitations des structures* . ORAN : Thèse de doctora de l'université des sciences et de la technologie d'oran Mohammed BOUFIAF U.S.T.O, 2015.

P, BERGER, et al. 1998. *PREVENTION DES PATHOLOGIES COURANTES D'OUVRAGES D'ART*. PARIS : s.n., 1998.

selma, Haouara. 2004. *Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé dans la région de biskra* . Biskra : Mémoire de Mgistère de l'université de biskra faculté des sciences et sciences de l'ingénieur département de génie civil laboratoire de génie civil , 2004.

TANKEU, NDANGA et Tatiana , Sylviane. 2011. *PATHOLOGIE, EVALUATION ET REPARATION DE PONTS EN BETON ARME ETUDE DE CAS : OUVRAGES SUR LE TRONÇON ATAKPAME – KARA DE LA ROUTE NATIONALE N°1 AU TOGO*. s.l. : Mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER, 2011.

ZIGHEM, NAIMA. 2021. *Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages d'art*. Guelma : Mémoire de Master de l'Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021.

Liste des Abréviations :

EC : Extraction des ions chlore

TFC : Tissu de fibre de Carbone

TD : Thermodurcissable

TP : thermo plastique

LVDT : Liner variable différentiel transformé

RN : Route Nationale

DTP : Direction travaux publique

PH : potentiel d'hydrogène