

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



Département Génie Civil

**Mémoire de Master présenté pour l'obtention du
Diplôme de Master en Génie Civil**

Intitulé

Renforcement et réhabilitation des ponts en béton

GASMI Rabah

Sous la direction de :

Mme R.KETTAB Professeur ENP

Présenté et soutenu publiquement le 22/06/2016 devant le jury composé de :

Président	Mr	A.BALI	Professeur	ENP
Rapporteurs	Mme	R.KETTAB	Professeur	ENP
Examineurs	Mme	N.BAUCHE	M.A.A	ENP
	Mr	S.LAKEHAL	M.A.A	ENP

ENP 2016

ملخص

تصاب المنشآت الفنية بصفة عامة بأضرار واضطرابات متعددة ورغم اختلاف أسبابها وأصولها إلا أن حجر العقبة يكمن في كونها ذات أضرار جد خطيرة، مما يتوجب التدخل السريع لمعرفة حالة هذه المنشآت وطريقة استجابتها.

ومن هذا السياق، قمنا بهذا العمل الذي يُعتبر مساهمة متواضعة تحليلية ذات طابع علمي للمنشآت الفنية، وهذه الدراسة تُتيح لنا معرفة الأسباب المحتملة لهذه الأضرار وأصولها الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية. مع توضيح عدة دراسات تجريبية تُسهل لنا كخبراء مهندسون معرفة الأصول الحقيقية لهذه الأضرار. وأخيرا وليس اخرا قمنا باقتراح عدة طرق علمية لإصلاح أو تدعيم المنشآت ذات الخرسانة المسلحة بصفة عامة والجسور ذات الخرسانة المسلحة بصفة خاصة مع تطبيق هذه التقنيات على حالتين مختلفتين وختاما قمنا بتلخيص كل هذا العمل في شكل توصيات جد مهمة.

الكلمات المفتاحية: أضرار- منشآت- دراسات تجريبية- عملية إصلاح- تقوية المنشآت

Abstract

The works may be affected by disorders varies with severity and multiple causes, these disorders become more dangerous, then what makes us think about the current state of these structures and their behavior.

In this context, this work is a modest contribution to a scientific study of the structures allows us to determine degradation and their probable causes and background physics, chemistry and mechanics, with experimental studies to fully clarify the origin of the damage, and finally we proposed main methods of repairing or strengthening of reinforced concrete summarizing those with very important recommendations.

Key words: Disorders- works -experimental studies- methods of repair-building works.

Résumé

Les ouvrages peuvent être affectés par des désordres de gravité très variable et dont les causes sont multiples, ces désordres deviennent de plus en plus dangereux, ce qui nous incite à réfléchir sur l'état actuel de ces ouvrages.

Dans ce contexte, ce modeste travail consiste à l'étude des dégradations et leurs causes probables d'origine physico-chimie ainsi que mécanique. Des méthodes de réparation ou de renforcement des ouvrages d'art en béton armé ont été examinées et leur application à deux exemples pratiques de ponts situés à SIDI AICH et OULED MOUSSA; des recommandations ont été proposées.

Les mots clés: Désordres- ouvrages d'art – béton armé- méthodes de réparation-renforcement des ouvrages

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ceux qui représentent tout pour moi, mes chers parents, qui n'ont jamais cessé de m'encourager afin de franchir tout obstacle durant mes années d'étude.

Mes deux frères Djamel et Yacine au près de qui j'ai trouvé réconforts et encouragements.

Tous mes amis qui m'ont apportés l'aide et le soutien durant ces années de formation.

GASMI RABAH

REMERCIEMENTS

Je ne remercierai jamais assez mon encadreur Pr .KETTAB.R pour m'avoir si bien orienté, à qui sincérité, dévouement et minutie ne font pas faute.

Je n'oublierai jamais l'effort fourni par Dr Mr.ABDESSEMED afin de trouver solution à nos problèmes.

Je remercie l'ensemble des ingénieurs de l'Entreprise Nationale des Grands Ouvrages d'Arts, pour leur accueil et leur disponibilité remarquable.

Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, et aussi à tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation de manière professionnelle.

Enfin, mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui mon aidé, encouragé et soutenu.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	11
------------------------------------	----

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction	12
I.2 Généralités sur les ponts	12
I.2.1 Définition des différentes parties d'un pont	12
I.2.2 Classification des ponts	13
I.3 Entretien des ponts.....	14
I.3.1 Entretien courant.....	14
I.3.2 Actions d'entretien courant	15
I.3.3 Entretien et réparation spécialisés	16
I.3.4 Action d'entretien spécialisé	16
I.3.5 Action de réparation spécialisé	16
I.4 Conclusion	17

Chapitre II : Dégradation de la structure et techniques de diagnostique

II.1 Introduction	18
II.2 Dégradation et vieillissement	18
II.3 Désordres affectant les ouvrages.....	18
II.3.1 Dégradation des matériaux.....	18
II.3.1.1 Erosion, abrasion et chocs	19
II.3.1.2 Altération physico-chimique du béton	19
II.3.1.3 Action des cycles de gel-dégel	19
II.3.1.4 Retrait	20

II.3.1.5 Corrosion des armatures.....	20
II.3.2 Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution.....	20
II.3.3 Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages.....	22
II.4 Désordres et causes probables.....	23
II.5 Les fissures.....	24
II.5.1 Caractéristiques des fissures.....	24
II.5.2 Types de fissures et causes probables	26
II.6 Diagnostic.....	27
II.6.1 Objectifs du diagnostic.....	27
II.6.2 Visite préliminaire.....	27
II.6.3 Inspection détaillée.....	28
II.6.4 Mesures relatives aux armatures	29
II.6.4.1 Mesure de l'enrobage des armatures.....	29
II.6.4.2 Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion ..	30
II.6.4.3 Estimation de la vitesse de corrosion	31
II.6.5 Mesures relatives au béton	32
II.6.5.1 Émission acoustique.....	32
II.6.5.2 Impact acoustique.....	32
II.6.5.3 Carottage	32
II.6.5.4 Scléromètre.....	33
II.7 Conclusion.....	34

Chapitre III : Méthodes et techniques de renforcement

III.1 Introduction.....	35
III.2 Méthodes de réparation et de renforcement.....	35
III.2.1 Traitement de Surface	35

III.2.1.1 Ragréages	35
III.2.1.2 Injection des fissures.....	36
III.2.2 Protection du béton et des armatures	37
III.2.2.1 Techniques de protection du béton	37
III.2.2.2 Protection des armatures	39
III.2.3 Régénérations des matériaux	39
III.2.4 Ajout de forces ou de déformations	40
III.2.4.1 Renforcement des ouvrages en flexion	40
III.2.4.2 Renforcement des ouvrages vis à vis de l'effort tranchant	40
III.2.4.3 Exemples de traitement d'autres types de défauts.....	41
III.2.5 Ajout de matière.....	41
III.2.5.1 Béton projeté	41
III.2.5.2 Coulage ou injection de béton ou de mortier	42
III.2.6 Renforcement par collage de tissus composites	43
III.2.6.1 Propriétés des fibres de carbone	43
III.2.6.2 Procédure de mise en œuvre du TFC	43
III.2.7 Ajout d'armatures	46
III.2.8 Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés.....	46
III.3 Conclusion.....	47

Chapitre IV : Exemples de réhabilitation

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Objectifs de l'étude.....	48
IV.3 Cas du pont de SIDI AICH.....	49
IV.3.1 Description de l'ouvrage.....	49
IV.3.2 Inspection de l'ouvrage.....	50
IV.3.3 Réparation et réhabilitation de l'ouvrage	52

IV.4 Cas du pont intégrant la 2 ^{ème} rocade du projet autoroute est-ouest	53
IV.4.1 Description de l'ouvrage.....	53
IV.4.2 Inspection de l'ouvrage.....	54
IV.4.3 Réparation et réhabilitation de l'ouvrage	56
IV.5 Conclusion	57
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	59

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Désordres enregistrés sur les ponts et leurs causes probables.....	22
Tableau II.2: Différents types de fissures enregistrés sur les ponts et leurs causes probables.....	25

Liste des figures

Figure I.1 : Différents éléments d'un pont.	13
Figure II.1: Détection des armatures au radar	29
Figure II.2: Roue électrode.	30
Figure II.3: Mesures de potentiel.	30
Figure II.4: Mesure de la vitesse de corrosion.	31
Figure II.5: Essai au marteau Schmidt.	33
Figure III. 1 : Application d'une couche de résine.....	44
Figure III. 2: Application d'une couche d'imprégnation de la même résine.	45
Figure III. 3: Application de la couche de fermeture.	45
Figure IV. 1: Pont de SIDI AICH.....	49
Figure IV. 2: Plan de situation du pont.....	49
Figure IV. 3: Poutre de rive fissurée.....	50
Figure IV. 4: Armatures de la poutre de rive dénudée.	51
Figure IV. 5: Éclatement du béton et corrosion des armatures de la pile.....	51
Figure IV. 6: Corrosion très importante des frettes.	52
Figure IV. 7: Pont OULED MOUSSA.....	53
Figure IV. 8: Plan de situation du pont.....	54
Figure IV. 9: Absence d'enrobage et corrosion des armatures des piles.....	55
Figure IV. 10: Ségrégation du béton et dénudement des armatures.....	55
Figure IV. 11: Fissuration du béton et armatures corrodés.	56

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, comme la plupart des pays en voie de développement, dispose d'une infrastructure de transport relativement jeune en comparaison aux pays développés. Le réseau routier Algérien comporte environ 5000 ponts, dont la construction et la nature de certains leur confèrent une valeur historique et technique inestimables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses, alors que d'autres ouvrages récents présentent une détérioration importante.

La plupart de ces ouvrages d'art sont réalisés en béton armé, susceptibles de se dégrader au cours du temps par des mécanismes d'endommagement très variés qui peuvent induire une dégradation structurale, fonctionnelle ou esthétique et avoir comme conséquence une perte de valeur ou de qualité de service à un niveau élémentaire ou global.

Un ouvrage d'art peut se dégrader sous l'influence des causes liées à sa qualité d'origine ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Pour permettre d'augmenter ou tout simplement de maintenir la durée de vie de l'ouvrage d'art, il y a lieu de prévoir une consolidation ou réparation adéquate.

Mais il est important, pour que la réparation soit de qualité, de connaître tous les causes et les types de pathologies apparentes ou cachées affectant ces ouvrages. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, il est essentiel d'établir le diagnostic nécessaire pour la prise de décision relative à l'entretien, maintenance ou réhabilitation de l'ouvrage concerné afin d'éviter une intervention qui peut empirer l'intervention.

Pour cela, le diagnostic préalable de l'ouvrage constitue la base nécessaire pour le choix de la stratégie de réparation la plus adéquate en fonction du type de dégradation.

Après une introduction générale, le chapitre un, fait l'objet d'une synthèse bibliographique sur les ponts. Ensuite, on définira les principaux désordres enregistrés sur les ouvrages et les méthodes de diagnostiquassions en chapitre deux. On s'intéressera par la suite aux différentes méthodes de réparation en chapitre trois. En fin, nous appliquerons les différentes étapes de réhabilitation d'un pont sur deux ouvrages. Cette étude se terminera par une conclusion générale.

I.1 Introduction

Dans le domaine routier, un ouvrage d'art est une construction de génie civil autre qu'un bâtiment qui permet d'assurer et/ou de protéger la continuité d'une voie de circulation. Il existe trois grands types d'ouvrages d'art : les ponts (qui comprennent également les buses), les ouvrages de soutènement et les tunnels (qui englobent également les tranchés couvertes).

Dans ce qui suit on ne traitera que les ponts routes.

I.2 Généralités sur les ponts

C'est un ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel (un cours d'eau, un bras de mer...) ou une autre voie de circulation (route ou voie ferrée) ou d'enjamber un espace vide une vallée, un ravin.

Suivant les caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage, on distingue :

- La buse : ouvrage de forme cylindrique pour le passage de l'eau.
- Ponceau ou dalot : pont de petites dimensions.
- Viaducs : ouvrage généralement de grande hauteur, ou a nombreuses travées, comme les ouvrages d'accès aux grands ponts; terme plutôt réservé aux franchissements en site terrestre.

I.2.1 Définition des différentes parties d'un pont

Un pont routier comprend 4 parties principales :

- Les abords et la zone d'influence de l'ouvrage: il s'agit des talus, chaussés, remblais contigus à l'ouvrage ainsi que les ouvrages éloignés dont le bon fonctionnement conditionne l'état de l'ouvrage. Pour les petits ouvrages, l'état des abords est souvent très révélateur du bon fonctionnement de la structure de l'ouvrage.
- Les appuis et fondations : les appuis ont pour principale fonction de transmettre les charges verticales et horizontales du tablier aux fondations. Les appuis d'extrémités, ou culées comprennent des murs qui transmettent des efforts horizontaux de poussée des terres.

- La structure porteuse est constituée d'un tablier qui porte les voies de circulation: il peut être constitué en voûte de maçonnerie, en béton armé, en métal...
- Les équipements sont des éléments ajoutés à la structure et nécessaires à sa conservation, son usage ou son exploitation : dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux : gargouilles, cunettes, garde-corps, trottoirs, corniches, joints de chaussées, signalisation...

La figure I.1 illustre les différentes parties d'un pont.

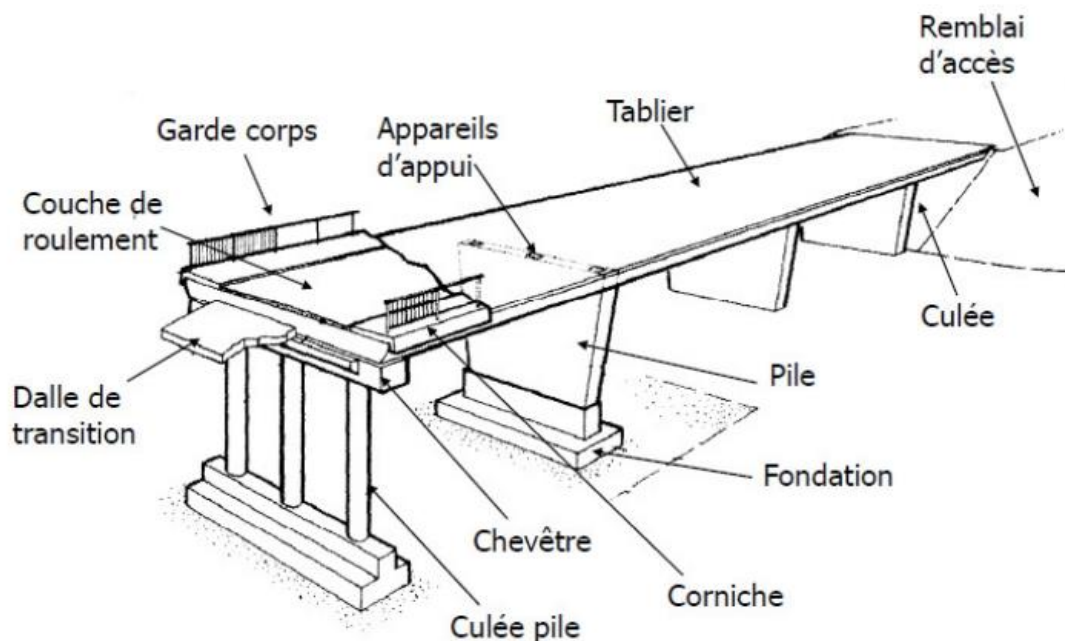


Figure I. 1 : Différents éléments d'un pont.

I.2.2 Classification des ponts

Les ponts peuvent être classés suivant différents critères : [1]

- *Le matériau principal utilisé* : on distinguera les ponts en bois, pont en maçonnerie, pont métallique (fonte, fer, acier), pont en béton armé et pont en béton précontraint.
- *Le procédé de construction* : de nombreux procédés ont été mis au point au cours de ces dernières décennies, tel que la construction sur étaielements, la construction en utilisant des poutres préfabriquées, la construction par poussage et par encorbellement.
- *Le fonctionnement mécanique* : on distingue trois catégories, à savoir, pont à poutres (éléments porteurs parallèle à l'axe du pont), pont en arc (éléments porteurs en arc,

encastrés ou articulés, générant des poussées horizontales aux appuis) et les ponts suspendus (tablier suspendu à deux câbles porteurs principaux ancrés dans des massifs d'ancrage au niveau des culées, passant aux sommets de pylônes et supportant le tablier par l'intermédiaire de suspentes).

I.3 Entretien des ponts

Tous les ouvrages d'art doivent être entretenus et si nécessaire, réparés. On distingue l'entretien préventif et la réparation.

L'entretien préventif consiste à intervenir, soit systématiquement, soit sur la base d'une dégradation prévisible ou amorcée, sur tout ou partie d'un ouvrage avant que celui-ci ne soit altéré. Il vise à prévenir une altération, pour des raisons tant économiques que de sécurité de fonctionnement. On distingue :

- *L'entretien courant* : les interventions étant réalisées périodiquement en fonction d'un calendrier ;
- *L'entretien et réparation spécialisé* : les interventions étant programmées en fonction d'observations.

I.3.1 Entretien courant

L'entretien courant comprend des tâches régulières et systématiques et des tâches conditionnées par l'environnement et l'usage des ouvrages. Il ne nécessite pas l'application de techniques spéciales ni de moyens spéciaux et ne concerne pas les interventions structurelles. Les interventions sont réalisées périodiquement en fonction d'un calendrier. L'entretien courant des ouvrages doit être réalisé une fois par an.

L'eau et la végétation constituent les principales causes de dégradation des ouvrages d'art. Les opérations d'entretien courant visent principalement à remédier à ces attaques, afin de faire en sorte :

- Que l'eau soit évacuée le plus efficacement possible de l'ouvrage afin qu'elle ne pénètre pas dans la structure;
- D'éliminer la végétation sur l'ouvrage et aux abords car elle désorganise les structures par ses racines et emprisonne l'humidité.

L'entretien courant peut être réalisé par le maître d'ouvrage en régie (par exemple, les équipes d'exploitation chargées de la voirie) ou par un prestataire extérieur.

Pour être bien conduit, l'entretien courant des ouvrages d'art doit être effectué:

- Par une équipe habituée à ce genre de travaux, encadrée par un chef d'équipe ayant acquis une bonne connaissance des ouvrages;
- Par une équipe disposant du matériel adapté;
- Suivant un programme préétabli par itinéraire ou par nature d'intervention;
- Au moment opportun : par exemple, le nettoyage des ouvrages peut avantageusement trouver sa place en fin d'hiver, mais aussi à l'automne et comprendre la vérification des dispositifs d'évacuation des eaux.

I.3.2 Actions d'entretien courant

Il s'agit des opérations suivantes :

- Élimination de toute végétation nuisible sur l'ensemble de l'ouvrage et à ses abords (perrés, talus) (PONTS et MURS);
- Nettoyage des dispositifs d'écoulement des eaux : gargouilles, barbacanes, fossés, caniveaux, drains... (PONTS et MURS) ;
- Nettoyage des dépôts en rives de la chaussée et sur les trottoirs (PONTS et MURS)
- Nettoyage des joints de chaussée, des joints de trottoirs et de leurs accessoires (PONTS) ;
- Nettoyage des sommiers d'appui, de l'intérieur du tablier, s'il y en a (PONTS) ;
- Enlèvement des embâcles à l'amont des piles ne nécessitant pas de moyens spéciaux (PONTS);
- Contrôle de l'état et nettoyage des dispositifs de retenue (garde-corps, glissières, barrières) et des accès de visite (trappes, portes, échelles, nacelles), s'ils existent (PONTS et MURS) ;
- Contrôle des dispositifs de fixation des réseaux concessionnaires à l'ouvrages, s'il y en a (PONTS);
- Nettoyage des graffitis et des affiches (PONTS et MURS);

- Maintien en état de la signalisation relative à l'exploitation de l'ouvrage et située sur ses abords ou sur les voies (restrictions de circulation, de vitesse, limitation de tonnage...) (PONTS et MURS) ;

- Entretien courant de la chaussée sur ouvrage.

I.3.3 Entretien et réparation spécialisé

Malgré un bon entretien, l'ouvrage subit, avec le temps, des dégradations sous l'action de la circulation et de son environnement ; leur réparation rapide peut éviter une aggravation entraînant des dépenses importantes.

I.3.4 Action d'entretien spécialisé [3]

- Enlèvement des amas de corps flottants à l'amont des piles nécessitant de moyens spéciaux

- Travaux ou opérations d'entretien nécessitant une passerelle;
- Mise en place d'encrochements;
- Réfection des dispositifs d'écoulement des eaux;
- Suppression des venues d'eau, protection des parements contre l'humidité et les ruissellements;

- Réfection de la chape d'étanchéité sous la chaussée;
- Réfection des joints de chaussée et de trottoirs;
- Réfection ou création de dispositifs d'entretien et de visite;
- Mise en peinture des garde-corps et des éléments métalliques des équipements;
- Entretien des armatures du béton;
- Mise en œuvre de produits de protection des parements en béton.

I.3.5 Action de réparation spécialisée [2]

- Pour le béton
 - L'injection de fissures structurelles;
 - La reconstitution de béton dégradé sur une profondeur importante ou une surface étendue;
 - L'adjonction d'armatures passives;
 - La mise en œuvre de matériaux composites collés;

- L'application d'une précontrainte additionnelle.
- Pour le métal
 - La réfection d'assemblages boulonnés ou rivés;
 - La reconstitution ou le remplacement de pièces d'un ouvrage métallique.
- Pour les fondations
 - La reprise de fondation en sous œuvre;
 - Le confortement de fondations par rideaux de palplanches métalliques, par micropieux, par injection du sol, par bétonnage de cavités.
- Pour la maçonnerie
 - La reconstitution de pierres altérées;
 - L'injection;
 - La reconstruction partielle;
 - La pose de tirants d'enserrement des tympans ou des murs en retour, l'épinglage des bandeaux;
 - La réalisation d'une contre-voûte.

I.4 Conclusion

La notion de la structure parfaitement durable est une notion irréalisable. De ce fait, il nous faut déterminer les principales causes de désordre, en utilisant des méthodes appropriées.

II.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, on relatara les différentes causes et raisons qui mènent à la dégradation des structures, ainsi que les techniques de diagnostic des désordres.

II.2 Dégradation et vieillissement

Pour garantir une auscultation précise et efficace, il faut connaître les règles fondamentales régissant les mécanismes de vieillissement et de dégradation. Selon leur affectation et leur exposition, les ouvrages peuvent être soumis à toutes sortes d'actions. Ces actions peuvent par exemple être classifiées selon leur origine: naturelle ou provoquée par les hommes. Les conséquences de ces actions sont des modifications – vieillissement, dégradation – des matériaux de construction ainsi que de l'ouvrage ou de parties de l'ouvrage.

Faute de financement pour des constructions nouvelles, la conservation, la réhabilitation et la durabilité sont aujourd'hui les concepts à la mode dans le domaine du génie civil.

II.3 Désordres affectant les ouvrages

Plusieurs désordres peuvent affecter les ouvrages en génie civil, qui sont dus à des dégradations des matériaux, des erreurs de conception ou d'exécution, ainsi qu'à des modifications des conditions d'exploitation ou d'utilisation.

II.3.1 Dégradation des Matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants [4]:

- Chocs, érosion, abrasion : principalement sur les ouvrages se situant en milieu maritime.
- Action des cycles gel-dégel : dans les régions à climat froid.

- Altération physico-chimique du béton : dans les milieux agressifs.
- Retrait du béton : principalement dans les environnements chauds et secs.
- Corrosion des armatures métalliques : par manque d'enrobage, par carbonatation ou par attaque aux chlorures.

II.3.1.1 Erosion, abrasion et chocs

Les ouvrages sujets à l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants et à l'action des vagues à chaque marée. La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.

II.3.1.2 Altération physico-chimique du béton

L'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes sont à l'origine de différents mécanismes de dégradation du béton. L'eau, lors de sa percolation au sein du béton, dissout des constituants tels que la chaux et augmente la porosité du béton. Si de plus l'atmosphère est chargée d'anhydride sulfureux, le béton voit sa résistance mécanique diminuer et son niveau d'alcalinité chuter; cette perte d'alcalinité peut aussi être induite par la carbonatation du béton. La variation de la nature basique du milieu est une des causes de l'accélération de la corrosion des aciers.

Une autre cause de vieillissement du béton correspond aux mécanismes d'alcali-réaction entre les granulats et le ciment. La formation de gels expansifs qui en résulte se traduit par la formation d'étringite au contact de la chaux et des aluminates du ciment qui s'expansent et, en conséquence, fissurent le béton. Les pertes de performances du béton favorisent la corrosion des armatures sous l'action combinée de l'eau et des chlorures.

II.3.1.3 Action des cycles de gel-dégel

Les dégradations dues aux cycles de gel-dégel affectent principalement les parties non protégées par un revêtement étanche. Selon le taux de porosité et de perméabilité des

bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures. La dégradation par gel-dégel du béton est amplifiée par des chocs thermiques causés par l'apport de chaleur dû à la fusion ainsi que l'utilisation de sels antiverglas. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage de surface et le gonflement de tout ou partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau.

II.3.1.4 Retrait

On distingue :

- Le retrait de prise du béton lors de la construction : les variations de volume au début de la prise du béton tendent à provoquer la formation en surface de petites fissures. Ces fissures présentent l'aspect caractéristique des écailles de crocodile.
- Le retrait de durcissement : les réactions chimiques liées au durcissement du béton se prolongent longtemps (probablement plusieurs années) et entraînent une diminution de volume appelée retrait au durcissement ou tout simplement «retrait». Si l'ouvrage ne peut se déformer librement à cause de contraintes appliquées, il se crée des tensions qui peuvent fissurer la masse de béton.

II.3.1.5 Corrosion des armatures

Les différentes causes de fissuration des bétons décrites préalablement limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs en diminuant l'alcalinité du béton et en favorisant l'action des chlorures. Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton.

II.3.2 Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution.

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation sont dues à des hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, ou de fonctionnement de l'ouvrage. Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections ou d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables. Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action des gradients de température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte due à des erreurs de tracé mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles et sur leur interaction avec la structure (frottement). Un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissurations des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate [5].

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur les imperfections de coffrage, les défauts de bétonnage, les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage [5].

Des enquêtes statistiques menées par le bureau Sécuritas de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton [5], ont montré que le nombre total de sinistres dus à des erreurs de conception ou d'exécution est comme suit :

Erreurs de conception (3.5% des cas)

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- Erreurs dans le pré-dimensionnement des éléments.
- Négligence totale de la sismicité de la zone.
- Mauvais choix de la meilleure variante.
- Absence de l'étude comparative technico-économique.
- Structure instable.

Erreurs de calcul (étude) (13.6% des cas)

- Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.

- Absence d'études.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Non vérification des états de service (déformations).
- Dessins incomplet ou insuffisant.

Erreurs d'exécution et de réalisation (82.9% des cas)

- Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts (environ 2.5%).
- Désordres résultants de déformations excessives (soit 19.7%).
- Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (15.5%) :
Coffrage 2% ; Bétonnage 4% ; Ferrailage 7% ; Décoffrage 0.5% ; Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux) 1.5%.
- Fausses manoeuvres 1.5%.
- Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles 43.7%.

II.3.3 Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. L'évolution des conditions de chargements est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent.

Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération, des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles) qui avaient été sous-estimées lors de l'exécution de l'ouvrage. C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de pont, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules.

II.4 Désordres et causes probables

Le tableau II.1 résume les principaux désordres affectants les ouvrages en béton armé (et/ou précontrainte) et les causes probables de chaque phénomène. [6]

Tableau II.1 : Désordres enregistrés sur les ponts et leurs causes probables.

Désordre	Causes probables
Aciers dénudés	<ul style="list-style-type: none"> • Disparition ou enrobage insuffisant du béton; • Attaque du béton; • Choc mécanique; • Mauvaise étanchéité.
Basculement	<ul style="list-style-type: none"> • La poussée des terres; • Tassement; • Consolidation; • Sous-pression; • Affouillement.
Corrosion aciers	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte ou évaluation insuffisante de la notion de Fissuration; • Acier dénudé, mauvaise étanchéité, enrobage insuffisant; • Erreurs de calculs. • <u>Conséquences</u>: Fissures dues à la redistribution des efforts, épaufrures, aggravation des flèches permanentes et déformation des poutres, dalles et coques, perte de précontrainte, instabilité et rupture.
Corrosion béton	<ul style="list-style-type: none"> • Action de l'eau ou d'ambiance agressive ; • Formation de sels de Candlot; • Effet du gel.
Défaut du parement	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise réalisation ou mauvaise conception du coffrage ; • Tassement du cintre ; • Décoffrage prématuré.
Déformation- Flèche permanente	<p>Diminution de la précontrainte dans le temps ; ayant pour origine :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surcharge de tout ou partie d'ouvrage; • Diminution de la précontrainte dans le temps; • Déformations des parois.
Déformation permanente anormale de la superstructure	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité du béton insuffisante ; • La hauteur de construction réduite ; • Décoffrage prématuré.
Désintégration généralisée	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion chimique du béton, corrosion des aciers ; • Gel ; • Effort mécanique excessif.
Efflorescence	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise étanchéité de l'ouvrage.

Epaufreure	choc, action du climat, la pression ou une expansion à l'intérieur de la masse. Se situe souvent le long du tracé d'armatures (gonflement par la rouille) ou sur les arêtes.
Flèche permanente	• Surcharge de tout ou partie d'ouvrage.
Gonflement	• Gel, Attaque chimique, Phénomène d'alcali-réaction.
Nids de cailloux	• Béton mal confectionné.
Porosité	C'est un cas important de désordre dû à la qualité du béton. Il faut distinguer ce défaut des simples défauts de parement. • <u>Conséquences</u> : des suintements, des efflorescences, des stalactites, corrosion béton, corrosion acier, gonflement, désintégration, fissures.
Stalactite	• Porosité ou Fissuration du béton.

II.5 Les fissures

Une fissure est considérée comme une discontinuité dans le champ de déplacement, à travers laquelle les contraintes de traction sont nulles ou diminuent en fonction de l'ouverture de cette même fissure (hypothèse de Griffith 1920). La fissuration peut se produire par compression, traction, cisaillement, aussi bien sous chargement statique qu'en fatigue, sous l'effet des charges permanentes ou des surcharges ou lors du déplacement des charges. [7]

II.5.1 Les caractéristiques des fissures

Les caractéristiques des fissures se résument en :

- **L'âge et l'évolution**: il nous permette de connaître la cause de génération mais d'une façon approximative.

- **La morphologie des fissures**

Le tracé: Le tracé d'une fissure se définit par son orientation et sa longueur mesurable sur l'ouvrage. L'orientation est souvent révélatrice de son origine; lorsque la fissure est

continue sur l'axe de l'orientation, elle est dite fissure franche, lorsque l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite discontinue.

L'ouverture: On définit l'ouverture d'une fissure par l'ouverture maximale relevée sur le tracé.

La profondeur: on distingue

- Fissure traversante : lorsqu'elle est visible sur deux faces de la structure.
- Fissure aveugle : si elle est supposée traversante mais bouchée sur la face non accessible de la structure (exemple fissure d'un mur de soutènement); elle est souvent d'ouverture importante.
- Fissure dite de surface : si l'ouverture est maximale en surface et s'annule au sein du matériau.

• **L'activité**

L'activité caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps. On distingue :

- Fissure morte : si l'ouverture reste constante quelles que soient les variations de températures ou de charges.
- Fissure active : si l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que température, charges, vibrations, hygrométrie ...etc.
- L'ouverture moyenne d'une fissure active est la demi-somme de l'ouverture minimum et maximum.

II.5.2 Types de fissures et causes probables

Les fissures ne sont pas à considérer a priori comme un désordre. Leur existence et leur configuration doivent cependant toujours attirer l'attention du visiteur; elles peuvent rendre le matériau plus sensible à certaines agressions. Le tableau II.2 donne les différents types de fissures. [6]

Tableau II.2: Différents types de fissures enregistrés sur les ponts et leurs causes probables.

Fissures	Causes probables
Fissures courantes (Dans la masse)	<ul style="list-style-type: none"> • Apparaissent en général sur des surfaces soumises à une dessiccation excessive avant la fin de prise du béton ; • Retrait lors du durcissement ; On indiquera si elles sont longitudinales, transversales ou non orientées.
Fissures de désintégration	<ul style="list-style-type: none"> • Compression excessive ; • Effet du gel.
Fissures en écailles de crocodile	<ul style="list-style-type: none"> • Retrait de prise du béton.
Fissures inclinées dans l'âme	<ul style="list-style-type: none"> • Cisaillement.
Fissures internes	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement du coffrage; • Variation de température; • Variation de l'hygrométrie.
Fissures isolées	<ul style="list-style-type: none"> • Le retrait; • Les variations de température.
Fissure oblique	<ul style="list-style-type: none"> • Tassement des fondations.
Fissures produites pendant la prise du béton	<ul style="list-style-type: none"> • Mouvement des coffrages.
Fissures reproduisant le ferrailage	<ul style="list-style-type: none"> • Apparaissent à la construction par suite d'une vibration des armatures (s'observe en général sur l'ouvrage non revêtu).
Fissures superficielles	<ul style="list-style-type: none"> • Phénomène du retrait

II.6 Diagnostic

II.6.1 Objectifs du diagnostic

Le guide technique "Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton" définit six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus.

La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation », peut être déclenchée par une opération de surveillance, une opération d'entretien, ou à la suite d'un évènement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé.

La deuxième étape est le « diagnostic » proprement dit, ou recherche d'une pathologie à partir des symptômes. Il est demandé dans le cadre :

- d'une étude spécifique;
- de travaux de réfection ou de rénovation, de renforcement;
- d'une inspection régulière mettant en évidence des désordres;
- d'une expertise;
- ou d'une démarche préventive...

II.6.2 Visite préliminaire

La visite préliminaire a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigations. Après cette visite, l'ingénieur doit être capable d'estimer le coût probable et la durée des investigations, si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage.

II.6.3 Inspection détaillée

L'inspection visuelle de la totalité de la structure est mise en œuvre afin de détecter tous les signes de détérioration, et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres. Elle comprend les deux phases suivantes :

• Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc. Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.).

• Inspection

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

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

II.6.4 Mesures relatives aux armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufrures, taches de rouille. Dans certaines circonstances, toutefois, une délamination dans le lit des armatures peut se produire, sans signes apparents de corrosion.

II.6.4.1 Mesure de l'enrobage des armatures

L'enrobage des armatures est un paramètre déterminant dans les phénomènes de corrosion. La technique de mesure de l'enrobage fait appel à de nombreux appareils disponibles sur le marché, basés sur des principes magnétiques ou réflectométriques (radar géophysique). Toutefois, les précisions et sensibilités varient fortement d'une technique à l'autre, notamment en fonction de la densité du ferrailage. Ces techniques, dont les performances sont fonction de leur principe de base, permettent d'accéder aux informations suivantes :

- Enrobage (profondeur),
- Estimation du diamètre des armatures,
- Présence d'armatures adjacentes,
- Reconnaissance du profil de l'acier.

L'objectif de ces mesures est de localiser géographiquement les armatures faiblement enrobées (en relation avec les dispositions réglementaires d'une part, et les spécifications particulières d'autre part), d'estimer les surfaces concernées, et enfin d'apporter des éléments quantitatifs pour une modélisation de l'évolution possible des phénomènes (en relation avec la profondeur de carbonatation ou de pénétration des chlorures).



Figure II.01: Détection des armatures au radar.

II.6.4.2 Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion

Parmi les méthodes électrochimiques pouvant être appliquées à la détection du risque de corrosion des armatures dans le béton, les mesures de potentiel sont les plus utilisées et les plus connues, du fait de leur simplicité et de leur caractère non destructif.



Figure II.2: Roue électrode.



Figure II.3: Mesures de potentiel.

Dès le contact de l'armature avec le béton, il s'établit à l'interface acier-béton, une différence de potentiel dépendant à la fois des réactions dites anodiques (oxydations : transformation du métal en oxydes) et des réactions dites cathodiques (réduction de l'oxygène). Ce potentiel est complexe et sa valeur dépend de l'état de corrosion des aciers (le potentiel tend vers des valeurs négatives dès qu'il y a amorce de corrosion), mais aussi de la teneur en eau du béton, de la teneur en éléments agressifs, de la profondeur de carbonatation, de la compacité du béton, etc...Il ne peut être relié à ces facteurs par aucune loi, ni aucune formule mathématique, et la valeur absolue de ce potentiel n'aura donc que peu de signification. Néanmoins, les mesures effectuées sur des surfaces représentatives permettent d'établir une cartographie des probabilités de corrosion et de localiser les zones à risque maximum. Les mesures de potentiel sont surtout utilisées en *phase diagnostic* (elles permettent la localisation des prélèvements ou de tests complémentaires), mais également pendant les opérations de réparation (localisation précise des zones à réparer). En surveillance continue, elles permettent également la détection d'un phénomène, bien avant qu'un désordre ne soit visible en surface, et ainsi de mieux planifier les réparations

(mesures préventives). Elles ne permettent pas de déterminer la position des armatures (on utilisera pour cela des méthodes magnétiques ou de réflectométrie radar), ni leur vitesse de corrosion (perte d'épaisseur).

II.6.4.3 Estimation de la vitesse de corrosion

Une autre méthode électrochimique permet d'estimer la vitesse de corrosion instantanée des armatures en une zone donnée. Cette méthode est basée sur la linéarité des courbes intensité/potentiel au voisinage du potentiel de corrosion libre. La pente de la droite $\Delta E/\Delta I$ exprime la résistance de polarisation R_p , qui est reliée au courant de corrosion par $I_{\text{corr}} = B/R_p \cdot A$, où B est une constante, et A la surface concernée par la polarisation. Malgré plusieurs restrictions, d'origine théorique, en mesurant R_p périodiquement, il est possible de contrôler l'évolution du processus de corrosion, d'identifier les zones à forte activité corrosive, et de prédire une durée de vie résiduelle pour la structure considérée.



Figure II.4: Mesure de la vitesse de corrosion.

II.6.5 Mesures relatives au béton

II.6.5.1 Émission acoustique

Lors de la croissance des fissures ou des déformations plastiques, la libération rapide de l'énergie de déformation produit des ondes acoustiques, qui peuvent être détectées par des capteurs en contact avec ou attachés à la surface de l'objet testé.

• Avantages

- Surveillance structurelle en fonction des charges appliquées;
- Capable de localiser une possibilité de défaillance ;
- Equipement portable et facile à utiliser,
- Efficace pour les essais de charge.

• Limitations

- Essais coûteux;
- Utilisé lorsque la structure est chargée et la dégradation croissante;
- Connaissance approfondie nécessaires pour la réalisation d'essai;
- Interprétation des résultats est assez complexe.

II.6.5.2 L'impact acoustique

Utilisé pour détecter les vides, délaminations, décollement, et les microfissures. La surface étudiée est frappée avec un outil. Les caractéristiques de fréquence et d'amortissement du bruit résultant donnent une indication de la présence de défauts; l'équipement peut varier d'un simple marteau à une remorque équipée par un matériel électronique sophistiquée. Cette méthode n'est utilisée que rarement vu que les résultats sont influençables par la géométrie de l'élément ausculté.

II.6.5.3 Carottage

Une fois le carottage effectué, des essais peuvent être réalisés sur cette dernière. Cette méthode permet de déterminer avec exactitude la résistance à la compression et à la traction, les propriétés de torsion, le module d'élasticité et aussi de soumettre l'échantillon

à des tests chimiques. En contrepartie, comme tous les essais destructifs, cette méthode présente des inconvénients à savoir le risque d'endommager des carottes.

II.6.5.4 Scléromètre

L'essai au marteau Schmidt évalue la résistance en compression du béton par le rebond d'une masse élastique (marteau). La masse, montée sur un ressort, « a une quantité d'énergie potentielle fixe qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai ». Une fois cette masse relâchée, elle rebondit depuis la tête, qui est toujours en contact avec la surface, et un indice de rebondissement indiqué par un curseur le long d'une règle graduée est obtenu. La calibration de l'appareil permet de corrélérer cet indice à la résistance en compression du béton.



Figure II.5: Essai au marteau Schmidt.

Malgré le fait que l'essai au marteau Schmidt est très simple à réaliser, il présente plusieurs inconvénients. Dans un premier temps, il est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple, si la tête du marteau est appuyée sur un granulat, l'indice de rebondissement sera plus élevé que s'il est situé sur un vide. Dans un second temps, la tête du marteau doit toujours être perpendiculaire à la surface du béton, ce qui n'est pas facilement réalisable. De plus, la position du marteau par rapport à la verticale influencera l'indice de rebondissement, la gravité agissant sur le déplacement de la masse du marteau.

II.7 Conclusion

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, il comprend :

- Les résultats de l'inspection détaillée;
- Les résultats des essais in situ et de laboratoire;
- Une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue et leur évolution probable,
- Des conclusions claires sur les désordres constatés;
- Une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer;
- Des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.

III.1 Introduction

Suivant l'importance et les causes des désordres ou des insuffisances affectant un pont en béton, le projet de réparation et/ou de renforcement repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des cinq catégories suivantes :

- Les traitements de surface : ragréage et injection des fissures ;
- La protection du béton et des armatures ;
- La régénération des matériaux ;
- L'ajout de forces ;
- L'ajout de matière.

Cependant l'ingénieur peut aussi faire appel à des techniques de réfection modernes au moyen de matériaux composites, généralement collés à la surface des éléments de structure à renforcer. Ces techniques, qui ont connu un fort développement durant les deux dernières décennies, font aujourd'hui partie de l'art de construire et, en particulier, de la réparation et le renforcement des constructions.

III.2 Méthodes de réparation et de renforcement

III.2.1 Traitement de Surface

Les principaux traitements de surface sont les ragréages et l'injection des fissures.

III.2.1.1 Ragréages [8]

Le ragréage consiste en premier lieu à préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydrodémolition, le décapage par marteau pneumatique, le bouchardage, le burinage et le piquage par petit marteau pneumatique.

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

- les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés.

- les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortier), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus utilisés sont ceux à base de résines époxydiques ou polyuréthanes.

- les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymères organiques réactifs.

III.2.1.2 Injection des fissures

Selon l'origine des contraintes de traction qui les ont provoquées, les fissures offrent un faciès et un tracé typiques. Très souvent, notamment dans le cas de la flexion, la fissuration comporte des fissures principales nettes et rectilignes sur lesquelles se greffent de nombreuses ramifications. De telles ramifications peuvent exister aussi au voisinage des armatures proches de la fissure principale : elles sont dues à l'effet d'entraînement des aciers dans la zone perturbée [9].

Les fissures sont caractérisées par [10]:

- Leur âge, qui peut conditionner leur injectable ;
- Leur tracé, souvent révélateur de leur origine ;
- Leur ouverture, mesurable à l'aide d'appareils spécialisés (fissuromètre, compte-fils, jauges d'épaisseur)
- Leur profondeur, permettant de distinguer les fissures traversantes, aveugles ou de surface ;
- Leur activité et/ou leur évolution, permettant de distinguer les fissures inertes des fissures actives dont l'ouverture varie en fonction des facteurs extérieurs tels que la température, charges, vibrations, hygrométrie etc. La variation de cette ouverture définit le souffle de la fissure.

L'injection des fissures précède généralement un autre système de réparation. Il peut s'agir simplement de les colmater pour empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier, de l'eau, ou d'introduire un matériau en complément d'un ajout de forces par précontrainte pour rétablir le monolithisme de la structure.

On distingue deux grandes catégories de traitement: les traitements de surface et le traitement dans la masse.

a) **Les traitements de surface** qui permettent essentiellement d'assurer ou de rétablir l'étanchéité de la surface d'une structure et d'éviter ou de stopper la corrosion des armatures. Parmi ces traitements, on peut citer:

- **Le calfeutrement**, qui consiste à obturer la fissure par application d'un produit déposé dans une engravure façonnée le long de son tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur;
- **L'imprégnation**, qui permet d'étancher une surface présentant un réseau important et diffus de microfissures. Le produit est passé sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau;
- **Le pontage**, qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent, de 3 mm d'épaisseur, de part et d'autre des lèvres de la fracture.

b) **Le traitement dans la masse** qui consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

III.2.2 Protection du Béton et des Armatures

III.2.2.1 Techniques de protection du béton

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis à vis des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis à vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. On distingue cinq grandes familles de produits qui ont différentes caractéristiques [7] :

a) Hydrofuges de surface

Destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau tout en assurant une perméabilité à la vapeur d'eau. Il s'agit principalement de silicone en solution aqueuse que l'on peut appliquer à une surface légèrement humide.

b) Minéralisateurs

Ce sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation" du support.

c) Peintures

On peut protéger le béton par de la peinture, qui joue aussi un rôle esthétique. Ces peintures sont à base des copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse; ou autres résines époxydiques.

d) Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère

Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié sont des produits bicomposants constitués d'un ciment additionné de charges minérales et d'une résine miscible souple (par exemple latex styrène-butadiène). Ils sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 3 mm. Les revêtements minces à base de polymère sont constitués de plusieurs couches de résines dont l'épaisseur totale est comprise entre 0,5 et 2 mm.[11]

Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures.

e) Revêtements plastiques épais

Les Revêtements plastiques épais ont la même composition que les peintures classiques, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre. Ils sont appliqués avec un dosage de $1.5 \text{ à } 4 \text{ kg/m}^2$, et donnant une épaisseur finale de 1 à 3 mm .

III.2.2.2 Protection des armatures

Les principales causes de la corrosion des armatures du béton armé, sont la carbonatation et la présence d'ions agressifs tels que les chlorures dans un milieu sec et humide. Les armatures peuvent être protégées par [7]:

a) Protection cathodique

Technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature.

b) Les inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoate de sodium, qui prolongent la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier.

c) Revêtement des armatures

Ce fait par revêtement organiques de polymères comme les résines époxy; ou par revêtement métallique comme le zinc.

III.2.3 Régénérations des Matériaux

Plusieurs techniques peuvent être appliquées [7-12]:

a) Technique de réinjection des câbles de précontrainte

Cette technique, applicable pour les structures en béton précontraint, consiste à remplacer l'air présent dans la cavité (vides laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte), par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable. Le remplissage ne peut pas être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauterie et de produits spéciaux.

b) Extraction des chlorures

Ce traitement, permet d'extraire les chlorures présents dans le béton de la structure, ce traitement peut durer de 6 à 12 semaines et permet d'extraire 40 à 50 % des chlorures situés dans le béton, surtout au voisinage de la surface.

c) Autres procédés

Il existe d'autres procédés de régénération des matériaux, tels que la ré-alcanisation du béton et le procédé récent électrochimique appelé extraction des chlorures et ré-alcanisation par auto-génération de courant.

III.2.4 Ajout de Forces ou de Déformations

Afin d'augmenter la capacité portante ou prolonger la durée d'exploitation d'un ouvrage existant, on applique des efforts d'une intensité connue et suivant des directions définies par le biais de câbles précontraints, qu'on appelle précontrainte additionnelle. Cette précontrainte, qui est en général extérieure, permet de renforcer la structure, son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures. Parmi ces applications, on distingue [7-12]:

III.2.4.1 Renforcement des ouvrages en flexion

On applique ce renforcement en particulier dans les tabliers de ponts, qui visent à augmenter leur résistance à la flexion. Le tracé des câbles précontraints additionnels peut être rectiligne ou polygonal. On peut soit renforcer et/ou réparer les éléments porteurs (poutres, dalles, caissons, etc...) ou les éléments secondaires (entretoises, éléments de tablier).

III.2.4.2 Renforcement des ouvrages vis à vis de l'effort tranchant

Un câblage au tracé polygonal permet souvent de traiter simultanément les insuffisances de résistance à la flexion et à l'effort tranchant d'un tablier de pont : en jouant, dans une certaine mesure, sur l'inclinaison des câbles au voisinage des appuis intermédiaires, et donc sur l'emplacement des points de déviation, il est souvent possible d'optimiser le tracé des câbles de précontrainte. En général, les angles de déviation sont de l'ordre de 10° à 15° [13].

Lorsque le problème majeur, dans une structure en béton précontraint, est celui de l'effort tranchant, et si l'inclinaison des câbles de précontrainte additionnelle n'est pas

possible, on a recourt à l'emploi d'étriers actifs, généralement verticaux et constitués de fils, de barres ou de mono torons.

III.2.4.3 Exemples de traitement d'autres types de défauts

- Dans le cas des fissures d'entraînement, apparaissant à l'arrière d'ancrages de câbles dans des hourdis minces et insuffisamment ferrailles, le traitement peut être soit de type passif par collage d'armatures de renfort, soit de type actif par un renforcement par précontrainte longitudinale.
- Les poussées au vide dues à la courbure des câbles de précontrainte peuvent donner lieu à des désordres plus ou moins locaux. Les désordres locaux sont généralement dus à un tracé de câble maladroit (souvent gauche dans l'espace) dans une zone de faible enrobage. À la mise en tension, l'armature tend à prendre un tracé rectiligne et fait localement éclater le béton. La réparation d'un tel désordre consiste simplement, après remise en place correcte de l'armature, à bétonner une surépaisseur locale de béton renforcée par un ferrailage d'acier doux. En général, il n'est pas nécessaire de détendre le câble sauf si la zone touchée est trop importante. Les désordres « semi-locaux » sont souvent dus à des erreurs de conception et concernent principalement le hourdis inférieur de poutres-caissons de hauteur variable dans lequel ont été placés des câbles longitudinaux. [14]

III.2.5 Ajout de matière

III.2.5.1 Béton projeté [15]

La mise en place du béton par projection permet l'application rapide du béton sur des surfaces verticales ou horizontales sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des coffrages. Le béton projeté est de plus en plus utilisé pour réparer des surfaces de béton endommagées par des problèmes de corrosion.

- **Les principaux problèmes qui peuvent survenir**
 - Mauvaise adhérence avec le substrat ;
 - Mauvais remplissage derrière les barres d'armature ;
 - Ségrégation, poches de sable ou piégeage des rebonds.

• Les caractéristiques du béton projeté

- Le rapport E/C des bétons mis en place par projection est généralement compris entre 0,35 et 0,50 et les résistances à la compression sont généralement comprises entre 30 MPa et 40MPa [16].
- Un béton projeté de bonne qualité possède une bonne adhérence avec l'ancien béton, il a une bonne résistance à la compression et offre une bonne protection (faible perméabilité).
- On peut améliorer de nombreuses propriétés du béton projeté (durabilité, adhérence, réduction de la quantité de rebond) en utilisant des adjuvants, des ajouts minéraux ou des fibres.
- Accélérateur de prise (pour accélérer le taux de mise en place. Peut réduire la résistance à long terme).

Pour obtenir des performances adéquates, il est essentiel d'effectuer une bonne préparation de la surface en effectuant les opérations suivantes [17]:

- Enlever tout le béton détérioré.
- Prévoir une profondeur d'au moins 2,5 cm.
- Dégager les aciers d'armature d'au moins 2,5 cm.

III.2.5.2 Coulage ou injection de béton ou de mortier

Lorsque le volume de béton à reconstituer est assez important ou de forte épaisseur (au moins 5 à 10 cm), les techniques de ragréage et de béton projeté peuvent être inadaptées pour des raisons techniques ou économiques. Une technique alternative permet alors de reconstituer une partie de structure en béton dégradé : le coulage ou l'injection de béton, de mortier ou de coulis. Ce type de réparation est généralement durable, pourvu que la compatibilité chimique entre le nouveau ciment et le ciment en place ait été vérifiée [18]. En raison des épaisseurs mises en œuvre, on ne rencontre pas les phénomènes de gradient thermique de surface qui endommagent parfois la surface de reprise et provoquent le décollement des ragréages. En plus, les épaisseurs mises en œuvre permettent d'armer le béton rapporté et de le connecter à son support.

III.2.6 Renforcement par collage de tissus composites [19]

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone. Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

III.2.6.1 Propriétés des fibres de carbone

Les fibres de carbone sont obtenues par pyrolyse de fibres organiques réticulées et orientées en atmosphère contrôlée. Elles s'utilisent essentiellement sous la forme de matériaux composites pour conférer au produit fini le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevée pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier. Les composites issus de fibres de carbone bénéficient des caractéristiques suivantes [16] :

- Grande résistance et haut module d'élasticité en traction ;
- Grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
- Grande résistance à l'usure ;
- Grande résistance à la corrosion ;
- Grande stabilité dimensionnelle ;
- Grande stabilité thermique (le carbone est pratiquement incombustible) ;
- Légèreté ;
- Absorption des vibrations ;
- Bonnes conductivités thermique et électrique ;
- Transparence aux rayons X.

III.2.6.2 Procédure de mise en œuvre du TFC

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm ; les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un

brossage énergique. Dans le cas de l'acier, de la même façon, il convient d'éliminer les parties oxydées non adhérentes et de dégraisser la surface.

Une couche de résine XEP 2919 est d'abord appliquée au rouleau à poils ras de façon à atteindre un dépôt de 650 à 700 g/m². Le TFC, protégé par une feuille de polyéthylène, est ensuite appliqué. Si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes. Puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m² environ. Si nécessaire, cette opération peut être renouvelée pour une deuxième couche de TFC. Enfin, une couche de fermeture, appliquée à la spatule, est constituée de la même résine additionnée d'une pâte colorante assortie au support [20].

Les figures III.1, III.2 et III.3 illustrent la procédure de mise en œuvre du TFC en trois étapes.



Figure III.1: Application d'une couche de résine.



Figure III.2: Application d'une couche d'imprégnation de la même résine.



Figure III.3: Application de la couche de fermeture.

III.2.7 Ajout d'armatures

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant (et éventuellement élimination du béton dégradé), à disposer des aciers passifs et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton coulé en place. Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la "règle des coutures", en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage [21].

III.2.8 Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés

La technique des tôles collées permet soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation :

- La surface du béton doit subir, avant tout, une préparation soignée ayant pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.
- Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée par les précédentes techniques, en limitant la surface à ragréer à 20 % de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragrée en extrémité de tôles.
- L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôles en acier E24-2. Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E24-3. Ces tôles ont une épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile [3].
- La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée.
- La colle est en général une résine époxydique choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. L'épaisseur minimale de colle est de l'ordre du millimètre.

- Le dispositif de serrage peut, suivant les cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées traversant l'élément ou scellées, d'étais ou de coins. Il doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de 4 KPa durant toute la durée de polymérisation de la colle. Il convient de s'assurer préalablement que la structure peut reprendre les efforts de serrage sans dommage.

III.3 Conclusion

Après détermination des différents désordres, l'ingénieur a pour mission de déterminer la méthode de réparation appropriée pour chaque anomalie dans le but d'assurer le bon fonctionnement et la réussite de la réparation.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder au diagnostic de deux ponts. L'un est implanté à SIDI AICH wilaya de BEJAIA et l'autre à OULED MOUSSA wilaya de BOUMERDES. Les deux ponts présentent des signes de détérioration avancée nécessitant une réhabilitation d'urgence. On préconisera les démarches de réhabilitation à suivre.

IV.2 Objectifs de l'étude

L'étude d'expertise consiste à inspecter et ausculter les ouvrages de façon à pouvoir identifier les causes des dégradations et à fournir la solution de correction optimale, tant du point de vue technique qu'économique relative aux problèmes pathologiques identifiés.

La réalisation de cette étude est effectuée selon trois phases. Ces missions sont identifiées comme suit :

- **Première Mission: Inspection détaillée et auscultation des ouvrages**

- Démarrage du projet;
- Analyse du cadre de référence et des exigences du projet;
- Finalisation du programme d'inspection ;
- Réalisation des inspections et auscultations ;
- Compilation des résultats.

- **Deuxième Mission: Diagnostic et rapport final**

- Analyse des résultats des inspections et auscultations;
- Diagnostic, conclusions et recommandations pour les travaux de réhabilitation à réaliser;
- Estimation approximative du coût des travaux;
- Présentation du rapport final d'étude de chaque ouvrage;
- Validation du rapport et des recommandations de travaux par les autorités.

- **Troisième Mission: Dossiers d'appel d'offres des travaux de réhabilitation**

- Préparation des documents d'appel d'offres pour les travaux
- Validation des documents par les autorités.

IV.3 Cas du pont de SIDI AICH



Figure IV.1: Pont de SIDI AICH.

IV.3.1 Description de l'ouvrage

Situé sur la Route Nationale RN 26, dans la daïra de SIDI AICH, à 38 km à l'ouest de Bejaia, cet ouvrage permet de franchir Oued Soummam sur une brèche de 94,5 mètres de longueur, offrant le passage à 2 voies de circulation (voir figure IV.2).



Figure IV.2: Plan de situation du pont.

L'ouvrage, d'une longueur totale de 126 mètres, est constitué de quatre travées identiques et indépendantes de 31,5 m, appuyées sur deux culées et trois piles en béton armé. L'hourdis repose sur 4 poutres réalisées en béton précontraint.

D'après les documents consultés, il n'y a eu aucune modification importante de la géométrie de l'ouvrage depuis sa construction.

IV.3.2 Inspection de l'ouvrage

À l'issue de notre inspection, de nombreuses anomalies ont été recensées. Les principaux défauts identifiés lors de cette inspection sont :

- La dalle présente quelques signes de détérioration due aux infiltrations d'eau.
- L'enrobage des armatures de la poutre de rive est quasi inexistant; elle présente une fissure importante au niveau du talon (voir figures IV.3 et IV.4)
- De l'écaillage, du délaminage et de l'éclatement sont présents sur les deux piles de rive du pont ainsi qu'à quelques endroits aux culées (voir figure IV.5).
- Les appareils d'appui sont très détériorés; certains ont des frettes métalliques très corrodées et présentent des déformations de la matrice d'élastomère (Voir figure IV.6).
- Quelques dallages de trottoir sont déformés et quelques défauts sont présents sur les garde-corps.



Figure IV.3: Poutre de rive fissurée.



Figure IV.4: Armatures de la poutre de rive dénudée.



Figure IV.5: Éclatement du béton et corrosion des armatures de la pile.



Figure IV.6: Corrosion très importante des frettes.

IV.3.3 Réparation et réhabilitation de l'ouvrage

Les travaux de réhabilitation que nous préconisons sur le pont de SIDI AICH sont résumés ci-après :

- Travaux légers de réparations de surfaces des éléments en béton :
 - Démolition du béton non sain ;
 - Nettoyage des armatures par brossage manuel ;
 - Application d'un produit contre la corrosion sur les armatures ;
 - Pose d'un béton ou mortier de réparation.

- Réparations majeures du béton délaminé :
 - Démolition du béton non sain jusqu'à 25 mm derrière les premières armatures ;
 - Sablage de l'armature par jet d'abrasifs jusqu'à enlèvement de toute trace de corrosion ;
 - Pose d'un béton de réparation coulé en place.

- Travaux de réparation des appareils d'appui :
 - Remplacement des appareils d'appui, incluant ceux non inspectés ;
 - Reconstitution des dés d'appui endommagés.

- Travaux de réparation des trottoirs et des garde-corps :
 - Changer et colmater tous les carreaux de dallage de tous les trottoirs endommagés.
 - Remplacement partiel ou total des ancrages des sections de garde-corps ;
- Travaux de réparation du drainage :
 - Nettoyage de tous les drains obstrués par des déchets ou par l'enrobé bitumineux ;
 - Installation ou remplacement de toutes les descentes de drainage pour tous les drains.
- Travaux divers :
 - Nettoyage de l'assise des culées ;
 - Enlèvement de tous les arbustes qui ont pris racine sur l'ouvrage.

IV.4 Cas du pont intégrant la 2^{ème} rocade du projet autoroute est-ouest



Figure IV.7: Pont de OULED MOUSSA.

IV.4.1 Description de l'ouvrage

Lieu : Wilaya de BOUMERDES / Commune d'OULED MOUSSA.

Maitre de l'ouvrage : Agence Nationale des Autoroutes.

Auteur du projet : INGENERI ZUCCOLO costruzioni.

Réalisation : TEIXEIRA DUARTE / ENGOA / OHL.

Cet ouvrage est de type bow-string avec deux arcs inclinés de 27° par rapport à la verticale, constitués chacun de 4 voussoirs. Les suspentes ont pour rôle de transmettre les efforts du tablier mixte à l'aide de 4 entretoises situées en dessous vers les arcs qui transmettent la quasi-totalité des charges vers le sol. [22]



Figure IV.8: Plan de situation du pont.

IV.4.2 Inspection de l'ouvrage

A l'issue de notre inspection, de nombreuses anomalies ont été recensées. Les principaux défauts et désordres ont été enregistrés au niveau de l'infrastructure. Les figures IV.9, IV.10 et IV.11 illustrent l'étendue des dégâts.



Figure IV.9: Absence d'enrobage et corrosion des armatures des piles.



Figure IV.10: Ségrégation du béton et dénudement des armatures.



Figure IV.11: Fissuration du béton et armatures corrodées.

IV.4.3 Réparation et réhabilitation de l'ouvrage

Les travaux de réhabilitation préconisés sur le pont de OULED MOUSSA sont résumés ci-après :

- **Réparations majeures du béton délaminé :**

- Démolition du béton non sain jusqu'à 25 mm derrière les premières armatures ;
- Sablage de l'armature par jet d'abrasifs jusqu'à enlèvement de toute trace de corrosion ;
- Pose d'un béton de réparation coulé en place.

- **Ajout d'armatures**

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant, à disposer des aciers passifs et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton coulé en place. Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture.

- **Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère**

L'infrastructure étant en contact direct avec le sol, (agents agressifs), les revêtements minces constituent la meilleure protection (voir chapitre III).

Remarque :

L'ouvrage de OULED MOUSSA nécessite une réhabilitation d'urgence. D'une part, au vu de la gravité des désordres existant qui risquent d'être amplifiés et d'autre part, le pont n'est pas en service, ce qui constitue une perte sèche sur le plan économique.

IV.5 Conclusion

L'inspection et la campagne d'auscultation ont pour objectif de recueillir l'ensemble des informations nécessaires à :

- L'établissement du diagnostic complet de l'ouvrage;
- L'identification des travaux de réhabilitation requis.
- La reconstitution géométrique de l'ouvrage;

Néanmoins, la meilleure réhabilitation reste toujours la prévention.

CONCLUSION GENERALE

Vu que la notion de structure parfaitement durable est une notion irréalisable, le déficit d'entretien et les processus de dégradation des ouvrages peuvent être accélérés par plusieurs facteurs qu'on ne peut pas maîtriser.

Nos ouvrages sont affectés par des dégradations menaçant leur sécurité et leur durée de vie. Afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage, des interventions dites de réparation ou maintenance devront être effectuées; ces interventions ressortent d'autant plus à l'art qu'à la technique car elles ne sont pas l'objet d'un enseignement spécifique, et l'ingénieur de terrain est souvent livré à lui-même face à un problème urgent.

Cependant, la solution parfaite est de mieux bâtir préalablement que réparer et renforcer plus tard en respectant les règles de l'art. Pour minimiser les dégâts et les possibilités de dégradation des matériaux, il est conseillé de prendre en considération ces modestes recommandations :

- Tenir compte des déformations du sol.
- Les appuis doivent être protégés pour éviter les désordres dus aux chocs des véhicules,
- S'assurer d'une bonne continuité des différentes phases de coulage de béton.
- Vérifier Le ferrailage transversal.
- Protéger les armatures du béton armé dénudées, lorsqu'il s'agit de désordres localisés.
- Pour éviter le décollement de l'enduit de surfacage et les altérations des matériaux constitutifs de l'appui, il faut qu'il y ait un bon réglage du joint de chaussée
- Empêcher l'infiltration de l'eau avec une bonne qualité de l'étanchéité.
- Nettoyer et entretenir les équipements de l'ouvrage (appareils d'appuis, joints de chaussée, joints de trottoirs) ;

Malgré les diverses contraintes encourues, ce projet nous a permis non seulement d'appliquer mais aussi d'approfondir nos connaissances en matière d'ouvrage d'art. La réussite dans la vie et particulièrement dans la vie professionnelle n'est, en général qu'une suite logique de la réussite dans le cursus universitaire. Pour cela, ce master nous permettra d'appréhender notre avenir dans le monde professionnel.

Références Bibliographiques

- [1] Jean -Armand CALGARO, Michel VIROLGEUX, Projet et construction des ponts, « Analyse structurale des tabliers de ponts ». Ecole Nationale des ponts chaussées, 1994, 349p.
- [2] LCPC, SETRA «Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art- Ponts en béton non armée et en béton armé, fascicule 31»,1979.
- [3] LCPC, SETRA «Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art- Ponts et viaducs en maçonnerie, fascicule 30-31» ,1979.
- [4] P. HAMELIN, « Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites », Technique de l'ingénieur, Vol AM5, 2000.
- [5] C.G.S, Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages, Alger – 2^{ème} Semestre 1992.
- [6] Mr. BENBELLIL Bilal et Mr. BENBOURAS Mohamed Amine, memoire de master «Réparation des ponts en béton armé», ENP 2013.
- [7] A. FUENTES, « Le béton armé après fissuration », Edition Eyrolles, 1987.
- [8] Mr. Ahmed LAICHAOUI, thèse de magistère «Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites», ENP 2006.
- [9] J. A. CALGARO et R. LACROIX « Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1997.
- [10] Pr.BALI Abderrahim Projets de Recherche Scientifique «Valorisation et Recyclage des Matériaux Locaux » laboratoire de construction et environnement ENP ; mai 2001.
- [11] J. A. CALGARO et R. LACROIX « Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1997.
- [12] C.G.S, Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages, Alger – 2^{ème} Semestre 1992.
- [13] Mr. BENZAOUZ Ibrahim Khalil, «Etude des ponts soumis à des dégradations », ENP 2004.
- [14] Mr. Mahfoud BENZERZOUR, thèse de magister « Etude expérimentale et numérique du renforcement des tabliers de ponts en béton armé», USTHB 2004.
- [15] M. BENZERZOUR. Etude du renforcement et de la modélisation des tabliers de ponts en béton arme par des rechargements adhérents. XXIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de La Rochelle, France, 2-3 Juin 2003.
- [16] Pr. Bali « Cours de Matériaux de construction », l'école nationale polytechnique, ENP Alger, 2010.

[17] R.LACROIX et J.L. CLEMENT « Comportement structural des bétons armés et précontraints », 2002.

[18] S. M. JOHNSON « Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du Génie Civil », (Traduction française de M. LONDEZ), Paris, 1969.

[19] Jean Armand CALGARO et Roger LACROIX «techniques des ingénieurs, Projet de renforcement ou de réparation d'un pont», C4 503.

[20] M. BENZERZOUR, C. BOULEMIA, R. GAGNE, N. ABRIAK, M. LACHEMI. Structural performance analysis of reinforced concrete slabs repaired using an adherent overlaying with reinforced steel. IABSE International Conference on the Role of Structural Engineers towards reduction of Poverty, New Delhi, India, 2005.

[21] S.DJENDER «Expertise et renforcement des ouvrages en béton armé», PFE ENP, 2002.

[22] Mr. LAOUATI Bilel et Mr.SLIMANI Ali, thèse d'ingénieur «Etude d'un pont type BOW-STRING intégrant la 2^{ème} rocade du projet autoroute est-ouest.», ENP 2009.

[23] A.PLUMIER « Pathologie Et Réparations Structurelles Des Constructions Partie III » ARGENCO, édition 2006.